

Abschlussbericht zu KMU-innovativ-Verbundvorhaben-Klimaschutz: Diagnose und Management von Hotspots in Batteriesystemen

Der Abschlussbericht fasst die Arbeiten der Projektpartner Institut für Thermodynamik (IfT) und Institut für Energie- und Systemverfahrenstechnik (InES) der TU Braunschweig (Förderkennzeichen 16EMO0201) zusammen.

<u>Zuwendungsempfänger:</u>	Technische Universität Braunschweig
	- Institut für Thermodynamik
	- Institut für Energie- und Systemverfahrenstechnik
<u>Förderkennzeichen:</u>	16EMO0201
<u>Vorhabenbezeichnung:</u>	Diagnose und Management von Hotspots in Batteriesystemen
<u>Laufzeit des Vorhabens:</u>	01.09.2016 – 31.08.2019

Inhaltsverzeichnis

Aufgabenstellung.....	2
Voraussetzungen.....	2
Planung und Ablauf	2
Stand der Wissenschaft und Technik	2
Zusammenarbeit	2
Ergebnisse	3
1.1. AP1 Batteriemodellierung zur Abbildung des thermischen Verhaltens und der Detektion und Diagnose von Fehlern (InES).....	3
1.2. Entwurf eines Diagnosesystems zur Erkennung und zum aktiven Management von Hotspots in Batteriesystemen (InES)	9
1.3. AP5: Simulative- und Experimentelle Validierung (IfT)	12
1.4. AP7: Zusammenstellung eines Gesamt-E-Fahrzeugmodells und Abbildung realer Fehlerfälle (IfT) 20	
1.5. AP7: Zusammenstellung eines Gesamt-E-Fahrzeugmodells und Abbildung realer Fehlerfälle (InES) 23	
1.6. AP8: HiL-System Diagnose/Regelung (IfT) und AP 9: HiL Demonstrator (IfT)	24
Nutzen und Verwertbarkeit.....	30

Aufgabenstellung

Ziel des Projekts Dimoba war die Entwicklung von Methoden zur Diagnose und Vermeidung des Auftretens von Hotspots im Batteriesystem von E-Fahrzeugen durch konstruktives und reaktives Management. Hierzu sind drei Teilziele verfolgt worden. Zum einen sollte ein Designwerkzeug entwickelt werden, das auf Basis von detaillierten Geometrieinformationen weitgehend automatisiert Simulationsmodelle erzeugt, die anschließend in ein standardisiertes Format (Functional Mockup Units) überführt werden können. Zum anderen sollte eine Diagnosemethodik entwickelt werden, die, ausgehend von Messdaten außerhalb der Zelle, eine Identifizierung von Hotspots und Zelldefekten ermöglicht. Schließlich sollte ein HiL-/MiL-System für ein Gesamtfahrzeug aufgebaut werden, das die zuvor beschriebenen Methoden kombiniert.

Voraussetzungen

An der TU Braunschweig stand die Weiterführung der Forschung im Bereich elektrifizierter Fahrzeuge, Methoden zur Charakterisierung elektrochemischer Vorgänge und deren erweiterte Anwendbarkeit im Vordergrund. Im Rahmen der Weiterführung dieser Aktivitäten sollten weitere Veröffentlichungen bzw. Promotionen initiiert werden.

Planung und Ablauf

Die geplanten Arbeitspakete lassen sich gemäß den dargestellten Projektzielen in drei Entwicklungsabschnitte einteilen. Für die Diagnosemethodik zeichnet die TU Braunschweig (InES) mit dem diagnosefähigen Batteriemodell sowie dem entsprechenden Diagnosesystem zur Überwachung der Batterie verantwortlich (AP1 und AP2). Die Designsoftware wird unter der Leitung der TLK-Thermo GmbH entwickelt (AP3, AP4, AP5 und AP6). Unter der Leitung des Instituts für Thermodynamik der TU Braunschweig (IfT) wird ein Gesamtfahrzeugmodell bereitgestellt, in das das diagnosefähige Batteriesystem integriert wird. Dieses Arbeitspaket 7 stellt das verbindende Element zwischen den Hauptentwicklungsabschnitten innerhalb des Projekts dar. Hier wird das Designwerkzeug für verschiedene Bauteile der Leistungselektronik angewendet und ein Diagnosesystem integriert. Abschließend wird sowohl das Diagnosesystem als auch das Gesamtfahrzeugmodell in einem HiL-/MiL-System (AP8 und AP9) abgebildet.

Stand der Wissenschaft und Technik

Als Anknüpfungspunkt für das Projekt kann der Stand der Wissenschaft und Technik für die drei Teilziele beschrieben werden. Für das Designwerkzeug existierten zu Beginn des Projekts keine vergleichbaren Werkzeuge, die eine weitgehend automatisierte Überführung von 3D Geometriedaten zu FMUs ermöglichen. Hinsichtlich der Diagnosemethodik sollte die Non-Linear-Frequency Response Analysis (NFRA) auf die Untersuchung von Hotspots übertragen werden, die bis dahin nur für die Analyse elektrochemischer Reaktionen genutzt wurde. Im Bereich der Gesamtfahrzeugsimulationen gab es zu Beginn des Projekts zahlreiche Aktivitäten, jedoch war eine modulare Umsetzung zur variablen Untersuchung neuartiger Topologien zusammen mit der Integration einer auf detaillierten Geometrieinformationen automatisiert erstellte FMU noch nicht verfügbar.

Zusammenarbeit

Das IfT und InES arbeitete während des Projekts eng mit der TLK-Thermo GmbH zusammen. Die experimentellen Untersuchungen fanden in Zusammenarbeit mit dem Institut für

Hochspannungstechnik und Elektrische Energieanlagen (elenia) der Technischen Universität Braunschweig und der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig statt.

Ergebnisse

1.1. AP1 Batteriemodellierung zur Abbildung des thermischen Verhaltens und der Detektion und Diagnose von Fehlern (InES)

Das für das Arbeitspaket entwickelte Batteriemodell wird in Matlab in Form eines so genannten Single-Particle Modells basierend auf den Ansätzen von Doyle und Newman erstellt. Anode und Kathode werden dabei in Form jeweils eines kreisrunden Partikels dargestellt und diskretisiert, dargestellt in Abbildung 1. Die Elektrode selbst wird als porös angenommen, deren Zwischenräume mit Elektrolyt gefüllt sind. Der ionenleitende Separator wird vereinfachend durch eine Elektrolytschicht dargestellt. Zusätzlich sind Doppelschichten für jede stattfindende Reaktion implementiert. Durch das Lösen der Solvat Hülle des Lithium-Ions entsteht ein Potentialsprung.

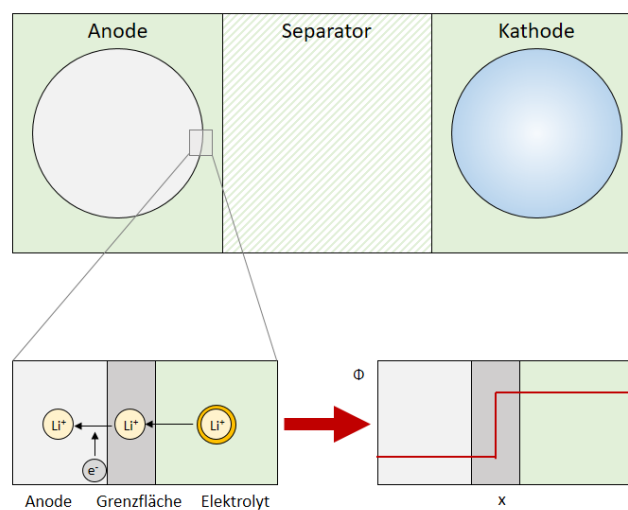


Abbildung 1: Skizze eine Single-Particle Batteriemodells

Die Simulation des Batteriehaltens erfolgt dabei auf Grundlage zellinterner physiko-chemischer Prozesse. Diese Prozesse sind im Modell in Form von partiellen Differentialgleichungen abgebildet, welche in Matlab mithilfe der finiten Volumenmethode örtlich diskretisiert und im Anschluss mittels eines ODE-Solvers zeitlich gelöst werden. Die Feststoffkonzentrationen von Lithium und deren Veränderungen im Batteriebetrieb werden in Form einer Fick'schen Diffusion jeweils für die zwei Elektrodenpartikel implementiert. Die Bilanzierung der Elektrolytkonzentration an Lithiumleitsalz LiPF_6

wird über einen Nernst-Plank Strom realisiert bei dem der Einfluss der Konvektion vernachlässigt wird. Der Reaktionsfluss an der Kathode, berechnet sich über einen Butler-Volmer-Ansatz. Von besonderer Projektrelevanz ist an dieser Stelle die Abhängigkeit der Reaktionsgleichungen von der Temperatur T , über welchen die Einflüsse von Hotspots im späteren Projektverlauf eingekoppelt werden können.

Feststoffkonzentration:

$$\frac{\partial c_s}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(D_s r^2 \frac{\partial c_s}{\partial r} \right)$$

Elektrolytkonzentration:

$$\frac{\partial c_e}{\partial t} = D_e \frac{\partial^2 c_e}{\partial x^2} + (1 - t_p) \frac{j_{Li}}{F}$$

Reaktionsrate Anode/Kathode

$$j_{Li} = a_s i_0 \left(\exp \left(\alpha \frac{\eta F}{RT} \right) - \exp \left(-(1 - \alpha) \frac{\eta F}{RT} \right) \right)$$

Doppelschichtkapazität:

$$j_{DL} = \alpha_s C_{DL} \frac{\partial \Delta \Phi}{\partial t}$$

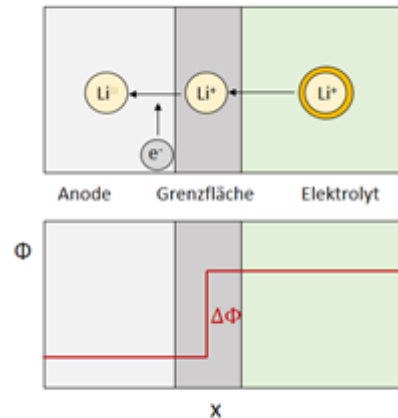


Abbildung 2: Batterie-Modellgleichungen

Das Batteriemodell ermöglicht die Simulation dynamischer Diagnoseverfahren (Impedanzspektroskopie und Nonlinear Frequency Response Analysis). Im weiteren Projektverlauf sollen diese Simulationen im Abgleich mit entsprechenden Laborversuchen validiert werden, um anschließend Hotspot-abhängige Parameter zu identifizieren und zu quantifizieren. Bei den dynamischen Diagnoseverfahren wird die Batterie mit periodischen Stromsignalen angeregt und die Antwortsignale der Zellspannung U ausgewertet. Während bei der Impedanzspektroskopie das System linear angeregt wird, ist bei der Nonlinear Frequency Response Analysis gezielt eine nichtlineare Auslenkung des Systems wichtig, um so die höheren Harmonischen Y_n mit $n > 1$ des Systems analysieren zu können. Beide Methoden sind schematisch in Abbildung 3 dargestellt.

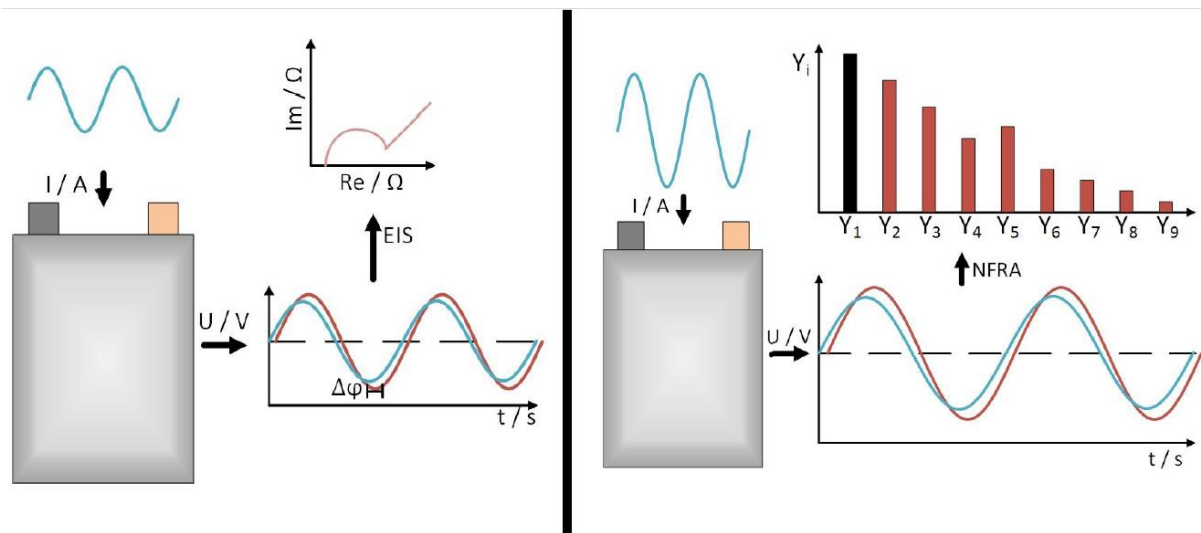


Abbildung 3: Dynamische Batteriediagnoseverfahren: Impedanzspektroskopie (EIS) links und Nonlinear Frequency Response Analysis (NFRA) rechts

In Abbildung 4 sind die Simulationsergebnisse einer Impedanz- und NFR-Rechnung dargestellt. Die etablierte Prozesszuordnung mittels Impedanzspektroskopie ist durch Simulationen mit dem Single-Particle Modell klar erkennbar. Die beiden elektrochemischen Reaktionen und die Doppelschichtkapazitäten werden dem Halbkreisbogen sowie die Diffusionsprozess dem steigenden Ast zugeordnet. Werden die charakteristischen Frequenzen im NFR-Spektrum markiert, so ist eine analoge Prozesszuordnung möglich. Mithilfe von einzelnen höheren Harmonischen Y_n mit $n > 1$ kann diese Analyse noch erweitert werden. Welche Prozesse die Spektren im einzelnen beeinflussen, wird im weiteren Projektverlauf untersucht.

