

## Abschlussbericht zu Phase 1 des Verbundvorhabens

# DriveBattery2015

„Intelligente Steuerungs- und Verschaltungskonzepte für modulare Elektrofahrzeug-Batteriesysteme zur Steigerung der Effizienz und Sicherheit sowie zur Senkung der Systemkosten“

Förderkennzeichen:	03ET6003G
Laufzeit des Vorhabens:	01.08.2013 - 31.01.2015
Berichtszeitraum:	01.08.2013 - 30.04.2015
Erstellungsdatum:	11. September 2015
Berichtsersteller:	Hannes Nordmann (ISEA), Susanne Rothgang (ISEA), Thomas Nemeth (ISEA), Simon Ritz (ISEA), Jan Becker (ISEA), Hendrik Zappen (ISEA), Dominic Jabs (ITHE), Christoph Jungemann (ITHE)
Berichtsersteller Firma:	RWTH Aachen Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA) Institut für Theoretische Elektrotechnik (ITHE)
Revision:	1.1

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



---

## I. Inhaltsverzeichnis

<b>I.</b>	<b>INHALTSVERZEICHNIS</b>	<b>2</b>
<b>II.</b>	<b>KURZDARSTELLUNGEN</b>	<b>3</b>
II.1	Aufgabenstellung	3
II.2	Motivation des Vorhabens	3
II.3	Wissenschaftlicher und technischer Stand zum Vorhabenbeginn	3
II.4	Planung und Ablauf des Vorhabens	5
II.5	Zusammenarbeit mit Verbundpartnern	5
<b>III.</b>	<b>EINGEHENDE DARSTELLUNGEN</b>	<b>7</b>
<b>III.1</b>	<b>Projektergebnisse nach Arbeitspaketen</b>	<b>7</b>
III.1.1	Algorithmen für Leistungsverteilung und Ladeverteilung an Modulen für gegebene Leistungsanforderung am Gesamtbatteriesystem (AP2.5)	7
III.1.2	Quantitative Beschreibung von Hot-Carrier Effekten zur Absicherung der funktionalen Sicherheit von Halbleiterschaltern (AP5.8)	11
III.1.3	Identifikation geeigneter Zellkonzepte (AP6.5)	17
III.1.4	Verteilte Batteriemanagementsysteme für modulare Packs (AP6.8)	20
III.1.5	Modellbildung & Identifikation optimaler Sensorpositionen (AP6.9)	26
III.1.6	Aufbau und Inbetriebnahme eines Hardware-in-the-Loop Prüfstands für Batteriemanagementsysteme (AP8.1)	31
<b>III.2</b>	<b>Erfolge und geplante Veröffentlichungen</b>	<b>34</b>
III.2.1	Bereits veröffentlicht	34
III.2.2	Geplante Veröffentlichungen	34
<b>IV.</b>	<b>ANHANG:</b>	<b>35</b>
IV.1	Tabellenverzeichnis	35
IV.2	Abbildungsverzeichnis	35

---

## II. Kurzdarstellungen

### II.1 Aufgabenstellung

Die wesentlichen Ziele des Vorhabens aus Sicht der RWTH Aachen fokussieren Energiemanagement in Multi-Pack-Systemen (aus TA2); simulative Betrachtungen von physikalischen Halbleitermodellen, sowie deren Erstellung (aus TA5), Untersuchungen von Modulzellkonzepten zur Darstellung thermisch bedingter Alterungseffekte auf Modulniveau, Erweiterungen eines modularen Batteriemanagementsystems unter besonderer Berücksichtigung von Mehrwertfunktionalitäten, sowie die thermische Modellbildung auf Packlevel mit Ableitung von optimalen Temperatursensorpositionen (aus TA6). Außerdem werden Fehlerinduktionsmodelle und –szenarien in Batteriepacks auf Hardwarelevel erarbeitet (aus TA8).

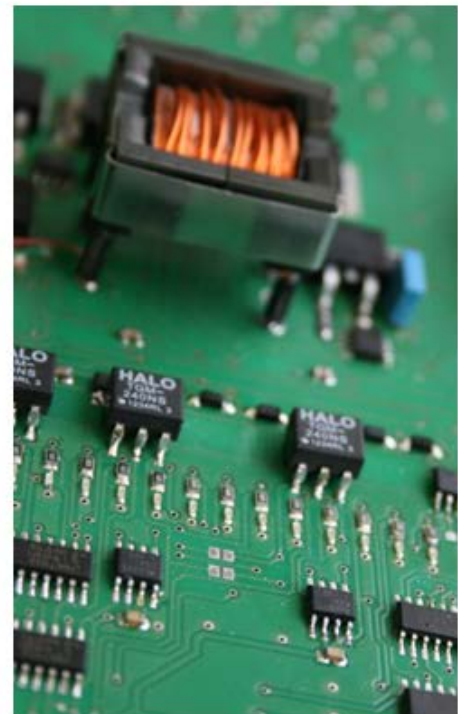
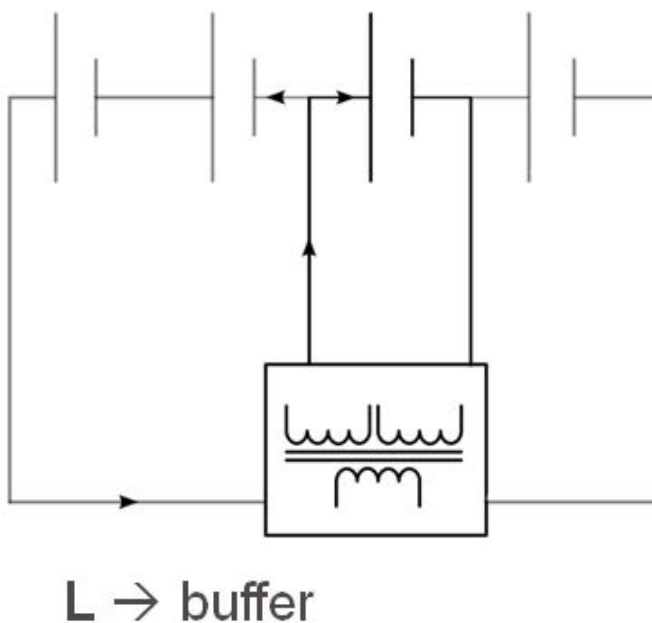
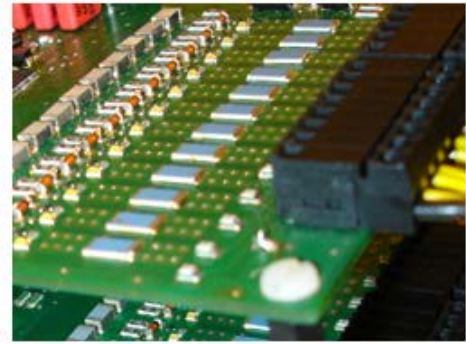
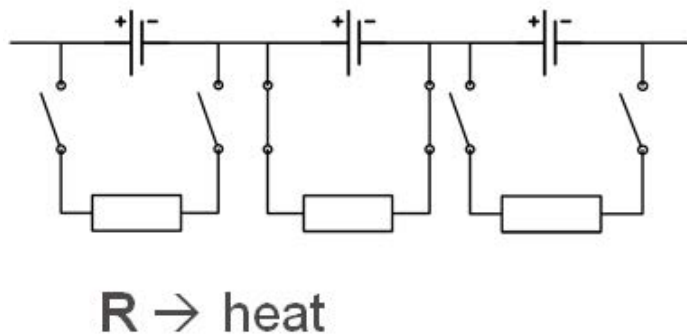
### II.2 Motivation des Vorhabens

Das Institut für Stromrichtertechnik und elektrische Antriebe (ISEA) beschäftigt sich seit vielen Jahren mit der Forschung und Entwicklung an Batteriesystemen. Die im Rahmen des Vorhabens durchgeführten Arbeiten bezüglich der Verbesserung der Sicherheit und Zuverlässigkeit von solchen Systemen sind nicht alleine für die Anwendung in Batteriespeichern von Fahrzeugen von enormer Bedeutung, sondern auch für stationäre Anwendungen. In beiden Bereichen arbeitet das Institut eng mit Industrieunternehmen im Bereich Forschung, Entwicklung und Beratung zusammen. Die Ergebnisse dieses Projekts ermöglichen den Ausbau dieser Forschungstätigkeiten. Der im Rahmen des Projekts angeschaffte HiL Prüfstand für Batteriemanagementsysteme ermöglicht es dem Institut auch künftig im Rahmen weiterer Forschungsaufträge in öffentlichem Rahmen unterstützend zu helfen.

Im Zuge des Projekts sind zudem weiterhin Dissertationsvorhaben, sowie die Durchführung von Bachelor- und Masterarbeiten im Rahmen der Ausbildung von Studenten und Promotionsstudenten im Fach Elektrotechnik geplant.

### II.3 Wissenschaftlicher und technischer Stand zum Vorhabenbeginn

Das ISEA der RWTH Aachen kann durch langjährige Erfahrung auf einen breiten Fundus an Expertenwissen im Bereich Batteriesystemtechnik, Dimensionierung und Management zurückgreifen. Insbesondere auch die Module aus Batteriemanagementsystemen haben zu Beginn des Verbundprojektes bereits einen Stand, mit dem man operativ ein BMS erstellen und in verschiedenste Richtungen fortentwickeln kann, vgl. Abbildung 1.



**Abbildung 1: Am ISEA entwickelte Zellspannungsausgleichssysteme, schematisch (links), Hardware (rechts), sowie passiv (oben) und aktiv (unten).**

Intelligente Energiemanager-Elemente sind ebenfalls Bestandteil der bisherigen Forschung am ISEA, weshalb es sinnvoll erscheint, die verschiedenen Teildisziplinen zu vereinen. Die bisherigen Energiemanagementfunktionen begrenzten sich größtenteils auf das Management von hybridisierten PKW, sowie die optimale Regelung der Leistungsflüsse in einem hybriden ÖPNV-Bus.