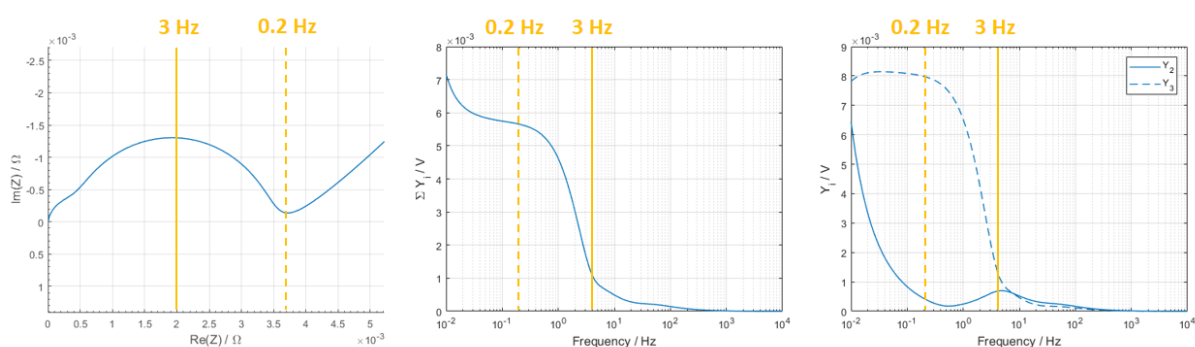


Abbildung 4: NFR und EIS Simulation

Im Anschluss an die Erstellung des Grundmodells wird dieses im nächsten Schritt um eine Temperaturabhängigkeit einzelner Parameter erweitert. Hierfür wird der weit verbreitete Arrhenius Ansatz verwendet:

$$k = k_{ref} \exp\left(\frac{-E_A}{R} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T}\right)\right)$$

Dieser Ansatz wird für die anodischen und kathodischen Reaktionsraten, ionischen Leitfähigkeiten und Diffusionskoeffizienten im Modell implementiert. Durch Implementation der Aktivierungsenergien aus Literatur und Definition von Referenzbedingungen können nun die temperaturabhängige Simulation mit Hilfe des Modells durchgeführt werden. In einem ersten Schritt sind diese in der nachfolgenden Abbildung für Impedanzsimulationen dargestellt.

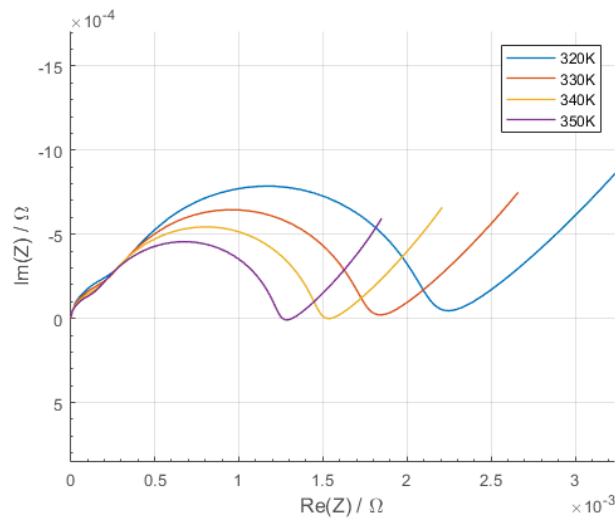


Abbildung 5: Impedanzsimulationen bei verschiedenen Umgebungstemperaturen im Vergleich zu einer Messung

Mit höherer Temperatur werden Reaktionen schneller und die entsprechenden Widerstände kleiner, sodass daraus resultierend die Impedanzen entsprechend mit zunehmender Temperatur kleiner werden.

Analog können die Veränderungen in den NFR-Spektren erklärt werden, welche in den folgenden beiden Abbildungen dargestellt sind. Die NFR-Spektren wurden mit einer AC Amplitude von 4 C simuliert.

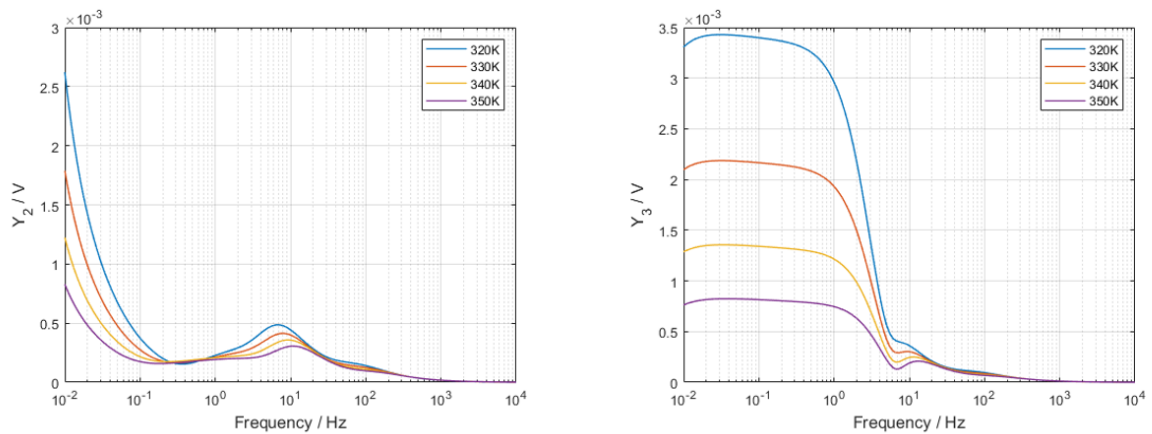


Abbildung 6: NFRA Simulationen bei verschiedenen Umgebungstemperaturen für die Y_2 (links) und Y_3 (rechts)

Durch die Möglichkeit die Anregung einzelner Harmonischer zu interpretieren, kann der Informationsgehalt im Vergleich zu Impedanzen drastisch erhöht werden.

Für die modellhafte Abbildung von Hotspots erfolgt eine Parallelschaltung mehrerer SP-Modelle, um hiermit eine Zelle mit mehreren Temperaturzonen darstellen zu können. Die Parallelschaltung ist schematisch in der folgenden Abbildung dargestellt.

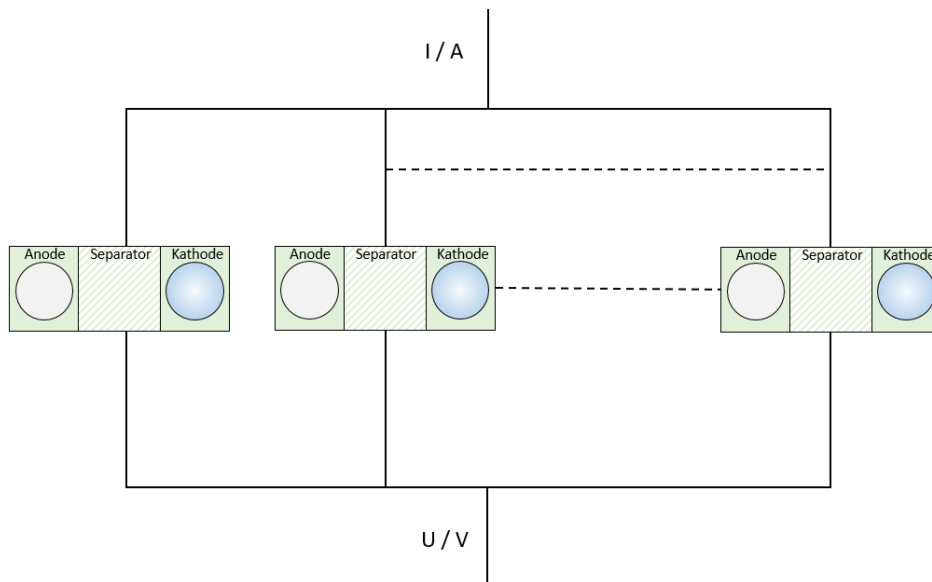


Abbildung 7: Schematische Darstellung der modellhaften Parallelschaltung

Jedem einzelnen Batteriemodell kann hierbei eine Temperatur hinterlegt werden, wodurch sich auch die Möglich ergibt, mehr als nur eine heiße Temperaturzone vorzusehen. Nachfolgend sind

Simulationen von Hotspots bei verschiedenen Hotspottemperatur und konstanter Umgebungstemperatur bei 298K, zunächst für Impedanzsimulationen, dargestellt.

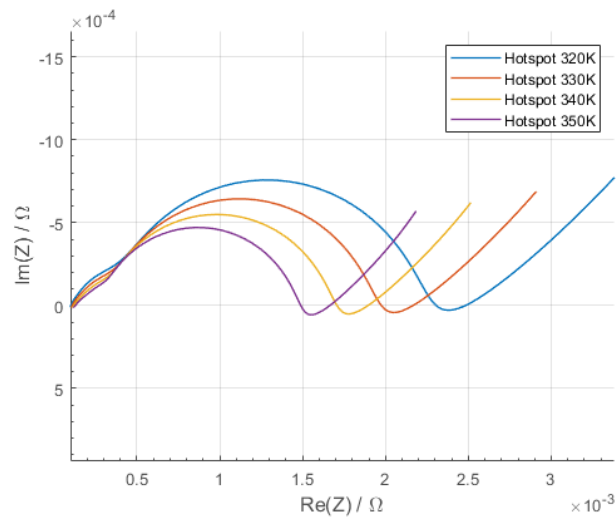


Abbildung 8: Impedanzsimulationen für Hotspots bei verschiedenen Hotspottemperaturen

Eine steigende Temperatur, durch eine Veränderung der Hotspottemperatur, führt immer zu geringeren Widerständen und somit kleineren Impedanzen. Nachfolgend sind analog NFRA Simulationen dargestellt.

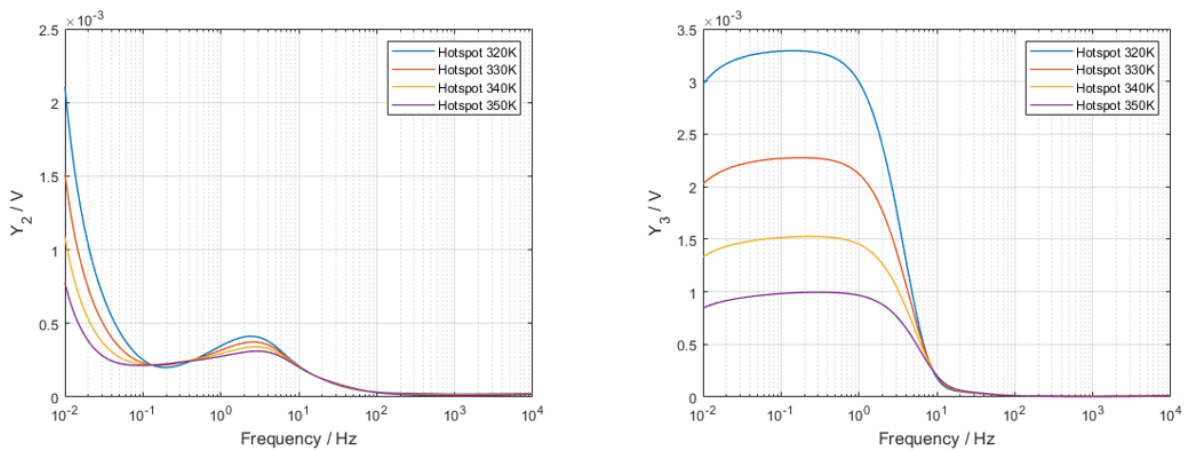


Abbildung 9: NFRA Simulationen für Hotspots bei verschiedenen Umgebungstemperaturen für Y_2 (links) und Y_3 (rechts)

Erneut steigt durch die nichtlineare Anregung der Informationsgehalt drastisch an. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, zwischen der Anregung einzelner Harmonischer zu unterscheiden.

Mit diesen Ergebnissen lässt sich zusammenfassen, dass innerhalb des AP1 ein elektro-chemisches und thermisches Batteriemodell erstellt worden ist. Durch geschicktes Parallelschalten mehrerer Modelle lässt sich eine Hotspotsituation nachvollziehen. Einflüsse können hierbei sowohl bei Impedanz- als

auch NFR-Spektren erkannt werden. Somit wurde ein diagnosefähiges Batteriemodell geschaffen und seitens des AP1 der Meilenstein erfüllt.

1.2. Entwurf eines Diagnosesystems zur Erkennung und zum aktiven Management von Hotspots in Batteriesystemen (InES)

Im Rahmen des zweiten Arbeitspaketes sollen gezielt Hotspot Situation nachgestellt und mit dynamischen Messmethoden vermessen werden. Basis dieses Arbeitspaketes sind in der BLB hergestellte Zellen, sofern nicht anders angegeben im Labor-Pouchzell-Format, mit einer Kapazität von ca. 50 mAh. Als Aktivmaterialien kommen NMC (Kathode) und Graphit (Anode) zum Einsatz. In einem ersten Schritt wird das eigens für das Projekt entworfene Set-Up beschrieben. Dieses ist in der folgenden Abbildung dargestellt.



Abbildung 10: Set-Up zum Erzeugen und Detektieren von Hotspots: Heizstab (links), Wärmebildkamera (rechts)

Die Kastenform des Set-Ups ist aufgrund von Luftströmungen wichtig, bei denen warme Luft von unten nach oben strömt und dadurch das Wärmebild verzerren kann. Die Kastenform minimiert dieses Phänomen auf ein kleines Luftvolumen, wodurch die Strömungen mit der Kamera nicht mehr erkennbar sind. Zum Aufzeichnen des Temperaturspektrums nutzt die Wärmebildkamera Infrarotstrahlung. Um Reflektionen der Infrarotstrahlung an der Oberfläche der Pouchzelle vorzubeugen, wird die Batterie mit schwarzer Acrylfarbe gefärbt.

Der Heizstab wird auf eine Temperatur von 50°C erwärmt und das Set-Up wird bei 25°C in einen Temperaturschrank platziert. Für die Messungen werden für die Reproduzierbarkeit vier identische Zellen genutzt.

Wie auch schon im ersten Arbeitspaket sollen zunächst Impedanzen bei konstanter, unterschiedlicher Umgebungstemperatur gemessen werden.

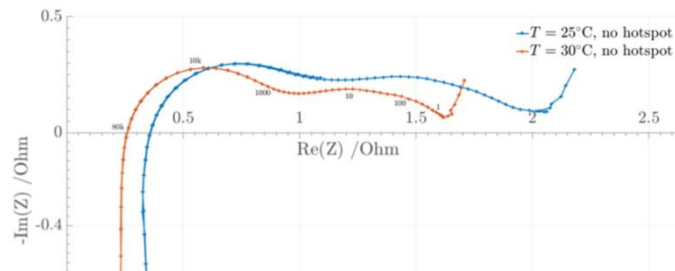


Abbildung 11: Impedanzmessungen bei konstanter Umgebungstemperatur

Wie erwartet werden die Widerstände und somit die Impedanzen bei höheren Temperaturen kleiner. In einem nächsten Schritt wird die Auswirkung der Position des Hotspots auf Impedanz und NFR Spektren untersucht.

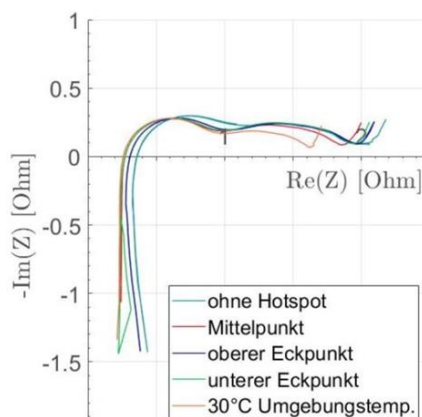


Abbildung 12: Impedanzmessungen für eine Variation der Hotspot Position

Diese Abbildung zeigt die Impedanzspektren der Messungen mit Hotspots an drei verschiedenen Punkten der Zelloberfläche: dem Mittelpunkt, dem oberen Eck- und dem unteren Eckpunkt. Es zeigt sich, dass zwar die Hotspottemperatur einen signifikanten Einfluss auf das Spektrum hat, jedoch die Position des Hotspots kaum identifizierbar ist.

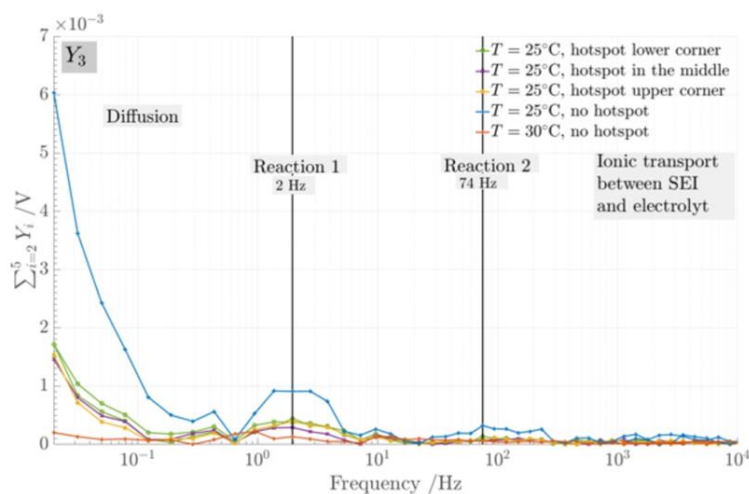


Abbildung 13: NFRA Spektren für eine Variation der Hotspot Position

Mit Hilfe von NFRA kann die dynamische Analyse auf Nichtlinearitäten erweitert werden. Der Vergleich mit den EIS-Spektren ermöglicht es, den NFR-Spektren die entsprechenden charakteristischen Bereiche zuzuordnen. Abbildung 13 zeigt diese Bereiche zusammen mit den Ergebnissen der dynamischen Messung für die Summe der Harmonischen. Diese Spektren können analog zu den Impedanzmessungen interpretiert werden.

Der Einfluss der Temperatur ist dabei insbesondere in Bezug auf den Innenwiderstand sowie auf die Impedanz, welche in Frequenzbereich elektrochemischen Reaktionen liegen, signifikant. Daher werden für die Hotspot Diagnose Innenwiderstand und Impedanz der charakteristischen Frequenz der elektrochemischen Reaktion als Kenngrößen verwendet. Es ist jedoch zu beachten, dass die Kenngrößen und Frequenzbereiche in Abhängigkeit der verwendeten Batteriezelle ggf. angepasst werden müssen. Sowohl experimentelle als auch Simulationsergebnisse zeigen darüber hinaus, dass der Einfluss eines Hotspots auf diese Kenngrößen von einer erhöhten mittleren Temperatur nicht unterschieden werden kann. Die Diagnose eines Hotspots setzt also voraus, dass die mittlere Temperatur bzw. das Temperaturprofil im Normalbetrieb bekannt ist. Ist dies der Fall können die erwartenden Werte die Kenngrößen im Normalbetrieb mit den tatsächlichen Kenngrößen verglichen werden. Da ein Hotspot zu einer Abweichung von diesen Normalwerten führt, kann dieser mit Hilfe des Modells identifiziert werden. Diese Möglichkeit der Identifikation ist die Basis für die nachfolgend beschriebene modellbasierte Diagnosemethode.

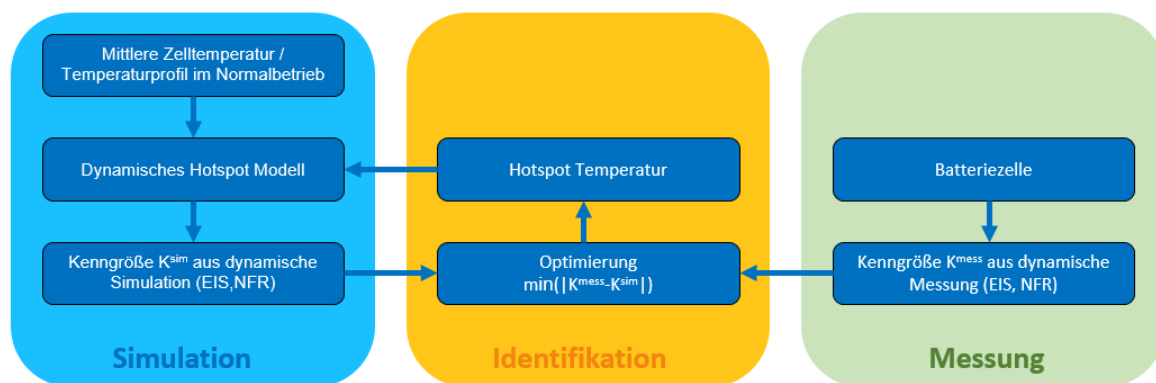


Abbildung 14: Modellbasierte Diagnosemethodik

Die Methodik ist in Abbildung 14 dargestellt. Notwendiger Input für die Diagnose ist (a) die mittlere Zelltemperatur bzw. die Temperaturverteilung im Normalbetrieb sowie (b) die Messung der Kenngrößen im Batteriesystem auf Basis dynamischer Messungen. Mit Hilfe des Optimierungsalgorithmus kann nun eine ggf. vorliegende erhöhte Temperatur in einem Hotspot durch Vergleich der Kenngrößen von Messung und Experiment ermittelt werden.

Abbildung 15 zeigt das Ergebnis der etablierten Diagnosemethodik. Der beschriebene Optimierungsalgorithmus versucht den Unterschied zwischen dem simulierten Impedanzspektrum (blau) und den gemessenen Impedanzen (rot) durch Anpassung der Temperaturen im dynamischen Hotspot Modell zu minimieren. Nach einer definierten Toleranz bricht dann die Optimierungsschleife ab und daraus wird die Hotspottemperatur ermittelt.

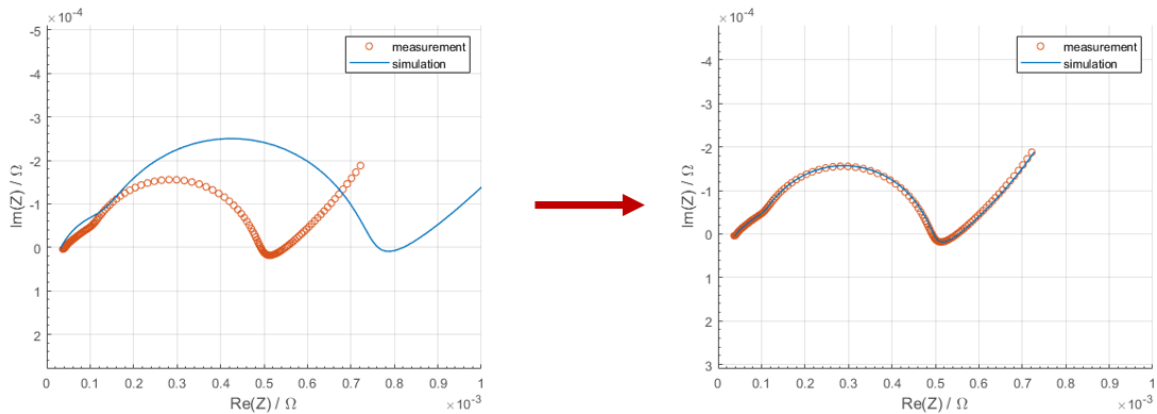


Abbildung 15: Hotspottemperatur Identifikation mittels Optimierungsalgorithmus. Links: vor Optimierung; rechts: nach Optimierung

Mit diesen Ergebnissen lässt sich zusammenfassen, dass innerhalb des AP2 ein funktionsfähiges Diagnosesystem zur Erkennung von Hotspots in Batteriesystemen erstellt worden ist und somit der Meilenstein von AP2 erfüllt wurde.

1.3. AP5: Simulative- und Experimentelle Validierung (IfT)

Die Bereitstellung eines hinreichend exakten Simulationsmodells ist für den Vergleich von experimentellen Werten von entscheidender Bedeutung. Die thermische Modellierung einer Batteriezelle, die für den Einsatz in einem EV vorgesehen ist, stellt aufgrund der hohen Leistungsdichte und damit verbundenen thermischen Belastung einen solchen Fall dar. Die hohen Lade- bzw. Entladeströme führen zu entsprechenden Temperaturerhöhungen. Aufgrund der hohen C-Raten Belastung automobiler Batteriezellen wird für das elektro-thermische Simulationsmodell lediglich die Joule'sche Verlustwärme $\dot{Q}_{loss} = RI^2$ als dominanteste Wärmequelle betrachtet. Das dynamische Verhalten der Zelle wird durch ein State of the Art Thevenin-Modell mit 2 RC-Gliedern abgebildet.

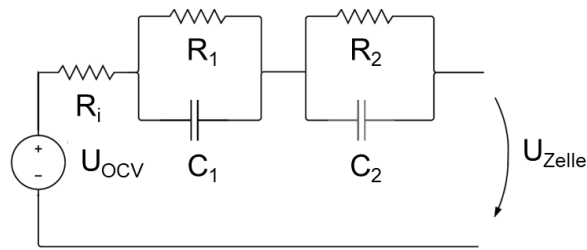


Abbildung 3: Thevenin Modell mit 2-Gliedern zur Abbildung des elektrischen Verhaltens

Im Rahmen des Projekts haben sich die Projektpartner auf die Verwendung von Pouchzellen der Battery LabFactory Braunschweig (BLB) im BLB-2 Format geeinigt. Die Beschaffung dieser knapp 9Ah Zelle ist jedoch mit langen Wartezeiten versehen, so dass für die Validierungsmessungen im vorgesehenen Zeitplan keine Zelle zur Verfügung steht. Die Validierungsmessungen werden anhand einer zur Verfügung stehenden prismatischen Zelle durchgeführt. Die Angabe der Messergebnisse unterliegen der Geheimhaltung, so dass im Folgenden normierte Darstellungen gewählt werden.

Der Versuchsaufbau zur Validierung des Simulationsmodells sieht gut definierte und reproduzierbare Randbedingungen vor. Die Messung erfolgt in einer bei einer definierten Umgebungstemperatur, die durch eine temperierte Kammer eingestellt wird. Die Kühlung der Zelle erfolgt über eine Bodenplatte aus Aluminium. Diese ist mit Wasser-Glykol durchströmt, welches über einen Thermostat bei einer definierten Kühltemperatur gehalten wird, und erzeugt durch ihre große thermische Masse eine nahezu konstante Temperatur über dem Boden der Zelle. Die weiteren Oberflächen der Zelle sind frei mit der Umgebung in Kontakt. Die Wärmeabgabe an diesen Oberflächen erfolgt durch freie Konvektion. Eine gesteigerte thermische Kontaktierung der Batterieunterseite zu der Bodenplatte wird mit Hilfe mechanischer Verspannung sichergestellt.



Abbildung 4: Versuchsaufbau zur Detektion der Temperaturverteilung über einer Batteriezelle mittels diverser Thermoelemente. Die Kühlung über eine mit Wasser-Glykol durchströmte Bodenplatte und durch freie Konvektion an den zur Umgebung in Kontakt liegenden Oberflächen.

Die Detektion des Temperaturprofils erfolgt mithilfe von Thermoelementen, die systematisch auf der Oberfläche der Zelle angeordnet sind. Abbildung 5 zeigt die für die Validierung ausgewählten Messstellen und deren Position an der Zelle. Abbildung 6 zeigt die schematische Darstellungen der Wicklungen im Inneren einer prismatischen Zelle in der Draufsicht.

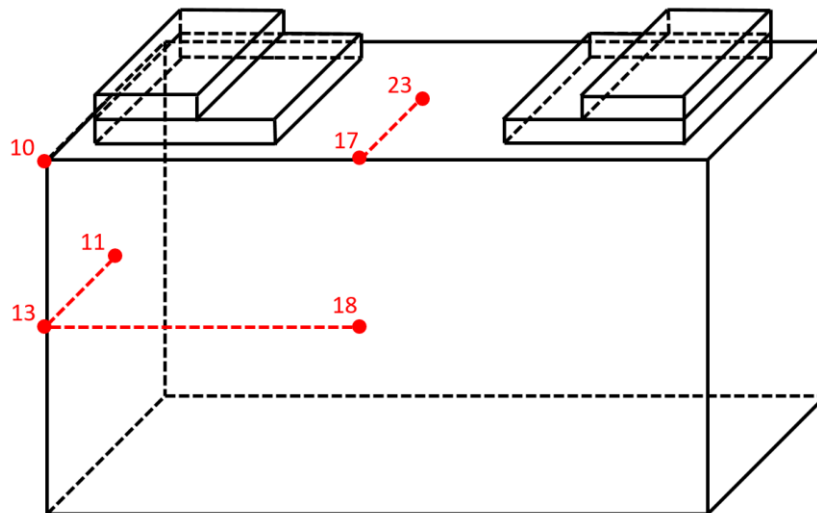


Abbildung 5: Position und Nummer der Thermoelemente auf der Batterieoberfläche zur Detektion der Temperaturverteilung

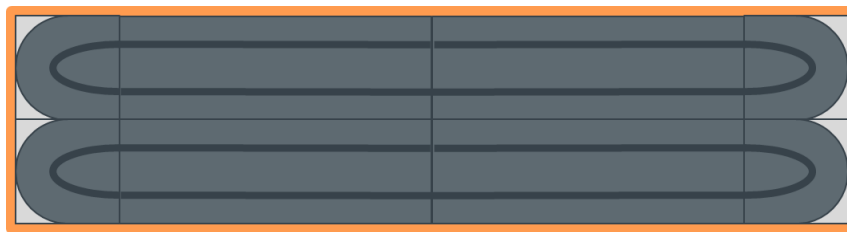


Abbildung 6: Schematische Darstellung der Wicklungen im Inneren einer prismatischen Zelle in der Draufsicht

Abbildung 7 zeigt das zur Validierung eingesetzte Stromprofil. Die Zelle wird mit diesem definierten Stromprofil beaufschlagt, welches die Zelle in unterschiedlichen Perioden lädt und entlädt. Die unterschiedlich ausgeprägten Periodendauern sind geeignet, um das dynamische Verhalten der Zelle zu erkennen und dieses im Simulationsmodell nachzubilden.