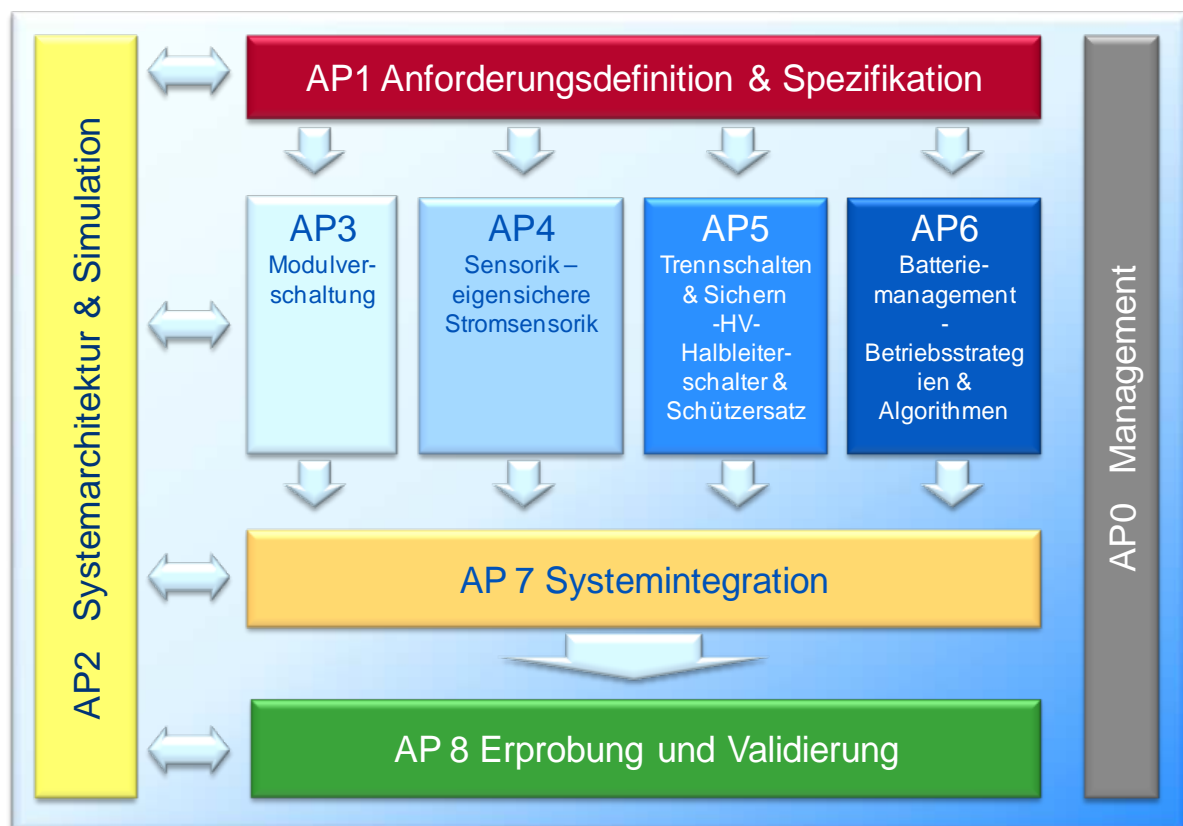
Durch die umfangreiche Laborausstattung ist es möglich, sowohl elektrische, als auch thermische Tests an Einzelzellen und großen Batteriechargen durchzuführen. So entstanden in der Vergangenheit bereits detaillierte Batteriemodelle und fundierte Kenntnisse der Vorgänge in Li-Ionenbatterien, die im Projekt genutzt werden können.

Am Institut für Theoretische Elektrotechnik werden Programme zur Simulation von elektronischen Bauelementen entwickelt. Es können große Leistungstransistoren ebenso

wie extrem kleine THz-Transistoren simuliert werden. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf der semiklassischen Simulation auf der Basis der Boltzmann-Gleichung.

## II.4 Planung und Ablauf des Vorhabens

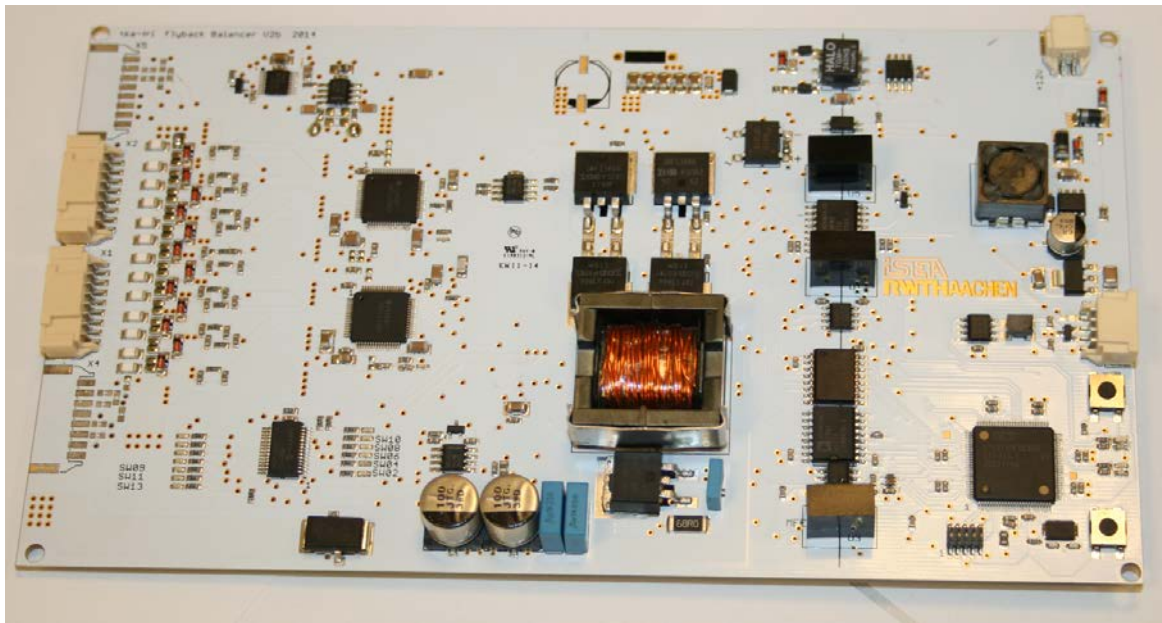
Die RWTH Aachen ist während des Berichtszeitraumes M01-M18 im nachfolgend in Abbildung 2 gezeigten Organigramm in den Arbeitspaketen AP2, AP5, AP6, sowie AP8 vertreten. Die Leitung der Teilarbeitspakete 6, sowie 8 wurde durch die RWTH übernommen.



**Abbildung 2: Organisation der Arbeitspakete des Verbundprojektes DriveBattery2015.**

## II.5 Zusammenarbeit mit Verbundpartnern

In Teilarbeitspaket 6 wurde ein Muster und ein Konzept zur elektrochemischen Impedanzvermessung auf Basis eines CSC (Cell Supervisory Circuit – Zellcontroller) dem Verbundpartner STW vorgestellt und ebenda analysiert. Es wurde ein am ISEA entwickeltes System zur aktiven Zellsymmetrierung untersucht (Abbildung 3).



**Abbildung 3: CSC zur aktiven Zellsymmetrierung und Impedanzspektroskopie.**

Die Einschätzung von STW umfasst die Auffassung, dass die Innenwiderstände der Zellzuleitungen (im Bereich 20..30 Milliohm) im Vergleich zu Innenwiderständen realer, in Elektrofahrzeugen eingesetzter Zellen (wenige Milliohm) zu einem starken Messfehler führen könnte. Ebenfalls wurde darauf hingewiesen, dass mittels einer Stromanregung des CSCs von +/-2 A Automotive-Zellen mit ca. 4 mV antworten. Das sei im Vergleich zur Quantisierung der Mess-Chips ein Fehler von im ungünstigsten Fall 10%.

Als Lösungsvorschlag kann hierbei genannt werden, dass man entweder eine Vierpunktmessung implementiert (Nachteilig hierbei ist der Aufwand), oder stattdessen eine Methode zur Kompensationsrechnung des Fehlers, den die Spannungsmessleitungen erzeugen, per Software implementiert<sup>1</sup>.

Weitere Zusammenarbeiten betreffen den Dialog mit dem Partner TWT aus Arbeitspaket 1. Dort wurden Interviews durchgeführt, die in Ergebnis E1.3 eine Spezifikation der System-Requirements für ein Batteriesystem mündeten.

Das Institut für Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (RWTH-ISEA) ist weiterhin auch im Adhoc Team Crash-Sicherheit vertreten, welches unter der Leitung des Partners BVB Innovate GmbH Knowhow zur Erkennung und Handling von Crash-Szenarien sammelt.

Das Institut für theoretische Elektrotechnik (RWTH-ITHE) arbeitet eng mit Infineon zusammen. Infineon liefert Prozesssimulationen, Strukturdaten, physikalische Parameter und Messergebnisse zu eigenen Leistungshalbleitern an das ITHE, bei welchem auf Basis dieser dann physikalische Modelle angepasst, mikroskopische Simulationen durchgeführt und Ergebnisse verglichen werden. Über die Ergebnisse und das nachfolgende Vorgehen stimmen sich Infineon und das ITHE dann eng ab.

<sup>1</sup> Vgl. Patent DE102013013471 (*Verfahren zur Bestimmung der Zuleitungsimpedanz in mehrzelligen Batteriepacks zur Leitungsfehlererkennung*), H. Nordmann, H. Zappen. D.U. Sauer, 2013.

### III. Eingehende Darstellungen

#### III.1 Projektergebnisse nach Arbeitspaketen

Im Folgenden werden die Projektergebnisse nach Aufgabengebiet unter Nennung der, sowie mit Verweis an die Ergebnisberichtsnummern genannt und beschrieben.

#### III.1.1 Algorithmen für Leistungsverteilung und Ladeverteilung an Modulen für gegebene Leistungsanforderung am Gesamtbatteriesystem (AP2.5)

##### III.1.1.1 Berichtszeitraum 01.08.13 – 31.01.15

Der Einsatz verschiedenartiger Batteriepacks in einem Fahrzeug erhöht die Flexibilität bei der Dimensionierung und Nutzung des Energiespeichers. Ein zentraler Energiemanager übernimmt im Fahrzeug die Aufgabe, die geforderte Leistung auf die einzelnen Packs aufzuteilen. Dadurch können zum Beispiel bei gleichartigen Packs Unterschiede im Ladezustand ausgeglichen werden oder beim Einsatz unterschiedlicher Zellen in den verschiedenen Packs Leistungsfähigkeit und Energiegehalt unabhängig voneinander dimensioniert werden, wodurch eine optimale Ausnutzung des Speichers sichergestellt wird.

Abbildung 4 zeigt eine mögliche Systemtopologie mit mehreren Batteriepacks. Jede Batterie (1 ... N) wird über einen separaten, bidirektionalen DC/DC-Wandler mit dem Zwischenkreis verbunden, aus dem die Leistung zum Antrieb des Fahrzeugs entnommen wird. Im Rekuperationsfall wird Leistung in den Zwischenkreis zurückgespeist. Die Aufgabe des Energiemanagers, welcher die Zustände aller Batterien auswertet, liegt darin, diese Leistung optimal auf die einzelnen Packs aufzuteilen, indem die DC/DC-Wandler geregelt werden.