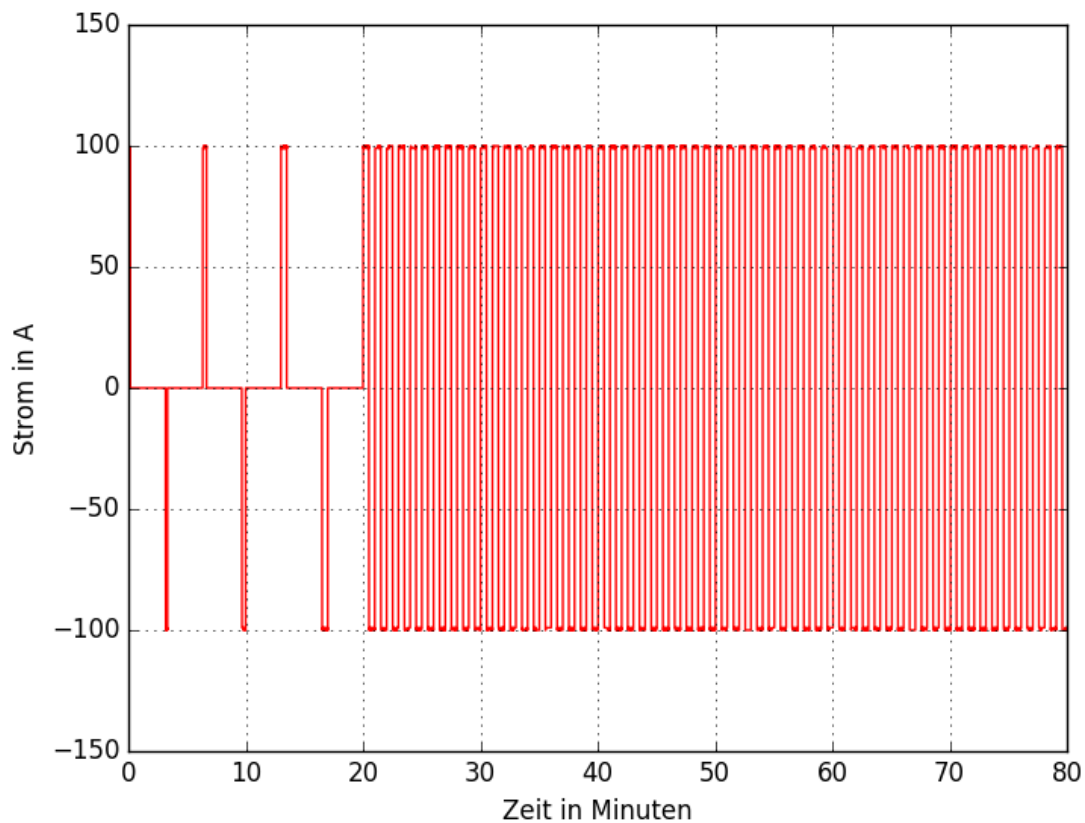


Abbildung 7: Stromprofil zur Identifikation der dynamischen und stationären Betriebszustände der Batteriezelle

Für die Darstellung der Temperaturverläufe wird eine normierte Darstellung von Temperaturdifferenzen gewählt. So ist es einerseits nicht möglich auf die tatsächlichen Messwerte zu schließen, jedoch wird gleichzeitig deutlich, wie das Simulationsmodell die Messungen bei bekannten Randbedingungen (Umgebungs- und Kühltemperatur) widerspiegelt.

$$T(t)_{Norm} = \frac{T(t) - T_{Umgebung}}{T_{Bodenplatte}}$$

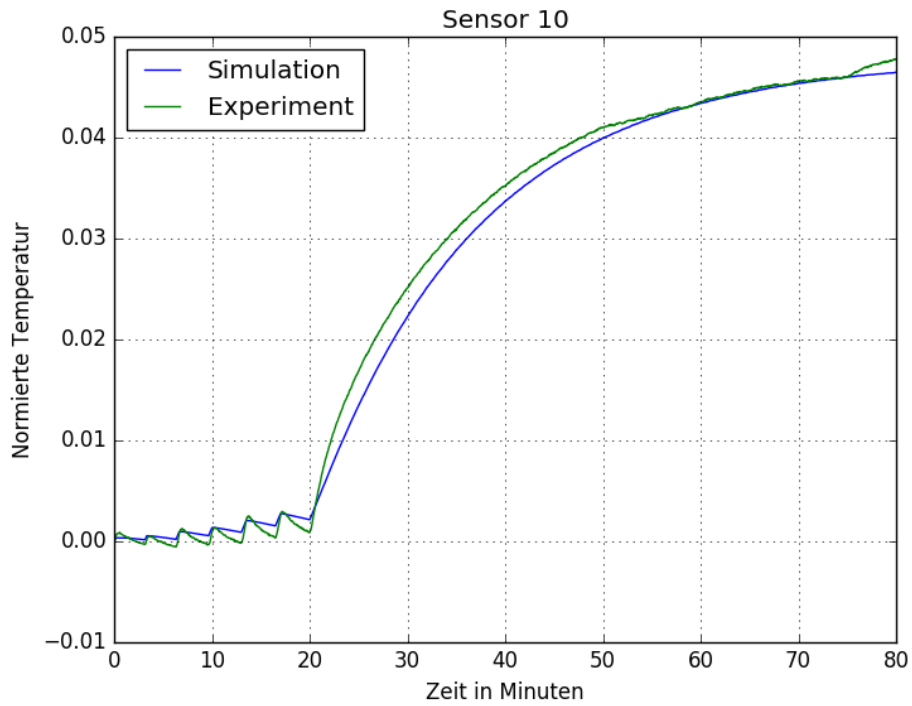


Abbildung 8: Vergleich des Verlaufs an Sensor Nummer 10 der dimensionslosen normierten Temperatur von Simulationsmodell und Experiment

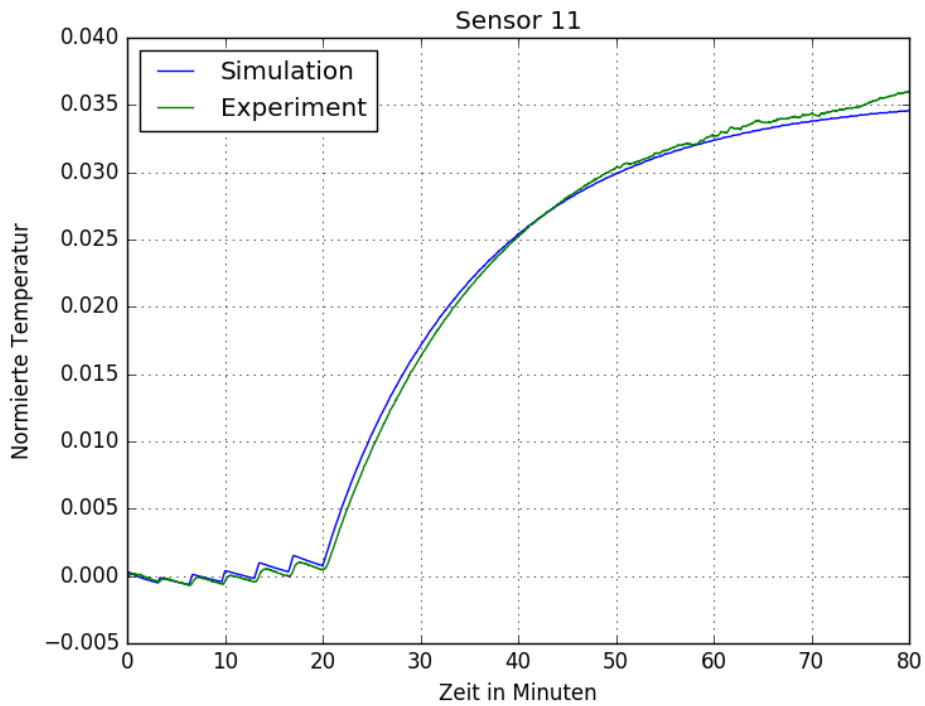


Abbildung 9: Vergleich des Verlaufs an Sensor Nummer 11 der dimensionslosen normierten Temperatur von Simulationsmodell und Experiment

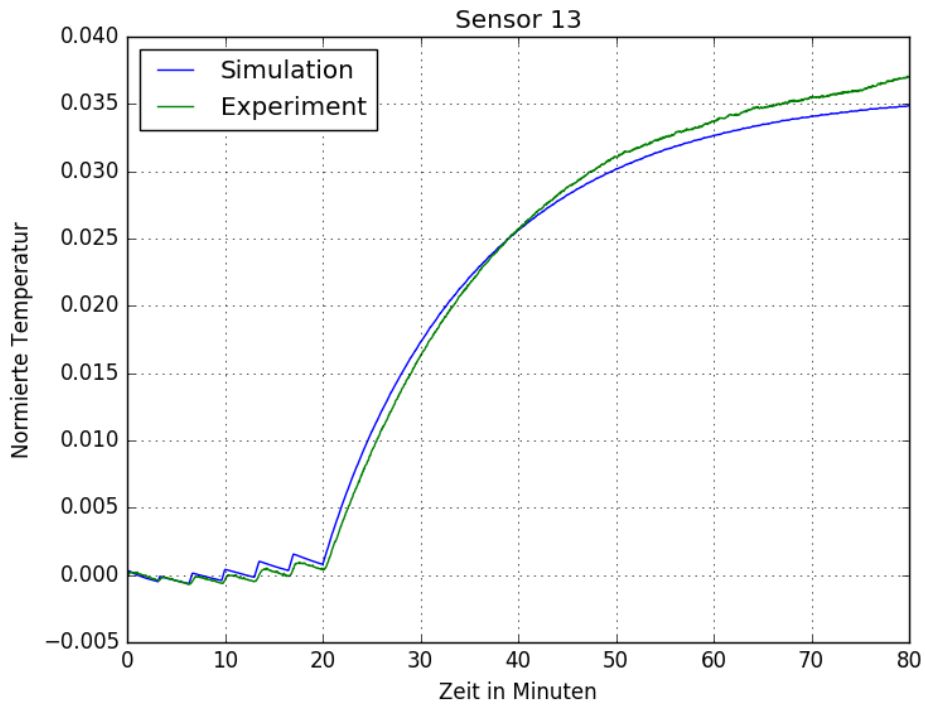


Abbildung 10: Vergleich des Verlaufs an Sensor Nummer 13 der dimensionslosen normierten Temperatur von Simulationsmodell und Experiment

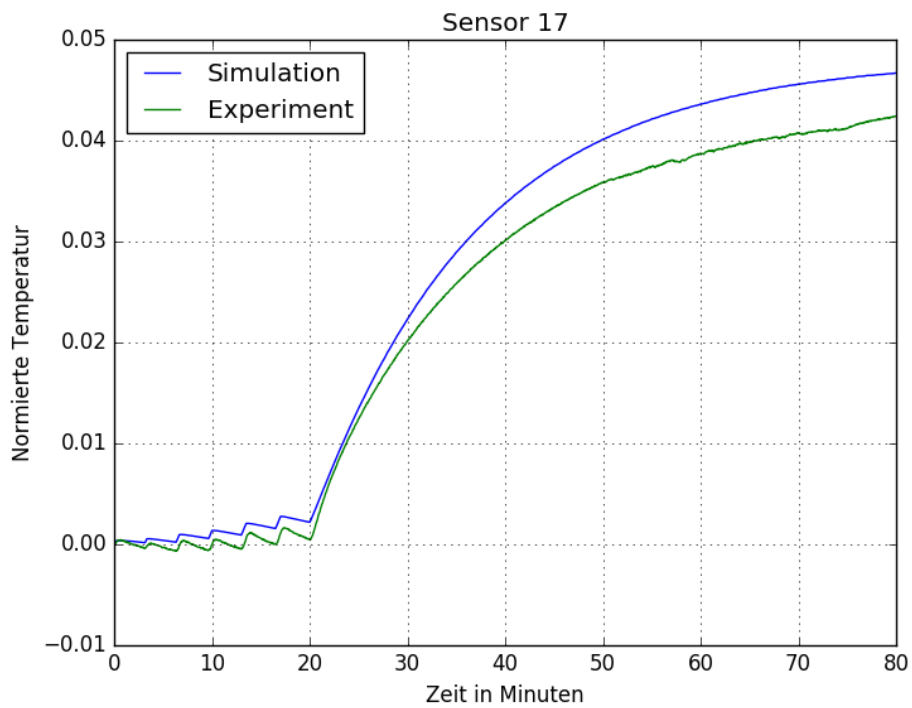


Abbildung 11: Vergleich des Verlaufs an Sensor Nummer 17 der dimensionslosen normierten Temperatur von Simulationsmodell und Experiment

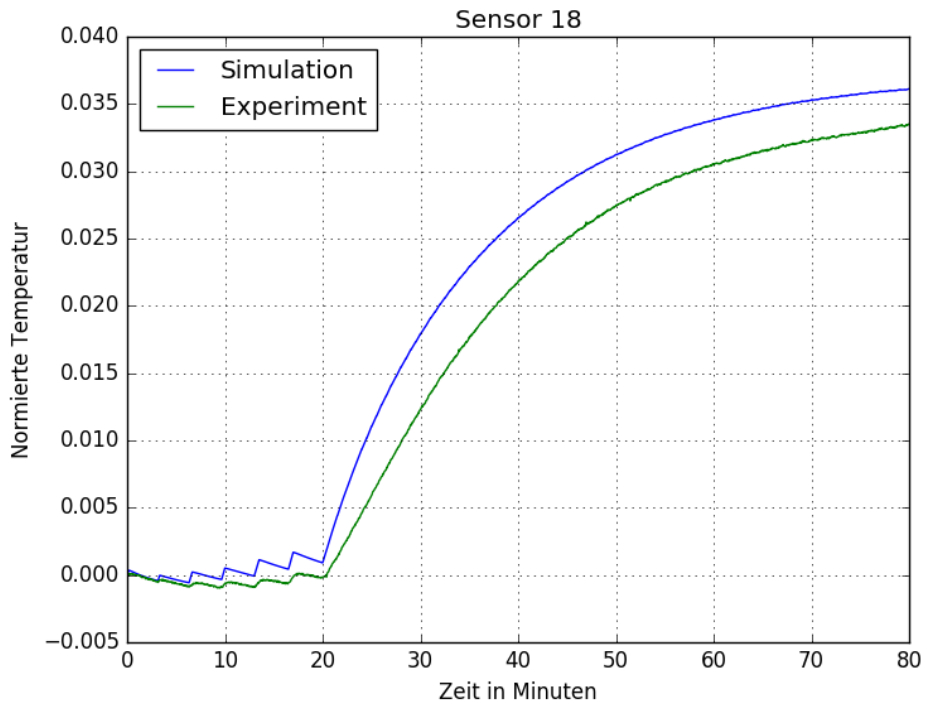


Abbildung 12: Vergleich des Verlaufs an Sensor Nummer 18 der dimensionslosen normierten Temperatur von Simulationsmodell und Experiment

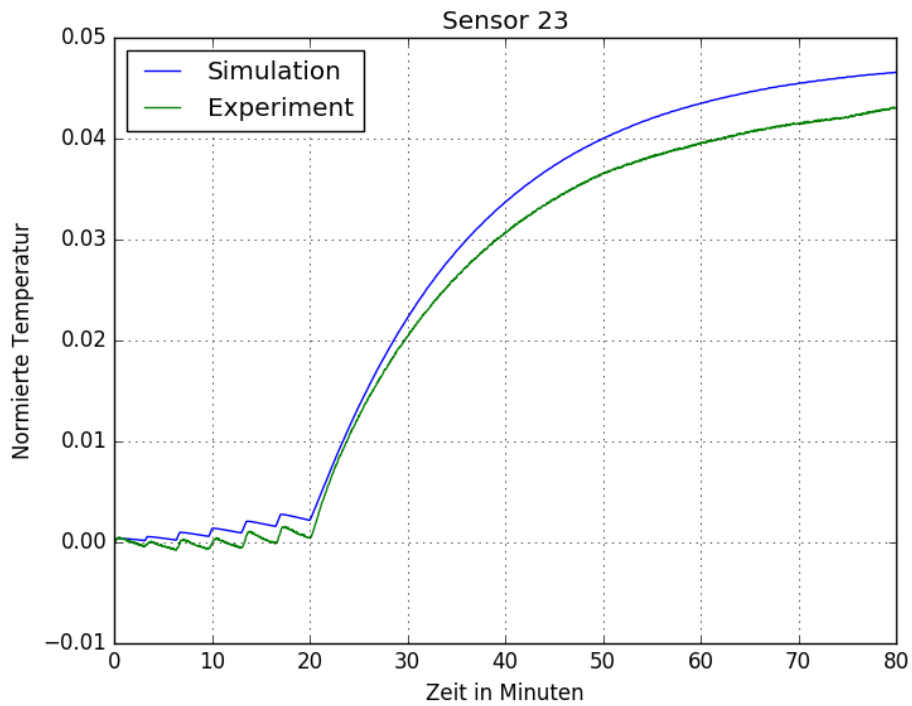


Abbildung 13: Vergleich des Verlaufs an Sensor Nummer 23 der dimensionslosen normierten Temperatur von Simulationsmodell und Experiment

Bei den dynamischen Verläufen entsprechend Abbildung 8 bis Abbildung 10 wird ersichtlich, dass die Sensoren 10, 11, 13 an den Oberflächen der kurzen Kantenlänge (entspricht den Oberflächen mit der Wicklung) eine sehr gute Übereinstimmung sowohl in Bezug auf den dynamischen Verlauf, der durch die thermischen Massen dargestellt wird, als auch auf die stationäre Endtemperatur erreicht. Die Sensoren 17, 18, 23, entsprechend Abbildung 11 bis Abbildung 13, die in der Mittelebene der Zelle positioniert sind, weisen dagegen eine geringe Abweichung in Bezug auf die stationäre Endtemperatur auf. Es ist davon auszugehen, dass die thermische Anbindung der Wicklung im Inneren der Zelle an diesen Stellen nicht dem Modell entspricht. Eine weitere Anpassung der Messergebnisse kann ohne Kenntnis der tatsächlichen thermischen Anbindung nicht modelliert werden. Die Validierung wird jedoch aufgrund der zur Verfügung stehenden Daten als hinreichend bewertet.

1.4. AP7: Zusammenstellung eines Gesamt-E-Fahrzeugmodells und Abbildung realer Fehlerfälle (IfT)

Komponenten des modularen Gesamtfahrzeugmodells

Für die späteren Model- und Hardware-in-the-Loop Untersuchungen des im Projektverlauf zu

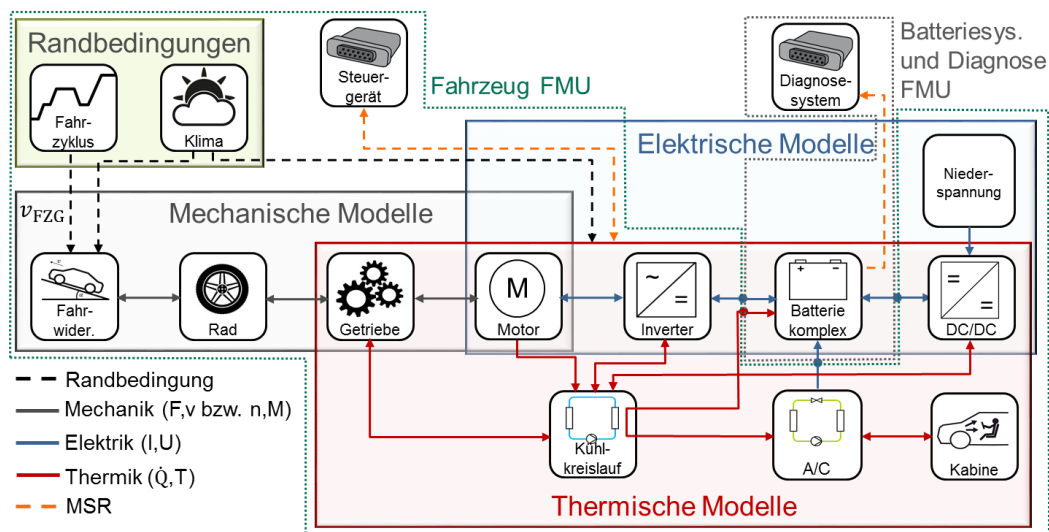


Abbildung 14: Modular aufgebautes Gesamtfahrzeugmodell mit definierten physikalischen Schnittstellen zwischen den einzelnen Teilmodellen und Schnittstellen zu dem komplexen Batteriesystem- und Diagnosemodell.

entwickelnden Batteriesystem- und Diagnosemodells wurde ein flexibles Gesamtfahrzeugmodell in Modelica/Dymola aufgebaut. Die Struktur des Gesamtfahrzeugmodells mit den einzelnen Teilmodellen ist in Abbildung 14 dargestellt. Es besteht aus ca. 13 Teilmodellen, die überwiegend über physikalische Schnittstellen miteinander kommunizieren. Die vier grundlegenden physikalischen Schnittstellen mit ihren jeweiligen Austauschgrößen sind:

- Mechanische Verbindung: Kraft und Weg bzw. Drehmoment und Drehwinkel
- Elektrische Verbindungen: Strom und Spannung

- Thermische Verbindungen: Wärmestrom und Temperatur
- Fluidverbindungen: Massenstrom, Druck, spezifische Enthalpie und Zusammensetzung

Die mechanischen und elektrischen Komponenten des Antriebsstrangs bestehend jeweils aus flexibel auswählbaren Teilmodellen für die jeweiligen Verluste sowie einem thermischen Netzwerk. Dadurch können prinzipiell die Temperaturen der Komponenten in Abhängigkeit der eingetragenen Verlustleistung sowie Wärmeabgabe an das Kühlsystem und/oder die Umgebung ermittelt und wiederum als Eingangsgröße für temperaturabhängige Verlustmodelle verwendet werden, wie in Abbildung 15 schematisch dargestellt.

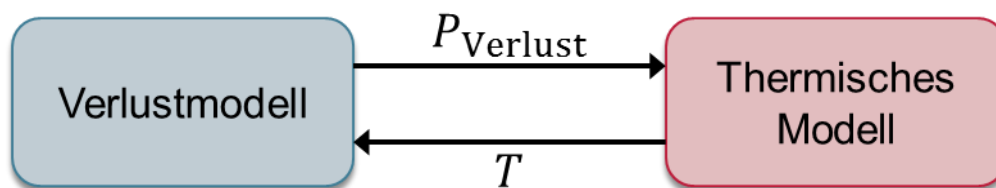


Abbildung 15: Schematische Darstellung der Kopplung der Teilmodelle der Verlustleistungsberechnung sowie des thermischen Netzwerk für die mechanischen und elektrischen Komponenten des Antriebsstrangs.

Die Verlustleitungen der Antriebsstrangkomponenten werden derzeit überwiegend über konstante mittlere Komponentenwirkungsgrade bestimmt sowie einfache Punktmassenmodelle als thermische Netzwerke verwendet, da diese Komponenten nicht im Fokus der Untersuchungen stehen.

Kühl- und Kältekreislauf des modularen Gesamtfahrzeugmodells

Zur Untersuchung von Thermomanagementmaßnahmen wurde ein beispielhaftes Kühlsystem, bestehend aus einem separaten Elektronik Kühlkreislauf sowie Batteriekühlkreislauf aufgebaut. Der Kühlluftmassenstrom an den Kühlen wird über eine Kennlinie in Abhängigkeit von Fahrzeuggeschwindigkeit und Lüfterdrehzahl vorgegeben. Als Klimaanlage wurde eine typische R134a-Anlage mit zusätzlichem Chiller für die aktive Batteriekühlung modelliert. Beide Systeme sind in Abbildung 16 dargestellt.

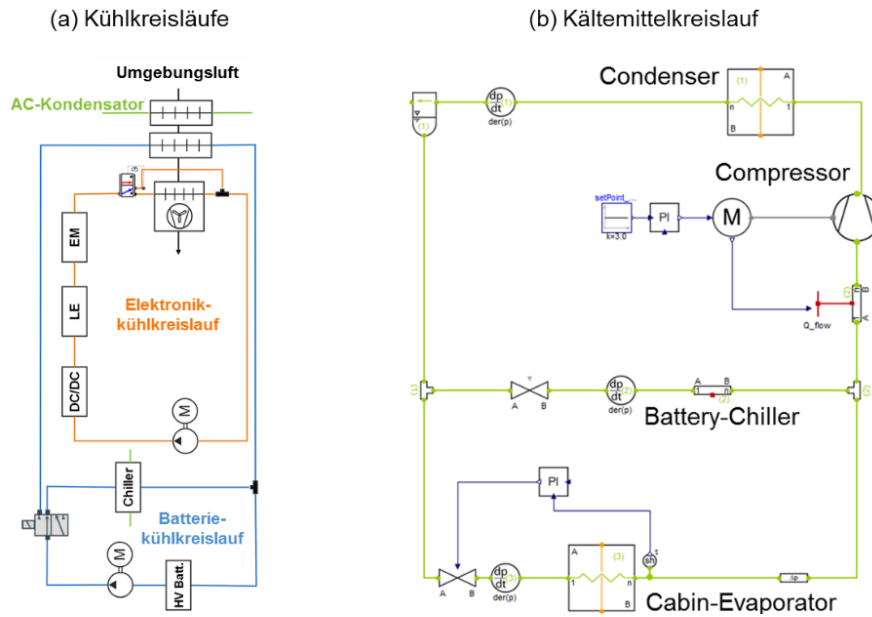


Abbildung 16: Beispielhaft aufgebaute Verschaltung von Kühlsystem und Kältemittelkreislauf.

Verifizierung Batteriemodell im Gesamtfahrzeugkontext

Abbildung 17 zeigt ein Auszug des Ergebnisses einer mit dem aufgebauten Modell durchgeführten Gesamtfahrzeugsimulation unter Verwendung eines vereinfachten Batteriesystemmodells. Das Fahrzeugmodell ist bedatet für einen Kleinwagen und durchfährt einen WLTP-Zyklus bei 20 °C Umgebungstemperatur.

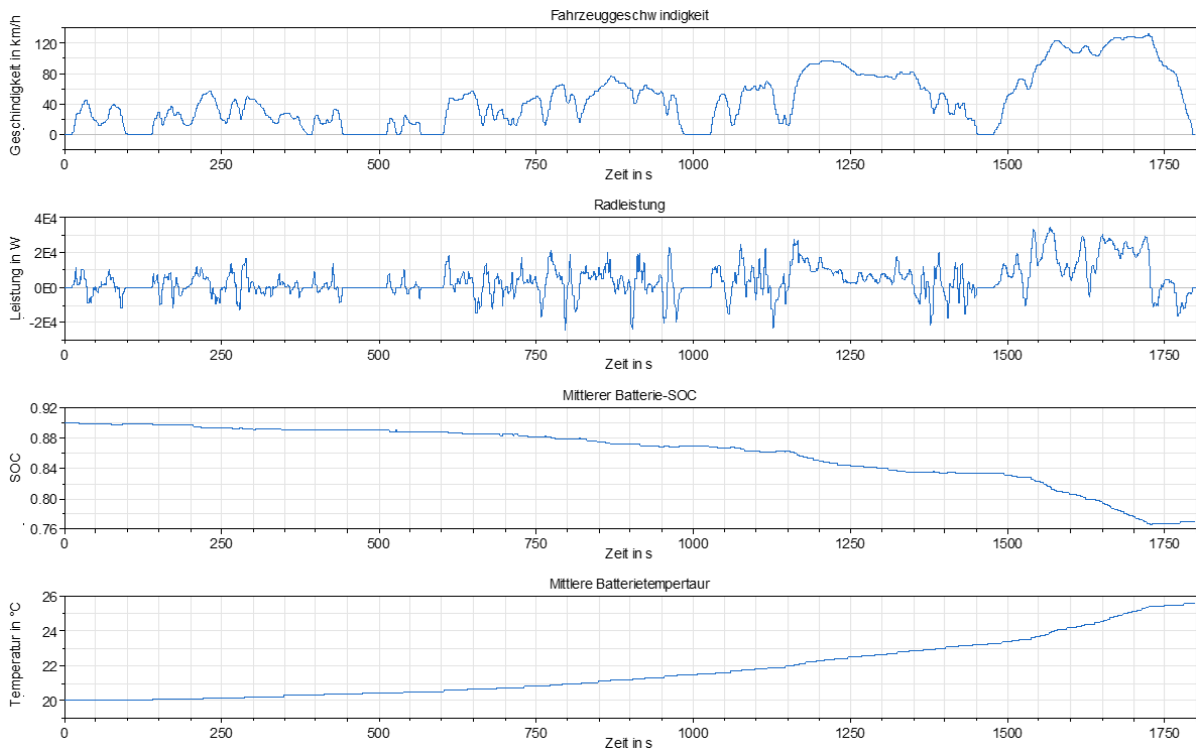


Abbildung 17: Beispielhaftes Ergebnis der Radleistung, mittlerer Batterie-SOC und mittlere Batterietemperatur bei durchfahren eines WLTP bei 20 °C Umgebungstemperatur für eine Bedatung eines Kleinwagens.

Die einzelnen Teilmodelle des Gesamtfahrzeugmodells können als FMU exportiert und beispielsweise mit dem detaillierten Batteriesystem- und Diagnosemodell gekoppelt werden.

1.5. AP7: Zusammenstellung eines Gesamt-E-Fahrzeugmodells und Abbildung realer Fehlerfälle (InES)

In diesem Arbeitspaket wird das angefertigte Diagnosemodell als Functional-Mock-Up Unit (FMU) in das Gesamtfahrzeugmodell integriert. Dafür muss das Diagnosemodell von MATLAB in Dymola über Simulink umwandeln werden.