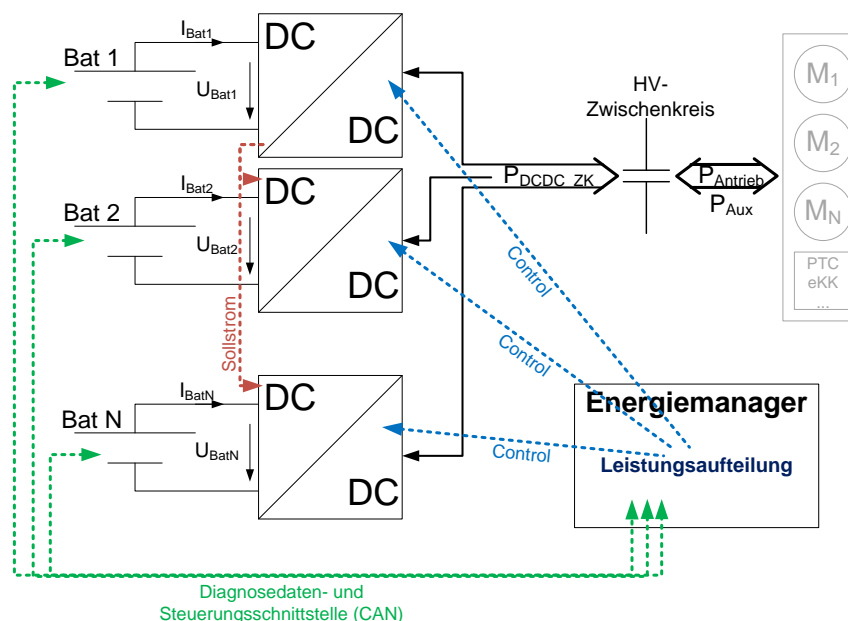
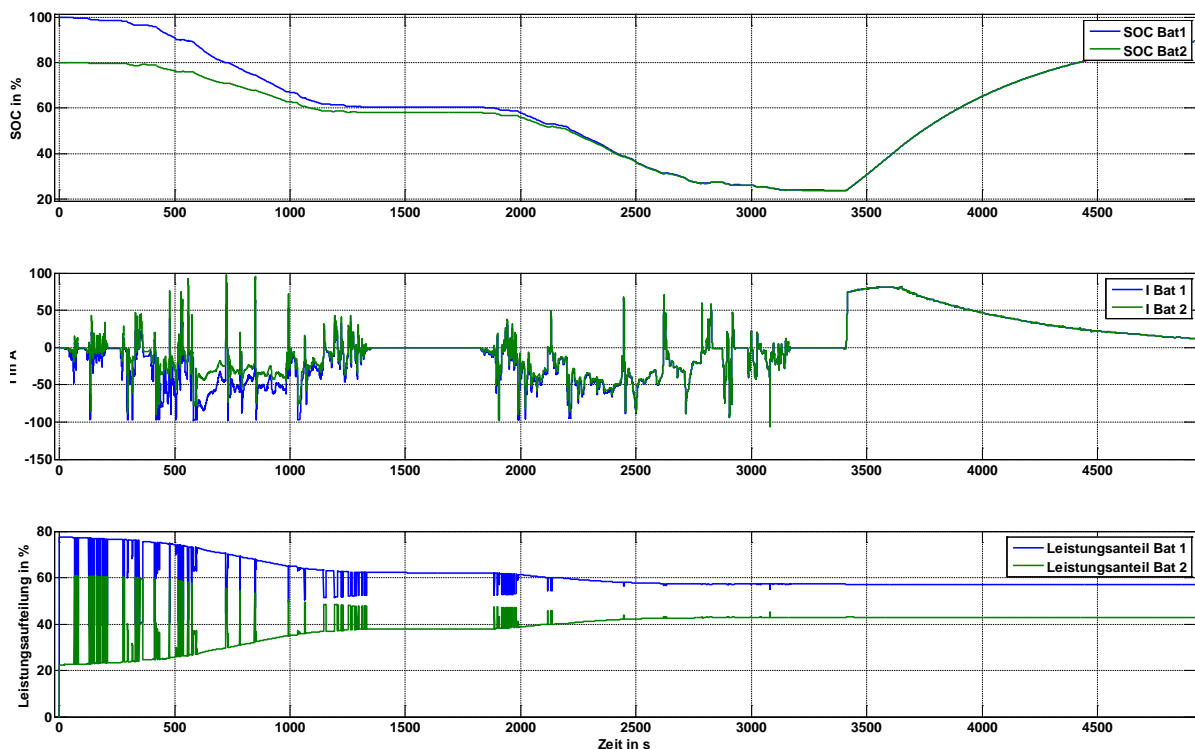


Abbildung 4: Steuerung der Leistungsaufteilung durch den Energiemanager.

Als Leistungsaufteilungsstrategien wurden zwei unterschiedliche Varianten umgesetzt. Die erste Strategie (Strategie zum Ausgleich der Ladezustände) wird angewendet, falls ausschließlich Batteriemodule vom gleichen Typ (gleicher Zelltyp, evtl. unterschiedliche Größe) eingesetzt werden. Ziel der Strategie ist ein Ausgleich der Ladezustände aller Batterien, so dass alle Packs den entladenen Zustand zeitgleich erreichen und bis zu diesem Zeitpunkt Leistung von allen Modulen erbracht werden kann.

Abbildung 5 verdeutlicht die Funktionsweise des Algorithmus an einem Beispiel zweier Packs mit unterschiedlichem Anfangsladezustand (Batterie 1: 100%, Batterie 2: 80%). Das der Simulation zu Grunde liegende Lastprofil umfasst eine Testfahrt (ca. 3400 Sekunden) mit anschließender Schnellladung. Es wird deutlich, dass ein Ausgleich der Ladezustände vollzogen wird, dessen Geschwindigkeit durch mehrere Parameter beeinflusst werden kann.

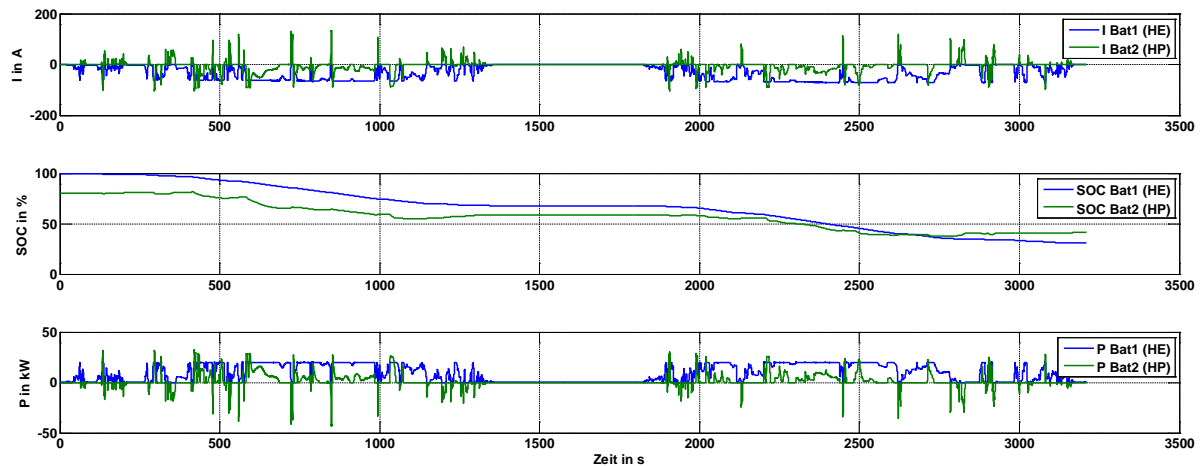


**Abbildung 5: Strategie zum Ausgleich der Ladezustände.**

Des Weiteren wurde eine dynamische Leistungsaufteilungsstrategie entwickelt und implementiert, die zum Einsatz kommt, wenn unterschiedliche Packs (High Power / High Energy) verbaut sind. Ziel der Kombination von Hochleistungs- und Hochenergiepack ist eine optimale Ausnutzung der verschiedenen Zelltechnologien, um so beispielsweise die Gesamalterung zu minimieren oder durch optimierte Anpassung des Leistungs- zu Energieverhältnis des Speichers das Systemgewicht zu senken. Abbildung 6 zeigt das Ergebnis einer Simulation mit Anwendung des Leistungsaufteilungsalgorithmus. Während das Hochenergiepack im Falle eines Leistungsbezugs (Beschleunigung) so lange alleine eingesetzt wird, bis die Leistungsgrenze erreicht wird, nutzt man das Hochleistungspack als Boost-Einheit, die zur Deckung von Lastspitzen fungiert. Im Rekuperationsfall wird zunächst Energie in das Hochleistungspack zurückgespeist, um den SOC anzuheben und die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems für den nächsten



Entladeleistungspuls aufrecht zu erhalten. Sollte der SOC eine vorgegebene Grenze unterschreiten, kann ein Nachladen aus dem Hochenergiepack initiiert werden.