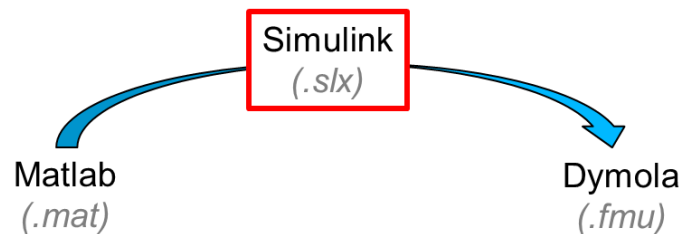


Abbildung 16: Umwandlungsschritte von Matlab zu Dymola

Zur Aufstellung des Diagnosemodells in Simulink werden folgende Vereinfachungen getroffen:

Das Diffusionsprozess wird nicht berücksichtigt.

Die numerische Diskretisierung beschränkt sich auf 1 Element.

Impedanzsimulation wird bei einer Frequenz ggf. 10 Hz durchgeführt.

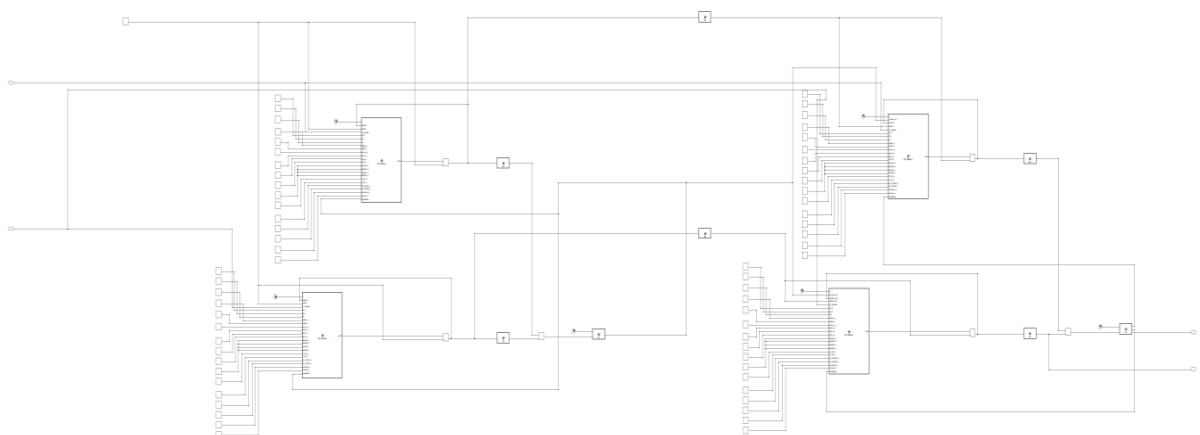


Abbildung 17: vereinfachtes Diagnosemodell in Simulink

Die Abbildung 18 stellt die Simulationsergebnisse mit einer Hotspottemperatur von 350K und einer Betriebstemperatur von 320K dar. Zwischen dem vollständigen Modell in Matlab und dem vereinfachten Modell in Simulink ist eine gewisse Abweichung in der simulierten Impedanz bei 10 Hz ersichtlich, z.B. die realen und imaginären Impedanzen vom vereinfachten Modell ist jeweils um 0,2 mOhm niedriger als die vom vollständigen Modell in Matlab. Diese Abweichung stammt vermutlich aus der Vernachlässigung des Diffusionsprozesses in die Hotspotsimulation und daraus resultiert eine Unterschätzung der Impedanzen. Allerdings konnte die grundsätzlich Integration des Diagnosesystems in das Gesamtfahrzeug gezeigt werden.

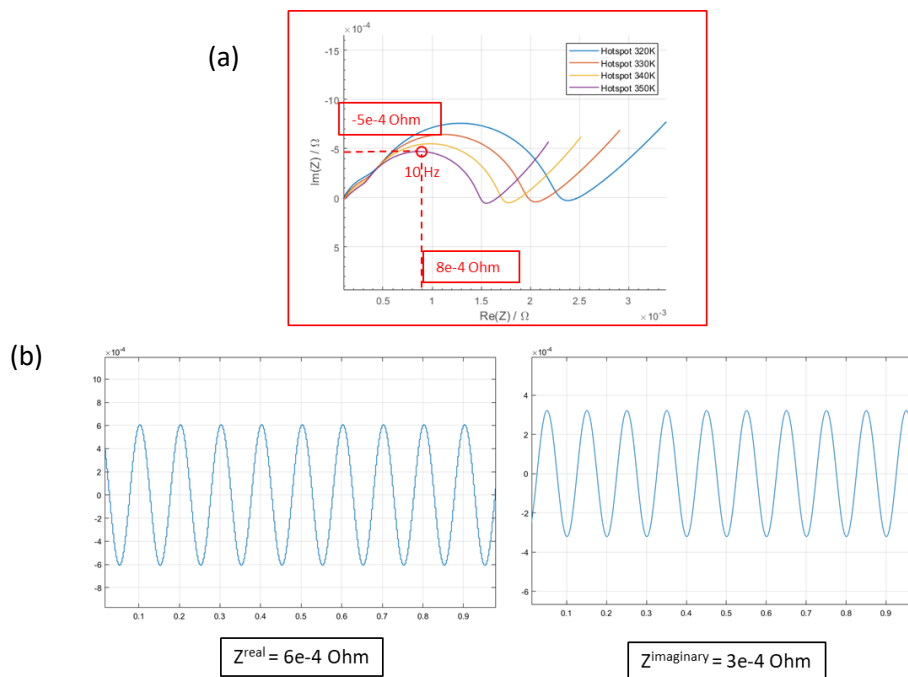
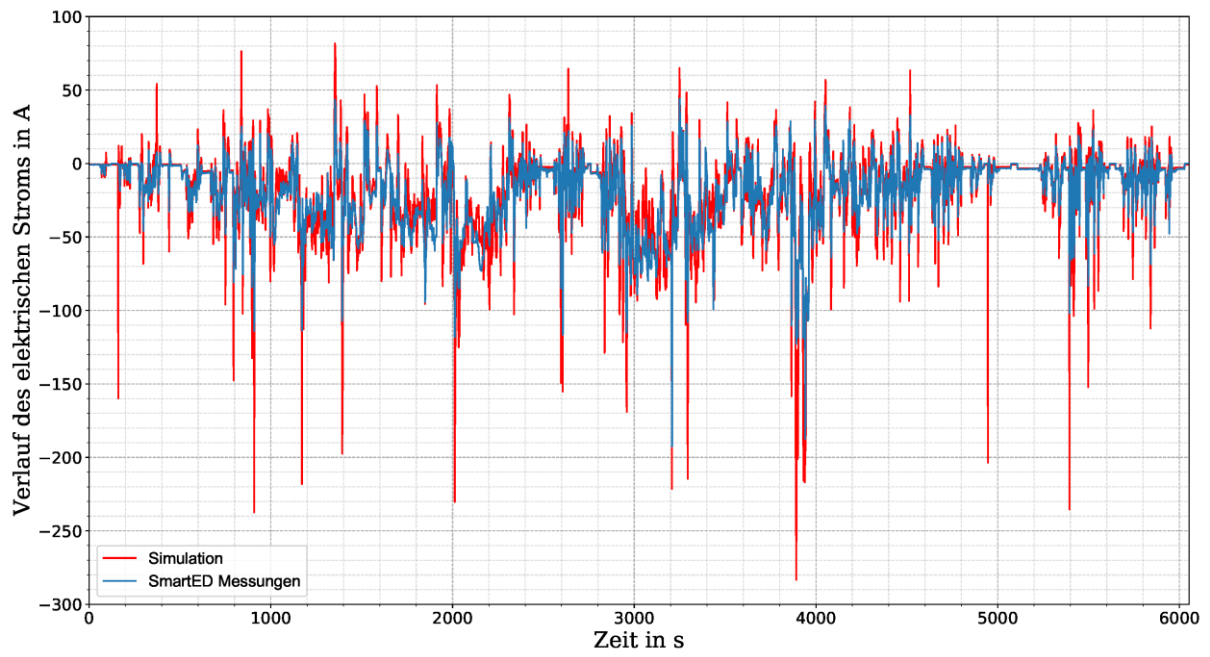
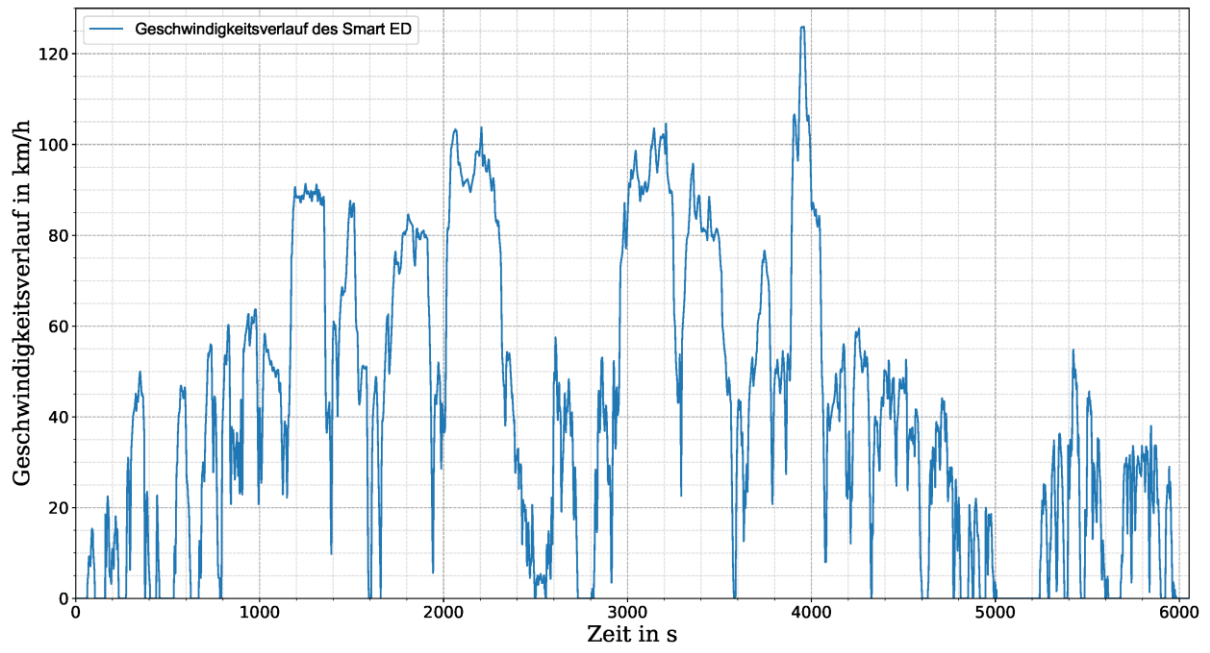


Abbildung 18: Vergleich der Impedanz bei 10 Hz zwischen (a) dem Modell in Matlab und (b) dem vereinfachten Modell in Simulink

1.6. AP8: HiL-System Diagnose/Regelung (IfT) und AP 9: HiL Demonstrator (IfT)

Verifizieren des MiL

Zur Plausibilisierung des Simulationsmodells aus AP7 werden die Messdaten einer vorhergehenden Studie des Fleets-Go-Green Projektes genutzt, bei welcher Realmessungen an einem Smart ED aufgezeichnet worden sind. Der während der Messung aufgenommen Geschwindigkeitsverlauf des Smart ED dient dabei als Soll-Vorgabe des Simulationsmodells.



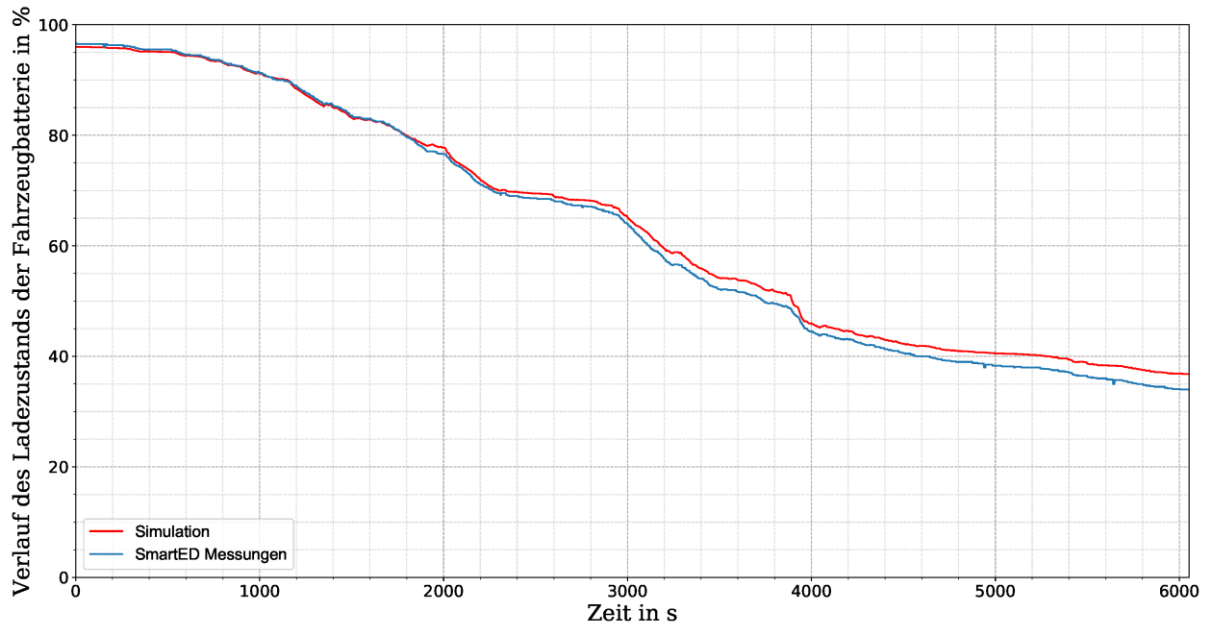


Abbildung 18: Darstellung des Geschwindigkeitverlaufs der Realmessung des Smart ED (obere Abbildung), der Verlauf des elektrischen Stroms des Simulationsmodells in Rot und der Realmessung in Blau (mittlere Abbildung) und der Verlauf des Ladezustands des Simulationsmodells in Rot und der Realmessung in Blau (untere Abbildung).

Beim Vergleich des Lade- bzw. Entladestroms fallen die deutlich ausgeprägteren Peaks bei der Simulation im Vergleich zu den Realmessungen auf. Die Unterschiede lassen sich auf die im Realfahrzeug implementierte ladezustandsabhängige Strombegrenzung zurückführen. Der Verlauf des Ladezustand bzw. State of Charge (SOC) weist mit Rücksicht auf die im Realfahrzeug implementierte Strombegrenzung eine sehr gute Übereinstimmung auf.

HotSpot-Vermeidung – Analyse von Kühlkonzepten

Der Begriff „HotSpot“ kann an dieser Stelle zu einer Ungleichverteilung der Temperatur erweitert werden, welche es aus Alterungs- und Performance- Gründen zu minimieren gilt.

Betriebsstrategien zur Verminderung solcher HotSpots haben entsprechend als Ziel eine Temperaturgleichverteilung einzustellen bei gleichzeitig akzeptabler mittlerer Betriebstemperatur. Dies ist bei gegebener Topologie durch die Anpassung der abführbaren Verlustwärme nur in definierten Grenzen möglich. Die Anpassung der Kühlfluid Vorlauftemperatur oder des Volumenstroms bzw. des damit gekoppelten Wärmeübergangskoeffizienten technische Grenzen begrenzt: So begrenzt eine minimal zulässige Kühlfluidtemperatur und eine Maximalpumpenleistung die maximal mögliche Abfuhr an Abwärme. Die Sensitivitätsanalyse der drei Größen gibt Aufschluss über den Flaschenhals zur Einstellung einer Temperaturgleichverteilung in den Batteriezellen. *Abbildung 19* zeigt das Verhältnis von Wärmeleitwiderstand R_{th} und Wärmeübergangswiderstand R_s

gegeben durch die Biot-Zahl $Biot = \frac{R_{th}}{R_s}$ in Abhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizienten. Mit zunehmendem Wärmeübergangskoeffizienten sinkt der Wärmeübergangswiderstand, der Flaschenhals verlagert sich immer weiter zur Reduzierung des Wärmeleitwiderstandes im Festkörper.

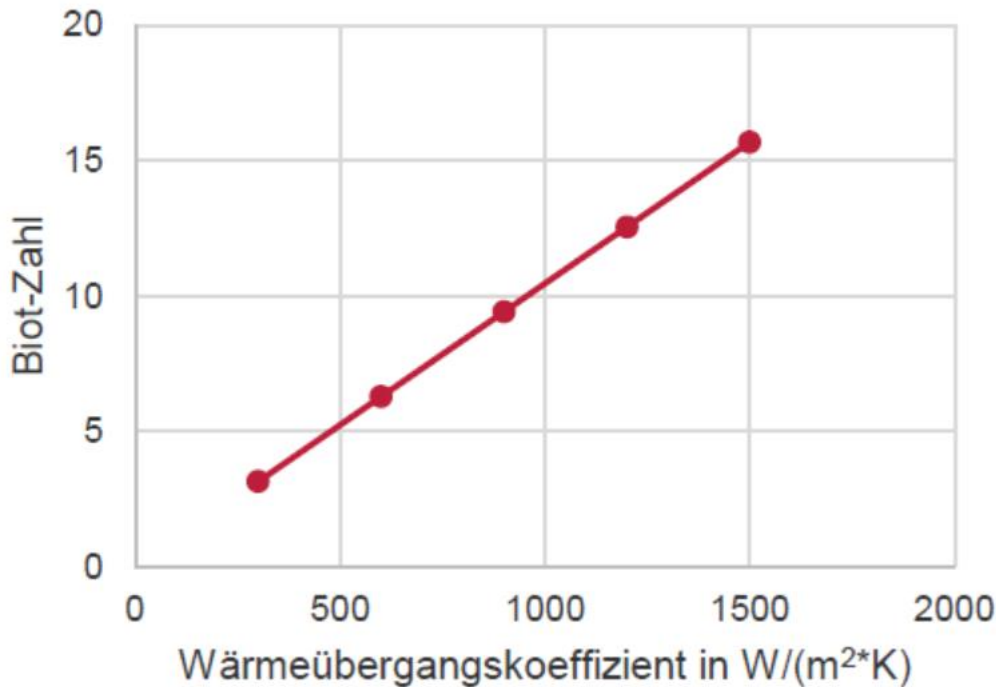


Abbildung 19 Verhältnis von Wärmeleitwiderstand und Wärmeübergangswiderstand gegeben durch die Biot-Zahl in Abhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizienten

Die modulare Struktur des Gesamtfahrzeugmodells ermöglicht ebenfalls schnelle Anpassungen des Batterie-Thermomanagements an die anliegende Leistungsklasse. Eine solche Anpassung wird an dem Austausch modularer Batteriekühlungskonzepte vorgestellt. Dabei werden drei Kühlungen miteinander verglichen, die eine „HotSpot“ Entstehung bereits konstruktiv minimieren sollen. Dabei wird die Kühlung über aktiv durchströmte Spacer zwischen jeder Batteriezelle und über eine Bodenplatte, die einmal längs und einmal quer durchströmt ist, entsprechend Abbildung 20 realisiert. Untersucht wird der Einfluss der Kühlkonzepte hinsichtlich der Eignung zur Senkung der mittleren Modultemperatur (T) und zur Senkung der Temperaturunterschiede zwischen den Batteriezellen im Modulverbund (ΔT) und zwischen den Batterien selbst ($\Delta \Delta T$). Diese Größen stellen die Inputs für das Diagnosesystem aus AP2 dar.

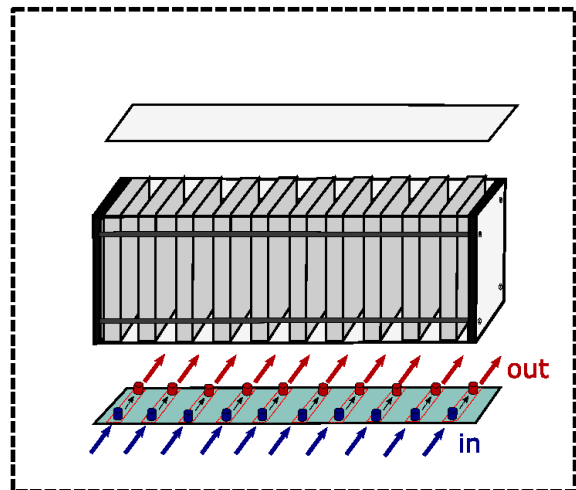
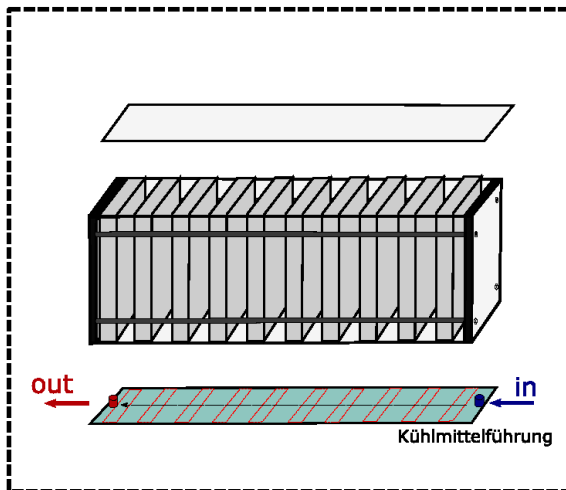
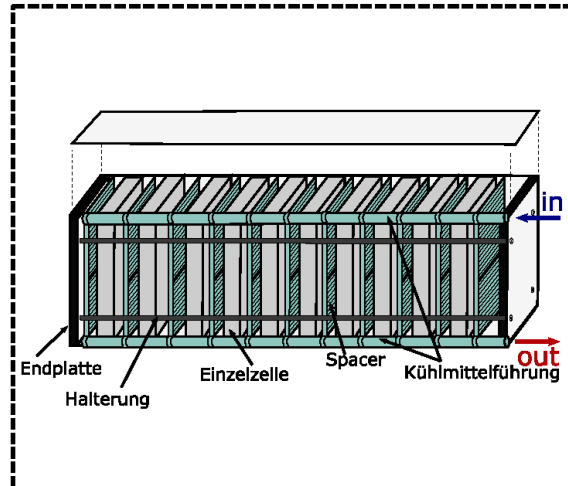


Abbildung 20: Schematische Darstellung eines Batteriemoduls bestehend aus 10 Einzelzellen mit unterschiedlichen Kühlmaßnahmen: Obere Abbildung: Aktiv durchströmte Spacer-Elemente. Linke Abbildung: Längs durchströmte Bodenplatte. Rechte Abbildung: Quer durchströmte Bodenplatte.

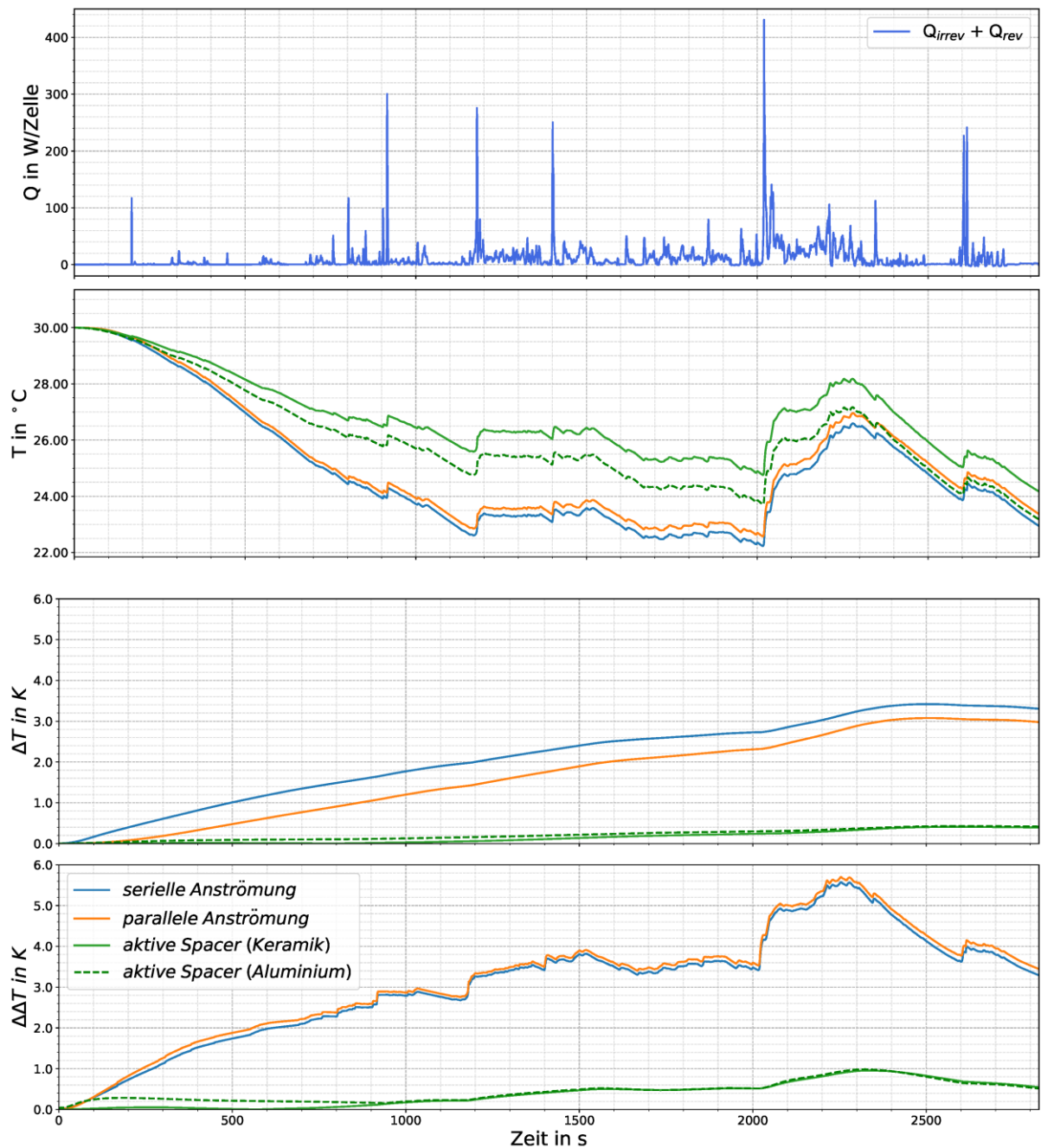


Abbildung 21: Verlauf des infolge der Zellwiderstände auftretenden Wärmeverlusts (erste Abbildung) sowie Darstellung der mittleren Batterietemperatur (zweite Abbildung), der maximalen Temperaturdifferenz über den Batterien im Modulverbund (dritte Abbildung) und der maximalen Temperaturdifferenz der Batteriezellen (vierte Abbildung) der drei Kühlstrategien.

Alle Maßnahmen tragen zur Reduzierung der mittleren Modultemperatur der Batteriezellen im Modulverbund bei. Aufgrund der größeren Leitungsquerschnitte und des daraus resultierenden höheren Kühlmassenstrom bei der Durchströmung der Bodenplatte entsteht eine stärkere Reduzierung der Maximaltemperaturen im Modulverbund. Dagegen erzeugt die Spacer Konfiguration

eine erhebliche Reduzierung der Temperaturdifferenzen sowohl über den Modulverbund, als auch über die einzelnen Zellen selbst.

Nutzen und Verwertbarkeit

Neben zahlreichen studentischen Abschlussarbeiten wurden die folgenden Veröffentlichungen während der Bearbeitung des Projekts veröffentlicht:

- Steeb, M.; Flieger, B.; Tegethoff, W.; Köhler, J.: *Avoiding Thermal Hotspots in Automotive Battery Systems using a Multiscale Full Vehicle Model*. 16th Symposium on Modeling and Experimental Validation of Electrochemical Energy Technologies, Braunschweig, 12.-13. March 2019.
- Wolff, N.; Krewer, U.; Bessler, W.: *Nonlinear Dynamic Process Characterization of Lithium-Ion Batteries. A Model-Based Approach*. Dissertation Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig 2019
- Harting, N.; Schenkendorf, R.; Wolff, N.; Krewer, U.: *State-of-Health Identification of Lithium-Ion Batteries Based on Nonlinear Frequency Response Analysis: First Steps with Machine Learning*. Applied Sciences, 8(5): 821. 2018.
- Harting, N.; Krewer, U.; Schröder, U.: *Nonlinear frequency response analysis of lithium-ion batteries*. Dissertation Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig 2019
- Ulrike Krewer, Nina Harting, Nicolas Wolff: *Diagnosing Li Ion Battery Health with Nonlinear Frequency Response Analysis*, AABC europe, Strasbourg, Jan. 31, 2019
- N. Harting, N. Wolff, F. Röder, U. Krewer: *Comparisons of Ageing and Temperature Impacts on Nonlinear and Linear Dynamic Responses of Lithium-ion Batteries*, 232nd ECS Meeting, Washington DC, 1.-5. Oktober, 2017
- N. Wolff, N. Harting, M. Heinrich, F. Röder, Ulrike Krewer: *A Nonlinear Model-Based Study for Dynamic-Steady-State Process Identification on Lithium-Ion Batteries*, 232nd ECS Meeting, Washington DC, 1.-5. Oktober, 2017

Weiter werden die Ergebnisse zur Fertigstellung der Disseratation von Michael Steeb und zur Weiterführung der Forschungsbereiche am IfT und InES verwendet.