**Abbildung 6: Dynamische Leistungsaufteilung (Bat 1: High Energy, Bat 2: High Power).**

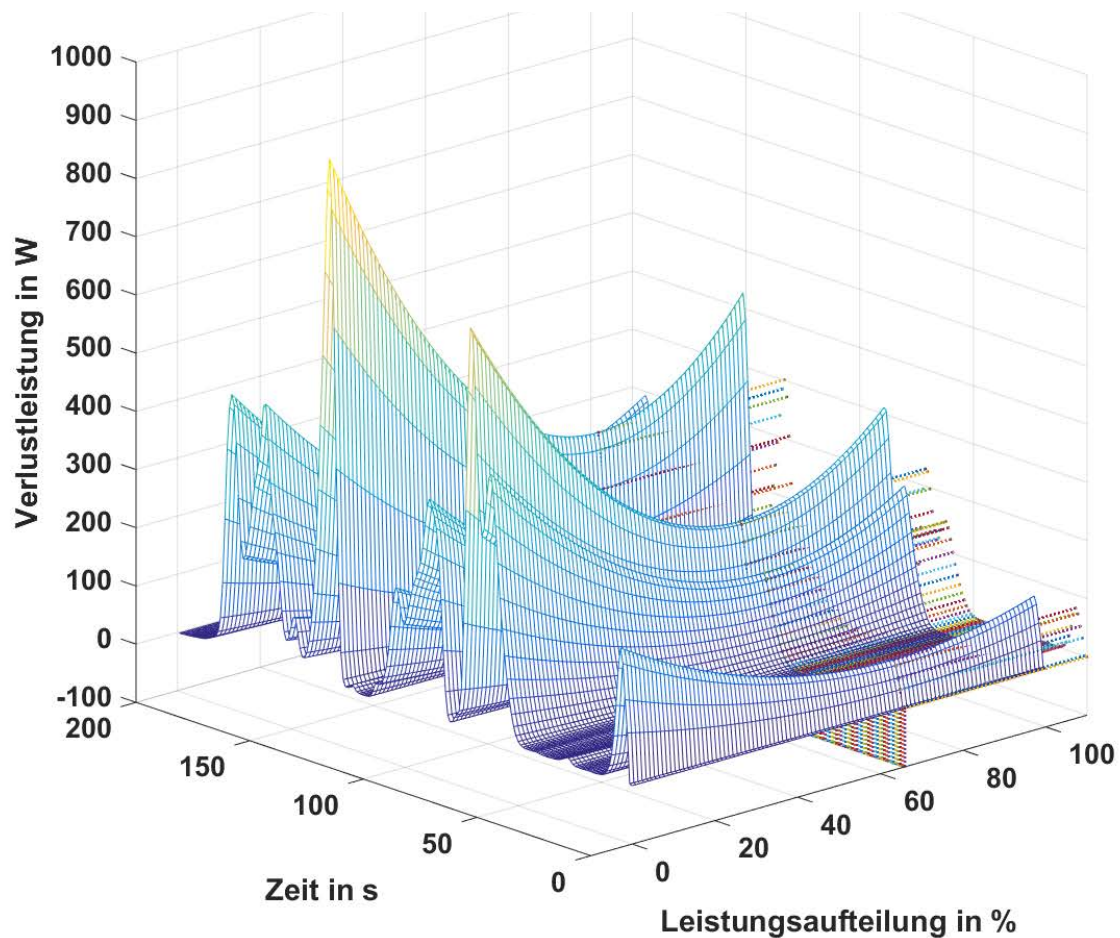
Die entwickelten Algorithmen zur Leistungsaufteilung ermöglichen den Einsatz einer Mehr-Pack-Batterietopologie in Elektrofahrzeugen. Dadurch ergibt sich eine größere Flexibilität bei der Dimensionierung der Speicher (Leistung und Energie) sowie ein flexibler Betrieb. Zukünftige Leistungsaufteilungsstrategien können zusätzlich Lebensdauer und somit Kosten für den Nutzer berücksichtigen. Hierzu sind umfangreiche Alterungsmessungen an den Batteriezellen notwendig, um kritische Zustände zu erfassen und vom Energiemanagement vermeiden zu lassen.

### III.1.1.2 Berichtszeitraum 01.02.15 – 30.04.15

Die in Phase 1 entwickelten Algorithmen zur Verteilung der Antriebsleistung auf mehrere Speicher wurden in diesem Berichtszeitraum um eine weitere Strategie ergänzt. Ziel der neuen Strategie ist eine Minimierung der elektrischen Verluste in einem Mehrspeichersystem, um die Reichweite des Fahrzeugs zu maximieren. Berücksichtigt wird dabei die direkte Umsetzung elektrischer in thermische Energie über ohmsche Verluste in den Batterien und den angeschlossenen DC/DC-Wandlern, sowie eine bedarfsgerechte Kühlleistung pro Batterie.

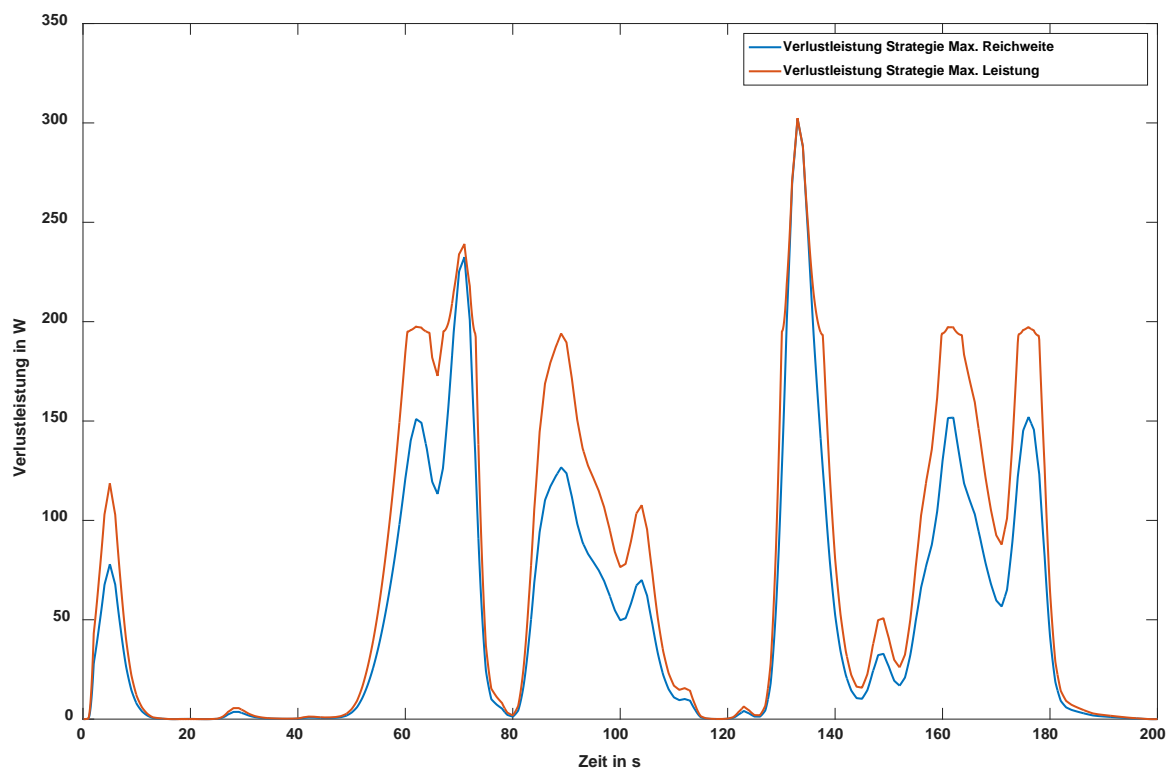
Die Leistungsaufteilungsberechnung dieser Strategie im Energiemanagement beruht auf Daten vom jeweiligen Batteriemanagementsystem, was für diese Funktion erweitert wurde um die Angabe des aktuellen Innenwiderstands. Anhand dieses Innenwiderstands kann der Algorithmus abhängig von der der jeweiligen Batterie zugeteilten Leistung die dadurch entstehenden Verluste berechnen und so ein Minimum in der Aufteilung finden. Die für das Pack notwendige Kühlleistung wird in Abhängigkeit der Verlustleistung berechnet. Der Algorithmus nähert sich iterativ pro Ausführung nach dem „varied-parameters approach“ von Waag et al. dem Minimum der Verlustleistung an.

Abbildung 7 zeigt die Verlustleistung einer modellierten Batterietopologie bestehend aus zwei unterschiedlichen Batterien in Abhängigkeit der vom Energiemanager gewählten Leistungsaufteilung. Es zeigt, dass zu jedem Zeitpunkt nur ein globales Minimum in der Verlustleistung existiert, was iterativ vom Algorithmus gefunden wird.



**Abbildung 7: Verlustleistung in Abhängigkeit der Leistungsaufteilung für einen Ausschnitt aus einem Leistungsprofil (200 Sekunden).**

Abbildung 8 zeigt einen Vergleich der Verlustleistung der aus in Phase eins des Projekts entwickelten Aufteilungsfunktion (Priorität auf maximaler Leistung) und der Funktion zu Minimierung der Verluste für einen Ausschnitt aus einem Leistungsprofil. Es wird deutlich, dass die Verluste in der neu entwickelten Strategie deutlich gesenkt werden können und dadurch die Reichweite gesteigert werden kann. Das Einsparpotential hängt von den verbauten Batteriezellen und der geforderten Antriebsleistung ab.



**Abbildung 8: Vergleich der erreichten Verlustleistung der beschriebenen Leistungsaufteilungsstrategien.**

### III.1.2 Quantitative Beschreibung von Hot-Carrier Effekten zur Absicherung der funktionalen Sicherheit von Halbleiterschaltern (AP5.8)

#### III.1.2.1 Berichtszeitraum 01.08.13 – 31.01.15

Ziel des Arbeitspakets 5.8 von DriveBattery2015 ist es, ein besseres Verständnis der Degradation (Alterung) von Leistungshalbleitern, wie sie in Trennschaltern von Infineon verwendet werden, zu erreichen. Die Degradation von solchen Leistungshalbleitern beeinträchtigt die funktionale Sicherheit dieser Bauelemente und ein tieferes Verständnis der zugrunde liegenden physikalischen Prozesse kann möglicherweise zu einer Verbesserung der Bauelemente hinsichtlich dieser Sicherheit führen.

Es ist bekannt, dass die Degradation durch hochenergetische Ladungsträger (hot carrier - HC) im Bauelement verursacht wird. Treffen diese schnellen Ladungsträger auf die Grenzschicht zwischen Silizium und Siliziumdioxid, so reicht ihre Energie oft aus, ins Oxid einzudringen. Daher sammelt sich dort ortsfeste Ladung an. Dieser Prozesse kann sich so lange fortsetzen, bis sich die elektrischen Felder im Bauelement dadurch stark ändern, und das Bauelement schließlich nicht mehr benutzt werden kann.

Zur Simulation von HC-Effekten bietet sich insbesondere die Boltzmann-Transportgleichung (BTG) an, da nur diese eine detaillierte Kenntnis der orts- und energieabhängigen Verteilungsfunktion von sowohl Elektronen als auch Löchern im Bauelement liefert. Vereinfachte Modelle, wie das Drift-Diffusionsmodell, welches das gebräuchlichste Standardmodell von TCAD-Simulationssoftware in der Industrie ist, liefern nicht die energieaufgelösten Verteilungsfunktionen, sodass die HC-Effekte nur grob abgeschätzt werden können.

Die Standardmethode zur Lösung der BTG ist die Monte-Carlo-Methode (MC). Da dieses Verfahren jedoch transient ist, bedarf die Simulation eines Prozesses, welcher im Vergleich zum Zeitschritt der Simulation eine lange Zeit braucht, um in einen stationären Zustand zu gelangen, sehr viel Rechenzeit. Da in diesem Arbeitspaket Leistungsbaulemente simuliert werden, welche aufgrund ihrer Größe und komplizierten Struktur in vielen Ortsraumpunkten aufgelöst werden müssen, und weil zusätzlich die hohen, an den Bauelementen angelegten, Spannungen einen weiten zu simulierenden Energiebereich erfordern, sind MC-Simulationen für solche Bauelemente in angemessener Rechenzeit nicht durchführbar.