Literatur

- [Andre et al. 2011] Andre D., Meiler M., Steiner K., Wimmer Ch., Soczka-Guth T., Sauer D.U., Characterization of High-Power Lithium-Ion Batteries by Electrochemical Impedance Spectroscopy. I. Experimental investigation, *J. Power Sources* 196 (2011), 5334-5341
- [Blochwitz et al. 2011] T. Blochwitz, M. Otter, M. Arnold, C. Bausch, C. Clauß, H. Elmqvist, A. Junghanns, J. Mauss, M. Monteiro, T. Neidhold, D. Neumerkel, H. Olsson, J.-V. Peetz, S. Wolf, The Functional Mockup Interface for Tool independent Exchange of Simulation Models, In: Proceedings of the 8th International Modelica Conference, Dresden, März 2011
- [Campion et al. 2005] Campion, C., Li, W., Lucht, B., Thermal Decomposition of LiPF₆-Based Electrolytes for Lithium-Ion Batteries, *J. Electrochemical Society* 152 (2005) A2327-A2334
- [DaLion] Data-Mining in der Produktion von Lithium-Ionen Batteriezellen. <https://blogs.tu-braunschweig.de/presseinformationen/?p=10012>, abgerufen am 02.03.2016
- [Dymola] <http://www.3ds.com/products-services/catia/products/dymola>
- [Geeni] Graduiertenkolleg Energiespeicher und Elektromobilität Niedersachsen. <https://www.tu-braunschweig.de/forschung/zentren/nff/geeni>, abgerufen am 02.03.2016
- [Gräber 2014] Gräber, M.: Energieoptimale Regelung von Kälteprozessen, Dissertation, Technische Universität Braunschweig 2014
- [Gräber et al. 2012] Gräber, M.; Kirches, C.; Scharff, D.; Tegethoff, W.: Using Functional Mock-up Units for Nonlinear Model Predictive Control, In: Proceedings of the 9th International Modelica Conference, München, September 2012
- [GT] <https://www.gtisoft.com/gt-suite/gt-suite-overview>, abgerufen am 02.03.2016
- [IKEBA], Integrierte Komponenten und integrierter Entwurf energie-effizienter Batteriesysteme (IKEBA). <http://www.iam.kit.edu/awp/ikeba/26.php>, abgerufen am 02.03.2016
- [IntelliBat] Intelligente und effiziente Batteriesysteme für die E-Mobilität von morgen. BMBF Projektsteckbrief
- [KBA 2015] Kraftfahrt-Bundesamt. Bestand am 1. Januar 2015 nach Umwelt-Merkmalen. http://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/Umwelt/umwelt_node.html, abgerufen am 02.03.2016
- [Krewer et al. 2006] Krewer, U., Christov, M., Vidakovic, T., Sundmacher, K., J., Impedance Spectroscopic Analysis of the Electrochemical Methanol Oxidation Kinetics, *Journal of Electroanalytical Chemistry* 589(1)(2006), 148-159
- [Krewer et al. 2007a] Krewer, U., Kim, H.T., Yoon, H.K., Basic Model for Membrane Electrode Assembly Design for Direct Methanol Fuel Cells, *J. Power Sources* 175 (2007) 760-772
- [Krewer et al. 2007b] Krewer, U., Kamat, A., Sundmacher, K., J., Understanding the Dynamic Behaviour of Direct Methanol Fuel Cells: Response to Step Changes in Cell Current, *Journal of Electroanalytical Chemistry* Volume 609(2)(2007), 105–119
- [Lamp 2013] Lamp, P.: "Anforderungen an Batterien für die Elektromobilität," in *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*, R. Korthauer, Ed, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, pp. 393–415.

[Lee et al. 2015] Lee, C., Bae, S. Lang, M., A Study on Effect of Lithium-Ion Battery Design Variables upon Features of Thermal-Runaway using Mathematical Model and Simulation, J. Power Sources, 293 (2015), 498-510

[Legrand 2014] Legrand, N., Rael, S., Knosp, B. Hinaje, M., Desprez, P., Lapticque, F., Including double-layer capacitance in lithium-ion battery mathematical models

[Liebchen 2015] R. Liebchen: Methoden zur Lebensdaueruntersuchung thermischer Interfacematerialien (TIM): Überblick über Mess- und Versuchsmethoden zur Untersuchung der Lebensdauer von thermischen Interfacematerialien, 8. Tagung Elektronik Kühlung Haus der Technik, Essen, 2015

[Lu et al. 2013] Lu, L., Han, X., Li, J., Hua, J., Ouyang, M., A review on the key issues for lithiumion battery management in electric vehicles, J. Power Sources, 226 (2013), 272-288

[Lucas et al. 2014] Lucas, C.; Rusche, H.; Schröder, A.; Köhler, J.: Numerical investigation of a two-phase CO₂ Ejector, International Journal of Refrigeration 2014, Volume 43, Pages 154-166, July 2014

[Mao et al. 2011] Mao, Q., Krewer, U., Hanke-Rauschenbach, R., Total Harmonic Distortion Analysis for Direct Methanol Fuel Cell Anode, Electrochem. Comm. 12 (2010), 1517-1519

[Mingant et al. 2011] Mingant, J. Bernard, V., Sauvant-Moynot, A., Delaille, S. Mailley, J.-L. Hognon, F. Huet, EIS Measurements for Determining the SoC and SoH of Li-ion Batteries, ECSTrans. (2011) 33-39, 41-53

[Mobil4e] Hochschuloffensive eMobilität für die Fort- und Weiterbildung. http://schaufenster-elektromobilitaet.org/de/content/projekte_im_ueberblick/projektsteckbriefe/projekt_3968.html, abgerufen am 02.03.2016

[MoDeNa 2013] Modena-Konsortium. Modelling of morphology Development of micro- and Nanostructures. <http://modena.units.it/default.aspx>, abgerufen am 02.03.2016

[Newman 2004] Newman, J., Thomas-Alyea, K., Electrochemical Systems, Third Edition, 2004, Wiley-Interscience

[NOVABATT] Integrierte Sensorik und Aktorik für ein leistungsfähiges Batteriemangement in elektrischen Fahrzeugen. BMBF Projektsteckbrief

[OpenFOAM] <http://www.openfoam.org/>

[Pesaran 2013] Pesaran, M. Keyser, K. Smith, G.-H. Kim, and S. Santhanagopalan, "Tools for Designing Thermal Management of Batteries in Electric Drive Vehicles," Large Lithium Ion Battery Technology & Application Symposia Advanced Automotive Battery Conference. Pasadena, CA, USA, Feb. 4, 2013.

[Petr et al. 2014] Petr, P.; Schröder, C.; Gräber, M.; Tegethoff, W.: Nonlinear Model Predictive Control for Thermal and Electrical Power Management for Parallel Hybrid Electric Vehicles, 11. Symposium Hybrid and Electric Vehicles, Braunschweig, Februar 2014

[Reflex 2013] Reflex-Konsortium. Schnelle Entwicklung intelligenter modellgestützter Regler für das flexible Thermomanagement von E-Fahrzeugen (Reflex Thermo), gefördertes Projekt zum Themenfeld STROM 2 (BMBF)

[Schulze et al. 2011] Schulze, C.; Gräber, M.; Huhn, M.; Grätz, U.: Real-Time Simulation of Vapour Compression Cycles. In: Proceedings of the 8th International Modelica Conference, Dresden, März 2011

[Simulink] <http://de.mathworks.com/products/simulink/>, abgerufen am 02.03.2016

[Smith 2015] J. Smith. A Multifactorial Analysis of Thermal Management Concepts for High-Voltage Battery Systems. Noch nicht veröffentlichte Dissertation, TU Braunschweig, 2015

[Sphinx 2013] Sphinx-Konsortium 2013. Hochintegrierter, skalierbarer E-Fahrzeugantrieb auf Basis einer schnell laufenden elektrischen Maschine. <http://www.pt-em.de/de/1523.php>, abgerufen am 02.03.2016

[TEMO 2011] Schlussbericht zum Verbundvorhaben Thermische Echtzeitfähige Modelle <http://www.ift-bs.de/files/TEMO%20Schlussbericht%20kurz%20Sept2011.pdf>

[TopBat] Temperaturoptimierte Batteriemodule mit instrumentierten Zellen. BMBF Projektsteckbrief

[Torchio et al. 2014] Marcello Torchio, Nicolas A. Wolff, Davide M. Raimondo, Lalo Magni, Ulrike Krewer, R. Bushan Gopaluni, Joel A. Paulson, Richard D. Braatz, Real-time Model Predictive Control for the Optimal Charging of a Lithium-ion Battery, 2015 American Control Conference

[Varchmin et al. 2015] Varchmin, A.; Gräber, M.; Köhler, J. Modeling and Validation of a Multiple Evaporator Refrigeration Cycle for Electric Vehicles. In: Proceedings of the 11th International Modelica Conference, Versailles, September 2015

[Wang et al. 2006] Wang, Q., Sun, J., Yao, X., Chen, C., Thermal Behavior of Lithiated Graphite with Electrolyte in Lithium-Ion Batteries, J. Electrochemical Society 153 (2006), A329-A333

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN geplant	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Diagnose und Management von Hotspots in Batteriesystemen (DIMOBA)	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Michael Steeb – Institut für Thermodynamik Fridolin Röder – Institut für Energie- und Systemverfahrenstechnik	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.08.2019
	6. Veröffentlichungsdatum geplant
	7. Form der Publikation Schlussbericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Institut für Thermodynamik Hans-Sommer-Straße 5 38106 Braunschweig Institut für Energie- und Systemverfahrenstechnik Franz-Liszt-Straße 35 38106 Braunschweig	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 16EMO0201
	11. Seitenzahl 33
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben 41
	14. Tabellen 0
	15. Abbildungen 21
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung In Batteriesystemen elektrifizierter Fahrzeuge können an verschiedenen Stellen lokale Überhitzungszonen (sog. Hotspots) auftreten, z.B. an Schützen, Sicherungen, Stromschienen, in Batteriezellen oder in räumlicher Nähe von Abgasanlagen bei PHEVs. Die Ursachen für Hotspots können z.B. ein unzureichendes thermisches Systemdesign, ein Ausfall des Kühlsystems, eine Überlastung oder ein Bauteildefekt sein. Hotspots können zu Einbußen in der Systemperformance, zu vorzeitigem Altern der Batteriezellen, zu einem Systemausfall bis hin zum sicherheitskritischen thermischen Durchgehen einzelner Zellen führen. Vor diesem Hintergrund beschäftigt sich das vorgeschlagene Projekt mit der Vermeidung von Hotspots. Die Herangehensweise basiert auf einem ganzheitlichen und durchgängigen thermischen Auslegungsprozess sowie auf Online-Diagnosesystemen zur Erkennung von Hotspots. Im Rahmen des Projekts sollen drei Ziele innerhalb von drei Jahren erreicht werden. Erstes Ziel ist die Entwicklung eines neuartigen Designwerkzeugs. Basierend auf detaillierten Geometrieinformationen soll dieses Designwerkzeug nutzergeführt „3D-Coarse-Grid-Modelle“ erstellen und anschließend mithilfe von Feldberechnungsverfahren automatisiert in simulatorunabhängige standardisierte 0D/1D-Functional-Mockup-Units (FMUs) überführen, die verschaltet das komplette Batteriesystem darstellen. Zweites Ziel ist die Bereitstellung einer neuartigen Diagnosemethodik als FMU, mittels derer Zelltemperaturen indirekt gemessen und Zelldefekte mit thermischer Auswirkung erkannt werden können. Drittes Ziel ist ein aus den erstellten FMUs entwickeltes simulatorunabhängiges Gesamtfahrzeugmodell. Es dient dazu, Konstruktionsvorschläge zur Hotspot-Entwärmung (Anordnung von Komponenten wie Batteriezellen, Schütze und Kühlsystem) sowie Diagnosemethodik für beliebige Fahrzyklen und Randbedingungen testen zu können. Nach Erfüllung der drei Ziele steht als Endergebnis des Projekts eine durchgängige, weitgehend automatisierte und simulatorunabhängige Werkzeugkette bereit. Diese Werkzeugkette erlaubt die Bewertung dreidimensionaler Konstruktionen in Kombination mit Betriebsstrategien und Diagnosemethoden.	
19. Schlagwörter HotSpot, Diagnose, NFRA, Thermomanagement, MiL, Elektrofahrzeug, Gesamtfahrzeugmodell	
20. Verlag Technische Informationsbibliothek (TIB), Hannover	21. Preis 0 EUR

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN planned	2. type of document (e.g. report, publication) Final report
3. title Diagnostic und Management of Hotspots in Battery Systems Diagnose und Management von Hotspots in Batteriesystemen (DIMOBA) (DIMOBA)	
4. author(s) (family name, first name(s)) Michael Steeb – Institut für Thermodynamik Fridolin Röder – Institut für Energie- und Systemverfahrenstechnik	5. end of project 31.08.2019
	6. publication date planned
	7. form of publication Final report
8. performing organization(s) (name, address) Institut für Thermodynamik Hans-Sommer-Straße 5 38106 Braunschweig Institut für Energie- und Systemverfahrenstechnik Franz-Liszt-Straße 35 38106 Braunschweig	9. originator's report no.
	10. reference no. 16EMO0201
	11. no. of pages 33
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references 41
	14. no. of tables 0
	15. no. of figures 21
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)	
18. abstract <p>Local overheating zones, so-called hotspots, can occur at various points in the battery system of electrified vehicles, e.g. on contactors, fuses, busbars, in battery cells or in close proximity to the exhaust system at PHEVs. The causes of hotspots can e.g. an inadequate thermal system design, a failure of the cooling system, an overload or a component defect. Hotspots can lead to losses in system performance, premature aging of the battery cells, system failure or even safety-critical thermal runaway of individual cells. Against this background, the proposed project deals with the avoidance of hotspots. The approach is based on a holistic and consistent thermal design process as well as online diagnostic systems for the detection of hotspots.</p> <p>The project aims to achieve three goals within three years. The first goal is the development of a new design tool. Based on detailed geometry information, this design tool should create user-guided "3D-Coarse-Grid-Models" and then automatically convert them into simulator-independent standardized 0D / 1D-Functional-Mockup-Units (FMUs), which interconnectively represent the complete battery system. The second goal is to provide a new diagnostic method as an FMU, by means of which cell temperatures can be measured indirectly and cell defects with thermal effects can be recognized. The third goal is a simulator-independent overall vehicle model developed from the FMUs created. It serves to be able to test design suggestions for hotspot cooling (arrangement of components such as battery cells, contactors and cooling system) as well as diagnostic methods for any driving cycles and boundary conditions. After fulfilling the three goals, the end result of the project is a universal, largely automated and simulator-independent tool chain. This tool chain allows the evaluation of three-dimensional constructions in combination with operating strategies and diagnostic methods.</p>	
19. keywords HotSpot, Diagnostic, NFRA, Thermomanagement, MiL, Electric Vehicle, Full Vehicle Model	
20. publisher Technische Informationsbibliothek (TIB), Hannover	21. price 0 EUR