Die Alternative zur MC-Methode sind deterministische Verfahren, am ITHE der RWTH Aachen wird insbesondere das SHE-Verfahren verwendet. Die BTG wird dabei in Kugelflächenfunktionen entwickelt (spherical harmonics expansion - SHE). Das resultierende Gleichungssystem ist dann zwar wegen der vielen Ortsraumpunkte in einem Leistungsbaulement und dem weiten Energiebereich aufgrund der hohen angelegten Spannungen groß (bis zu ca. 50 Millionen Unbekannte), kann aber mit iterativen Lösungsverfahren mit geeigneten Stabilisierungs- und Diskretisierungsverfahren, welche ebenfalls am ITHE entwickelt wurden, effizient gelöst werden. Das SHE-Verfahren hat den Vorteil, stationäre Lösungen direkt zu liefern und die Verteilungsfunktionen über viele Größenordnungen genau zu bestimmen.

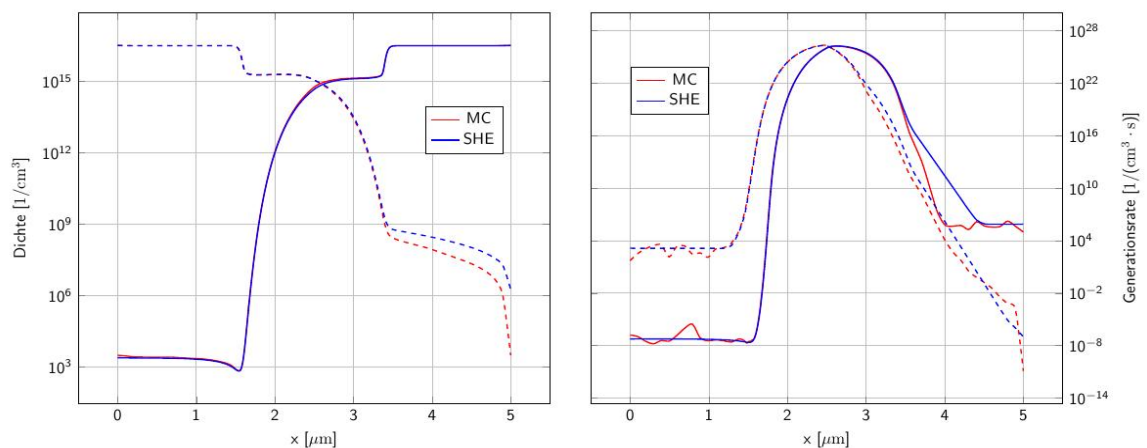
Am ITHE wurde daher ein Bauelement-Simulator entwickelt, welcher auf der Lösung der BTG mit dem SHE-Verfahren beruht, und zudem an die vom Industriepartner Infineon verwendete TCAD-Software *sdevice* von Synopsis anknüpft. Der Simulator kann Geometrie und physikalische Parameter aus *sdevice* auslesen und auch zurückgeben. Dazu wurde zu Beginn des Projektes eine Diskretisierung der BTG auf Dreiecksgittern im Simulator implementiert, da Dreiecksgitter die gängigen Gitter der Simulationssoftware sind. Außerdem haben unstrukturierte Dreiecksgitter viele Vorteile gegenüber Rechteckgittern: Mit ihnen lassen sich verwinkelte Ecken auflösen und die Anzahl der Ortsraumpunkte ist bei gleicher Genauigkeit in der Regel geringer als bei Rechteckgittern, sodass weniger Speicherbedarf anfällt.

Für die Simulation von HC-Effekten wesentliche physikalische Modelle wurden in den Simulator implementiert: Der Simulator löst die Boltzmann-Gleichungen sowohl für den Elektronen- als auch für den Löchertransport. Die Bandstrukturen von Leitungs- und Valenzband werden dazu bis zu Energien von 7 eV simuliert. Zudem sorgen die hohen Spannungen bei Leistungsbaulementen dafür, dass sich Elektronen und Löcher gegenseitig durch Stoßionisation erzeugen können. In diesem Fall sind die beiden BTGs für Elektronen und Löcher über die Stoßionisation gekoppelt. Bei den hohen Spannungen bzw. Energien der Leistungshalbleiter ist die Stoßionisation nicht vernachlässigbar. Das gekoppelte System aus Elektronen und Löchern wird numerisch instabil, wenn die Spannung groß genug ist, um einen Lawinendurchbruch zu erzeugen. Dann steigen die Ströme abrupt an, da enorm viel Ladung durch Stoßionisation generiert wird. Die zu betrachtenden Leistungshalbleiter werden zum Teil nahe eines Lawinendurchbruchs betrieben, sodass die numerische Behandlung der mit dem Lawinendurchbruch verbundenen Instabilitäten ein wesentlicher Teil des Arbeitspaketes ist. Es konnten geeignete Iterationsverfahren entwickelt werden, um diese Instabilitäten zu bewältigen und insbesondere ist es gelungen innerhalb dieses Projektes Verfahren zu entwickeln, welche dies sehr recheneffizient bewerkstelligen<sup>2</sup>.

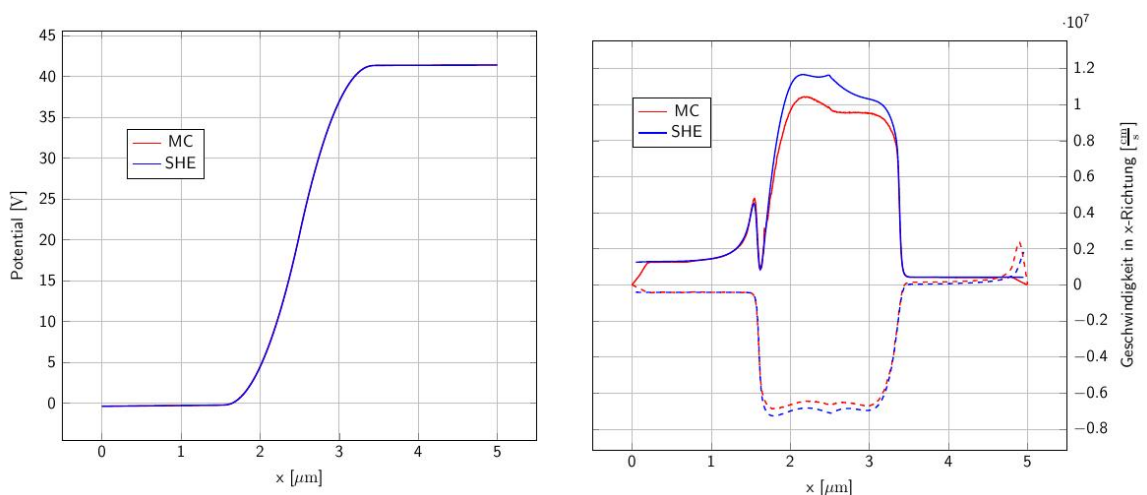
---

<sup>2</sup> D. Jabs, C. Jungemann, *Avalanche Breakdown of pn-junctions – Simulation by Spherical Harmonics Expansion of the Boltzmann Transport Equation*, International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices (SISPAD), pp. 173-176 Yokohama, Japan, Sept. 2014.

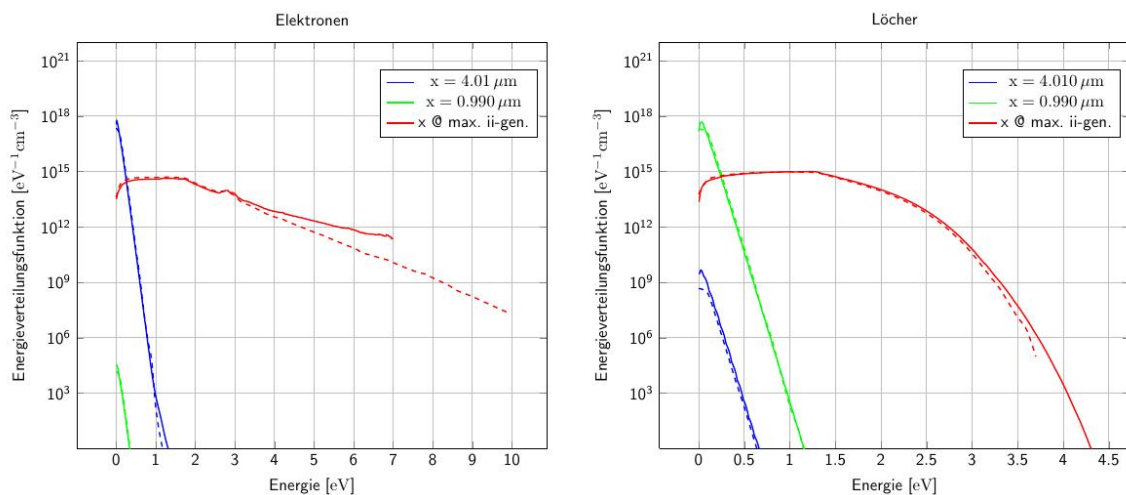
Im Folgenden sind die Ergebnisse für den Lawinendurchbruch einer einfachen eindimensionalen PN-Diode gezeigt. Eine solche PN-Diode hat den Vorteil, mit wenig Rechenzeit im Vergleich zu zweidimensionalen Strukturen (wie den Leistungsbau-elementen) auszukommen, daher ist sie ideal für den Vergleich der SHE-Ergebnisse mit den MC-Ergebnissen geeignet. Die MC-Ergebnisse wurden mit einem institutseigenen Full-Band-MC-Simulator generiert. Da dieser MC-Simulator die volle Bandstruktur simuliert, ist es möglich, die Korrektheit der SHE-Ergebnisse, für welche eine Projektion der Bandstruktur auf Momente genutzt wird, zu verifizieren. Die Übereinstimmung zwischen SHE- und MC-Ergebnissen ist bei allen Größen sehr gut, lediglich bei hohen Energien macht sich eine leichte Abweichung bei Elektronen bemerkbar.



**Abbildung 9: Dichten und Generationsraten von Elektronen (durchgezogen) und Löchern (gestrichelt).**

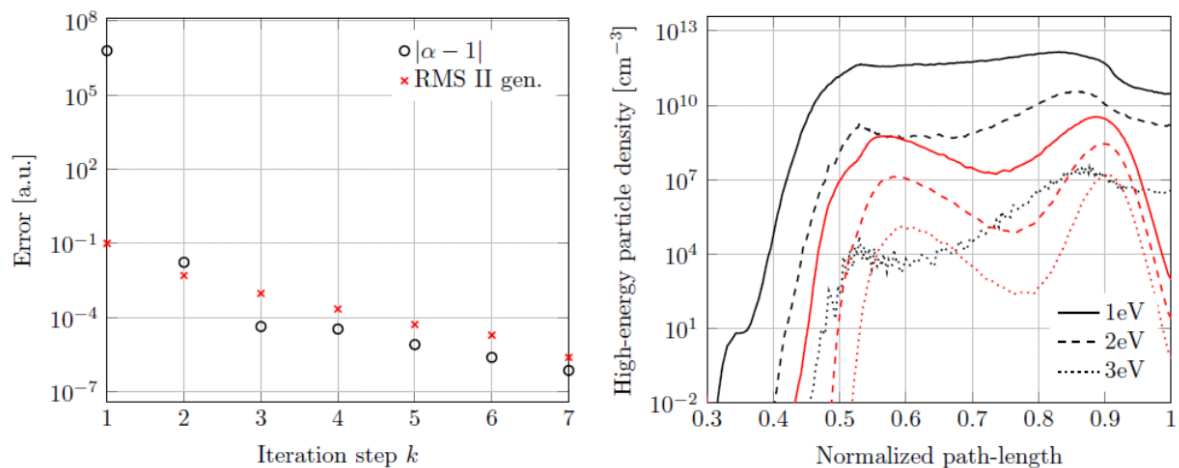


**Abbildung 10: Potential und Geschwindigkeiten von Elektronen (durchgezogen) und Löchern (gestrichelt).**

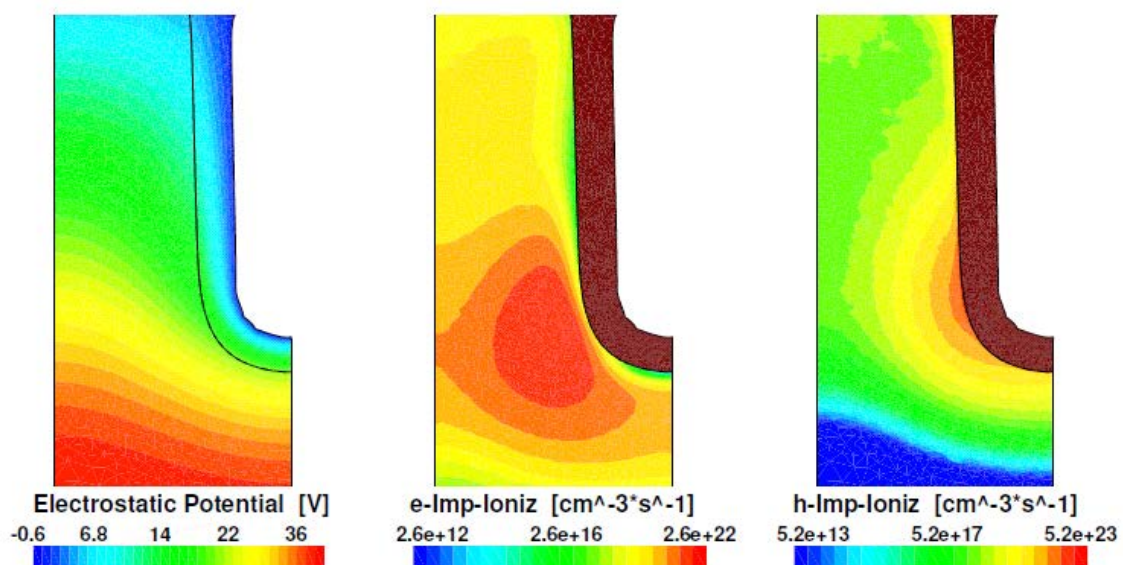


**Abbildung 11: Energieverteilungsfunktionen von Elektronen und Löchern mit SHE (durchgezogen) und MC (gestrichelt).**

Aufbauend auf diesen Untersuchungen von Lawinendurchbrüchen wurde ein robuster Algorithmus für die Simulation von Leistungstransistoren entwickelt, bei welchem sowohl Spannung als auch Strom vorgegeben werden können. Aufgrund des starken Anstiegs des Stromes nahe des Durchbruchs ist nämlich nur so ein gesuchter Arbeitspunkt effizient zu simulieren. Die Vorgabe von sowohl Strom als auch Spannung erfordert die Einführung eines zusätzlichen Parameters, welcher dann mit continuation methods angepasst wird, bis die physikalisch korrekte Lösung ermittelt ist. Dieses Verfahren stabilisiert durch die Begrenzung des Stromes zusätzlich nahe des Durchbruchs, und konvergiert sehr gut (Abbildung 12, links). Damit ist die Simulation eines vertikalen NMOSFETs von Infineon gelungen (Abbildung 13). Der Strom kann dabei mit dem neuen Verfahren so vorgegeben werden, dass er den Messergebnissen von Infineon entspricht. Es lassen sich damit die HC-Effekte an der Si/SiO<sub>2</sub>-Grenzfläche simulieren (Abbildung 12, rechts). Aus diesen HC-Verteilungen der Elektronen und Löcher an der Si/SiO<sub>2</sub>-Grenzfläche lässt sich dann anhand eines Injektionsmodells die in das Oxid injizierte Ladung berechnen. Dieses Modell liefert aufgrund der Ladungsverteilung auf der Grenzschicht die Änderung der elektrischen Felder im Bauelement, welche die Degradation bestimmen. Vergleiche mit Messungen des Industriepartners werden nun in der anstehenden Phase 2 des Verbundprojektes ergeben, wie gut dieses Modell bereits die Degradation der Bauelemente beschreibt. Falls notwendig, werden die Modelle dann in Zukunft erweitert.



**Abbildung 12:** Konvergenz des Algorithmus (links) im zusätzlich eingeführten Parameter sowie in der Generationsrate aufgrund von Stoßionisation innerhalb von 7 Iterationsschritten und HC-Dichten (rechts) von Elektronen (rot) und Löchern (schwarz) ab Teilchenenergien von 1eV bis 3eV entlang der normierten Pfadlänge der Si/SiO<sub>2</sub>- Grenze des vertikalen NMOSFETs ( $x=1$  entspricht dabei dem rechten unteren Ende der Grenze).



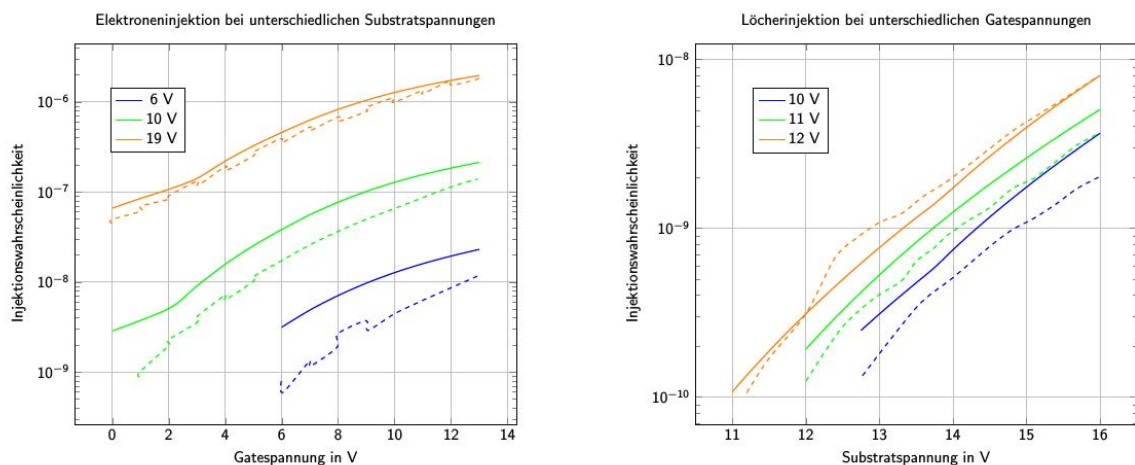
**Abbildung 13:** Potential und Generationsraten durch Elektron/Loch-Stoßionisations in der Raumladungszone eines vertikalen Leistungs-NMOSFETs für eine Source-/ Drain-Spannung von 35,83 V, 0 V Spannung an allen anderen Kontakten und eine Stromdichte von  $10 \text{ pA}/\mu\text{m}^2$

Zum Ende der Phase 1 des Projektes konnten alle wichtigen physikalischen Modelle in den SHE-Simulator des ITHE implementiert werden und diese durch Abgleiche mit MC-Simulationen verifizieren werden. Der Simulator umfasst nun ein Injektionsmodell, um die in das Oxid injizierte Ladung zu beschreiben und löst die gekoppelten BTGs für Elektronen und Löcher bis zu hohen Energien. Damit ist es erstmals gelungen, einen Lawinendurchbruch mit SHE zu simulieren. Mit Hilfe eines entwickelten

Iterationsverfahrens kann eine Simulation zu einem vorgegebenen Strom durchgeführt werden, mit welcher die Simulation der HC-Verteilung von Elektronen und Löchern an den Si/SiO<sub>2</sub>-Grenzflächen und der dort injizierten Ladung bei einem Leistungstransistor möglich ist.

### III.1.2.2 Berichtszeitraum 01.02.15 – 30.04.15

Das zum Ende der Phase 1 in den Simulator implementierte Injektionsmodell für die Injektion von Ladungsträgern aus dem Silizium ins Oxid wurde anhand bekannter Messdaten aus der Literatur überprüft. Dabei hat sich bereits gezeigt, dass leicht veränderte Parameter des Modells die Messdaten besser wiedergeben, sodass das Modell angepasst wurde. Für diese Simulation wurden Testbauelemente konstruiert, in welchen Elektronen bzw. Löcher durch eine im Silizium angelegte Substratspannung zu hohen Energien beschleunigt werden. Diese heißen Ladungsträger treffen dann auf das Gateoxid, in welchem das elektrische Feld über einen Gatekontakt reguliert wird. Der Anspruch an das Injektionsmodell ist es, sowohl die Abhängigkeit der Injektionswahrscheinlichkeit von der Energieverteilung der Ladungsträger, welche über die Substratspannung geregelt wird, als auch die Abhängigkeit der Injektionswahrscheinlichkeit vom elektrischen Feld im Oxid korrekt zu beschreiben. In Abbildung 14 sind die Injektionswahrscheinlichkeiten zu verschiedenen Gate- und Substratspannungen gezeigt. Die durchgezogenen Linien sind die Ergebnisse des Simulators mit dem verbesserten Injektionsmodell und die gestrichelten Linien entsprechen Messdaten aus der Literatur.



**Abbildung 14: Injektionswahrscheinlichkeiten bei versch. Gate-/ Substratspannungen – durchgezogene Linien: Ergebnisse des verbesserten Simulators; gestrichelte Linien: Messdaten aus Literatur.**

Bei hohen elektrischen Feldern liefert das Modell offenbar gute Ergebnisse, bei kleineren Feldern bedarf es allerdings offenbar noch einer Verbesserung des Modells. In Phase 2 des Verbundprojektes ist u. A. die dafür notwendige Feinjustierung des Modells mit Messdaten des Industriepartners Infineon geplant.



### III.1.3 Identifikation geeigneter Zellkonzepte (AP6.5)

Im Rahmen des Arbeitspakets wurden im Berichtszeitraum 01.08.13 – 31.01.15 aufbauend auf den aktuellen Batterietopologien experimentelle Untersuchungen von großen Chargen eine Bewertung der Verbesserungsmöglichkeit durch neue Verschaltungskonzepte erarbeitet. Hierbei wurden insbesondere auch parallele Verschaltungen von Einzelzellen und modulare Konzepte zur Nivellierung der Zellstreuung mit in die Betrachtung einbezogen. Ziel der Arbeiten ist es belastbare Daten für den Vergleich unterschiedlicher batterieinterner Verschaltungstopologien zu generieren und zu analysieren.

Die erste Projektphase beschäftigte sich insbesondere mit der Analyse der initialen Einzelzellparameter. Als Zelle für die Experimente wurde eine 5 Ah prismatische automotive Zelle gewählt, da aufgrund dieser relativ kleinen Zellgröße eine hohe Flexibilität in der Verschaltung besteht und zugleich für Einzelzelltests an einer sehr hohen Zahl an Zellen durchgeführt werden können, da als Prüfkreise Formationskreise ausreichend sind. Insgesamt wurden im Rahmen des Projekts 700 der Zellen analysiert. In Tabelle 1 sind die Zellparameter zusammenfassend aufgeführt.

**Tabelle 1: Überblick der Zellparameter.**

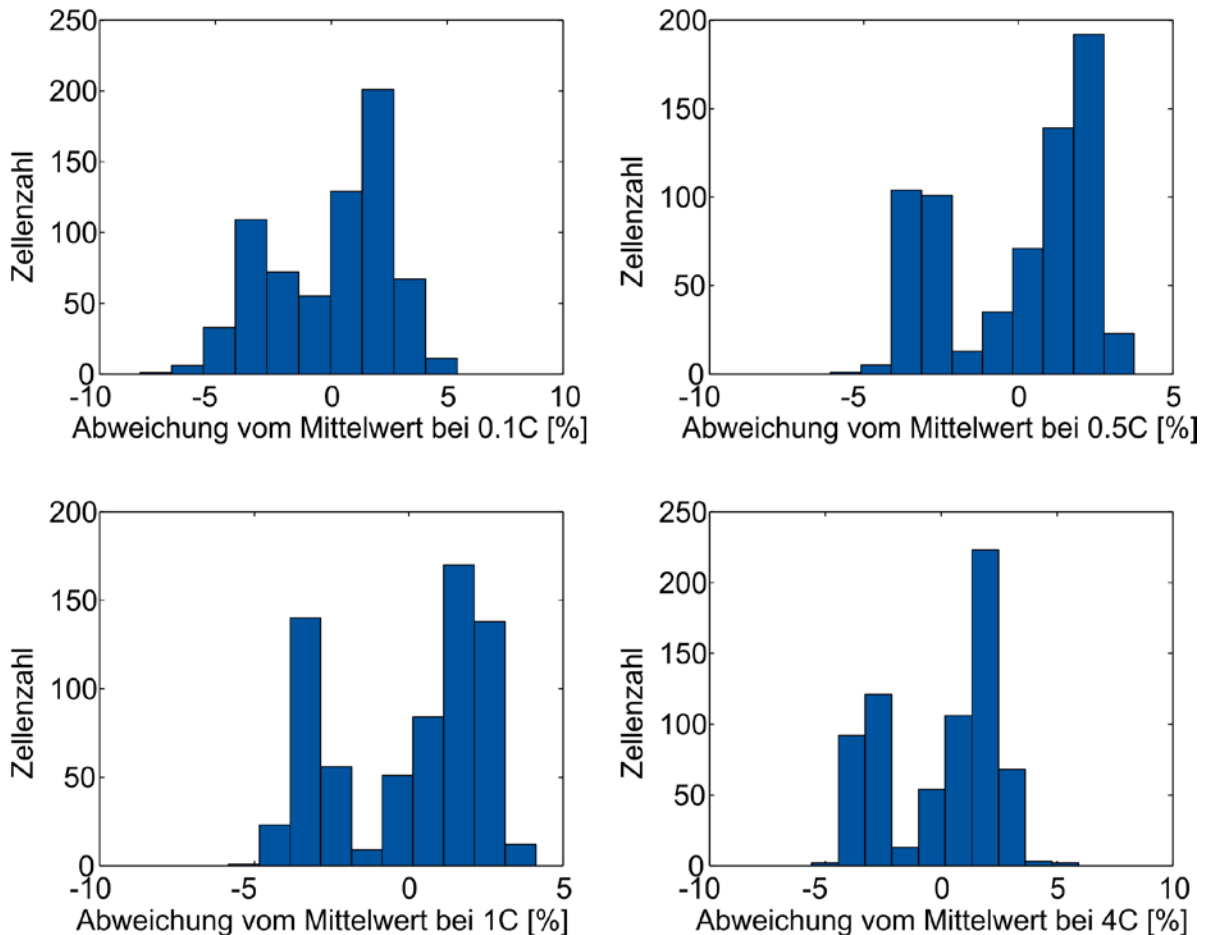
Elektrodenmaterialien	Graphit/NMC
Spannungsgrenzen	2,5 .. 4,2 V
Nutzbarer Spannungsbereich	2,7 ... 4,1 V
Nennspannung	3,6 V
Max. Ladestrom (10 s)	≤ 150 A
Max. Entladestrom (10 s)	≤ 220 A
Dauerstrom	≤ 50 A

Es wurden zunächst Kapazitätstests bei den Stromraten 0,5C, 1C, 4C, 0,1C (Quasi-OCV), sowie Pulsmessungen in 10 % depth-of-discharge (DoD) Schritten mit 4C und einer Dauer von 20 s durchgeführt. Zudem wurden für die Anpassung eines Zellmodells Parametrierungsmessungen mittels Impedanzspektroskopie an drei Zellen bei 15°C, 25°C sowie 40°C durchgeführt. Hierbei betrug die Relaxationszeit zwischen den Messungen nach Einstellung eines neuen state-of-charge (SoC) jeweils 30 Minuten.

Exemplarisch für die erzielten Messergebnisse wird im Rahmen des Abschlussberichts auf die Kapazitätmessungen eingegangen, welche sich hinsichtlich ihres initialen Verhaltens als am interessantesten erwiesen. Weitere Messdaten sind unter anderem im Ergebnisbericht sowie in den Veröffentlichungen (teils zum Zeitpunkt der Berichterstellung noch nicht final erschienen – siehe auch Kapitel III.7, „Erfolge und geplante Veröffentlichungen“ auf Seite 34):

- S. Rothgang, T. Baumhöfer, D. U. Sauer, *“Diversion of Aging of Battery Cells in Automotive Systems”*: IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC, 2014, Coimbra, Portugal.
- S. Rothgang, T. Baumhöfer, D. U. Sauer: *„Disparity in Initial and Lifetime Parameters of Lithium-Ion Cells“*, IET Journal of Electrical Systems in Transportation, zur Publikation im Nachgang zur VPPC eingeladen, im Reviewprozess Februar 2015.

- S. Rothgang, T. Baumhöfer, D. U. Sauer: „Necessity and Methods to Improve Battery Lifetime on System Level“, akzeptiert für EVS28, Mai 2015, Seoul, Südkorea.

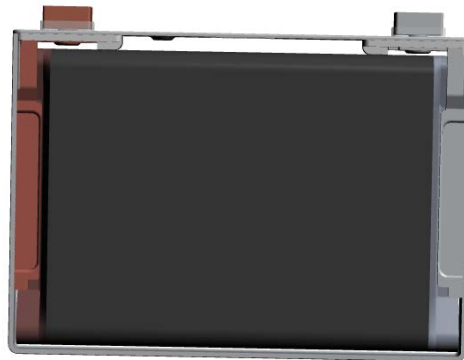


**Abbildung 15: Histogramme der Initialkapazitäten bei unterschiedlichen Stromraten.**

In Abbildung 15 sind die Histogramme der vermessenen, initialen Zellkapazitäten dargestellt. Gerade auch aufgrund der hohen Prüflingszahl würde man eine ausgeprägte Normalverteilung erwarten. Die mittlere Kapazität bei einer Entladerate von 1C ist 5,06 Ah mit einer Standardabweichung von 119,5 mAh. Diese hohe Abweichung und auch der visuelle Eindruck zeigt, dass vielmehr eine Bimodalverteilung vorliegt. Bei einer Unterteilung in zwei Zellchargen mit einer Kapazität unter bzw. über der Nennkapazität reduzieren sich die Standardabweichungen innerhalb der Chargen zu 52,2 mAh ( $\geq 5$  Ah) und 28,8 mAh ( $\leq 5$  Ah). Damit liegen die Zellen in einem Bereich 0,5 bis 1 % Standardabweichung und sind damit innerhalb der Chargen sehr gleichmäßig, da die Auswertung anderer Testmatrizen und Veröffentlichungen Standardabweichungen im Bereich von ca. 1,5 % aufweisen.

Neben der initialen elektrischen Vermessung der Zellen wurden im Rahmen der ersten Projektphase die Zellen ebenso thermisch charakterisiert. Hierzu wurden die Zellen zunächst einer Post-Mortem Analyse unterzogen, um die verbauten Materialien sowie die zugehörigen Geometrien exakt zu ermitteln. Darauf aufbauend wurde ein detailliertes

CAD-Zellmodell (siehe Abbildung 16) erstellt, in COMSOL überführt, mit den vorhandenen Materialparametern charakterisiert und darauf aufbauend die anisotrope Wärmeleitfähigkeit in die unterschiedlichen Achsrichtungen ermittelt. Diese Ermittlung erfolgte mittels der Aufzeichnung der Impulsantwort, welche durch eine hochauflösende Wärmebildkamera bei Anregung der Zelle mittels Blitzlampen respektive induktiver Anregung aufgezeichnet wurde, und dem anschließenden Fitting des COMSOL-Modells.

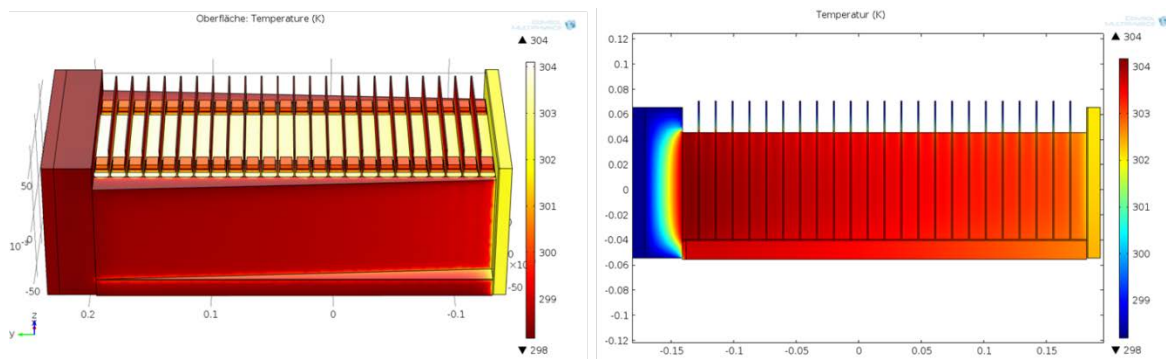


**Abbildung 16: Detailliertes Zellmodell des inneren Zellaufbaus.**

Aufbauend auf den initialen Zelluntersuchungen wurden die zu untersuchenden Modulkonfigurationen für die zweite Phase definiert und die Auslegung durchgeführt. Je 24 Zellen bilden in der Analyse ein Modul und es werden drei Module je Verschaltung analysiert. Die gewählten Verschaltungen sind

- 24 seriell verschaltete Zellen ohne Temperaturgradient
- 24 seriell verschaltete Zellen mit Temperaturgradient über das Modul
- 24 seriell verschaltete Zellen mit Temperaturgradient über das Modul und mehrreihiger Aufbau
- 2 benachbarte parallel x 12 seriell verschaltete Zellen mit Temperaturgradient über das Modul
- 2 parallel x 12 seriell verschaltete Zellen mit Temperaturgradient über das Modul und Mittelung durch Parallelschaltung passender Zellen
- 4 benachbarte parallel x 6 seriell verschaltete Zellen mit Temperaturgradient über das Modul
- 4 parallel x 6 seriell verschaltete Zellen mit Temperaturgradient über das Modul und Mittelung durch Parallelschaltung passender Zellen

Für die gewählten Module wurde anschließend eine Auslegung in COMSOL durchgeführt und hierbei das Kühl- und Isolationskonzept entwickelt, um den gewünschten Gradienten einstellen zu können. In Abbildung 17 ist exemplarisch die Auslegung für eines der Module dargestellt. Aufbauend auf diesen Auslegungen soll in der zweiten Projektphase die Alterung auf Modulebene untersucht werden. Hierzu wurden die einzelnen Teile vorbereitet und erste Modultests zur Einstellung sowie zur Erprobung des Messsystems mit modifiziertem BMS-CSC für 24 Zellen durchgeführt.



**Abbildung 17: Serielles Modul mit Kühlgradienten.**

### III.1.4 Verteilte Batteriemanagementsysteme für modulare Packs (AP6.8)

Im Rahmen von AP6.8 wurden im Berichtszeitraum 01.08.13 – 31.01.15 Labormuster und deren Software entwickelt. Die Labormuster umfassen Cells-Supervisory-Circuits (CSCs) mit aktiver, sowie passiver Zellsymmetrierung als Basis.

#### III.1.4.1 CSC mit aktiver Zellsymmetrierung

Unter CSC mit aktiver Zellsymmetrierung versteht man Zellcontroller Einheiten, welche in der Lage sind, eine Zellsymmetrierung im Batteriepack mittels Schaltelementen (etwa: MOSFETs) aktiv zu steuern. Damit ist man in der Lage, Zellen während des Betriebs umzuladen und so direkter, d.h. schneller auf Unsymmetrien in Kapazität und Innenwiderstand unter den Zellen einwirken zu können. Die Hardware dafür wurde im Rahmen vom Verbundvorhaben in verschiedenen Evolutionsstufen entwickelt und getestet. Die aktuellste Entwicklungsstufe ist in Abbildung 3 auf Seite 6 zu sehen.

Zusätzlich wurde während des Berichtszeitraumes eine weitere Funktion implementiert, welche sich ausschließlich in der Software-Ebene des CSCs findet: Die elektrochemische Impedanzspektroskopie (EIS).

Diese Methode ist in der Laborumgebung von Batteriezellcharakterisierungen z.B. zur Batteriemodellierung üblich. In der Feldanwendung mit Low-Cost Hardware jedoch derzeit nicht vorhanden. Durch die simple Erweiterung von Software-Modulen ist ein Begriff entstanden, der diese Funktionalitätengruppe widerspiegelt: Das Mehrwert-Batteriemanagementsystem.

Die Mehrwertfunktionalität ist in ihrer Ausführung im Ablaufdiagramm in Abbildung 18 gezeigt.

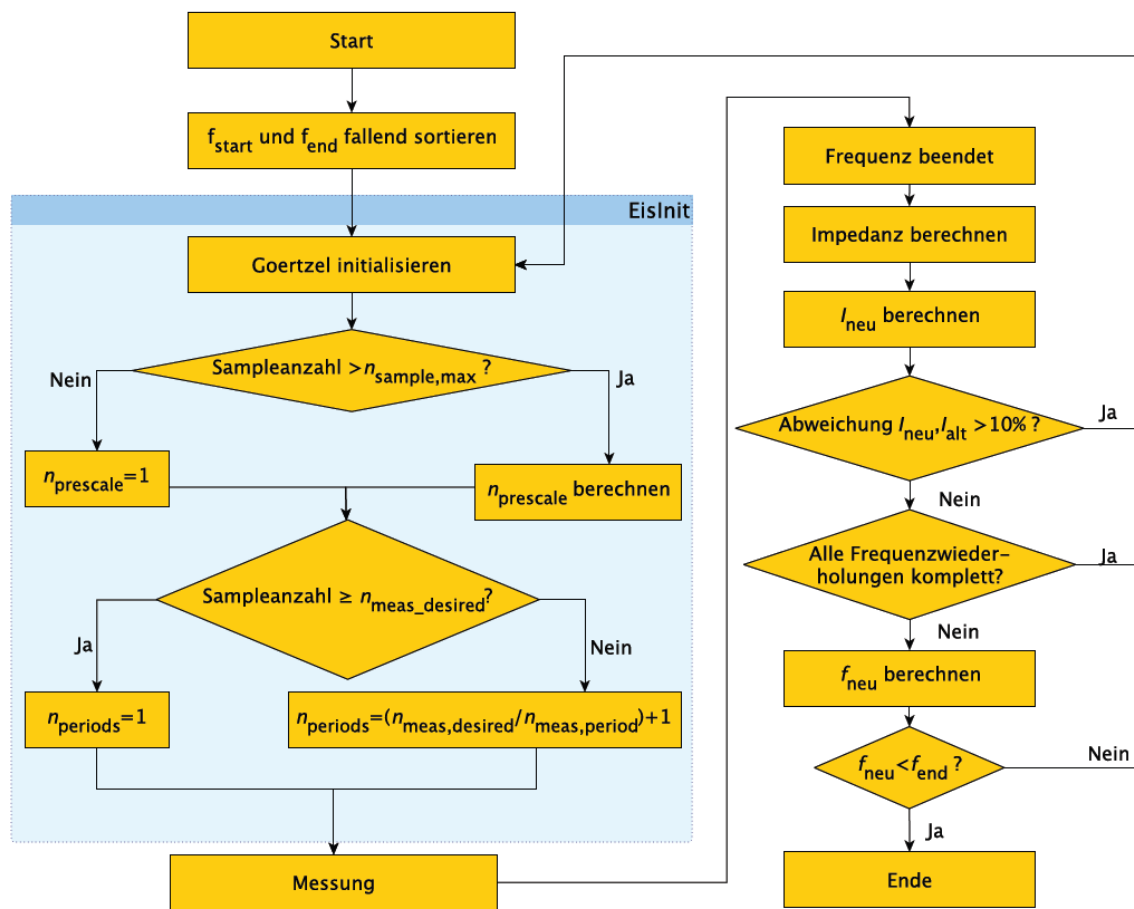
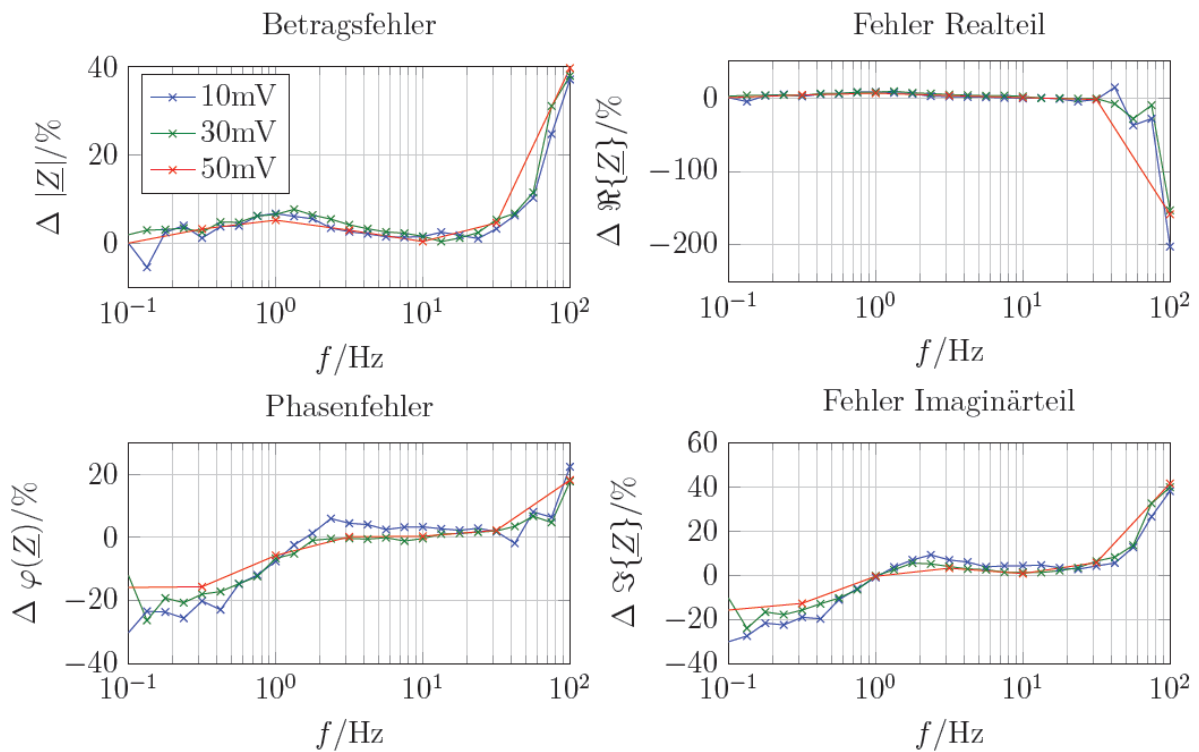


Abbildung 18: Ablaufdiagramm einer kompletten EIS-Messung.

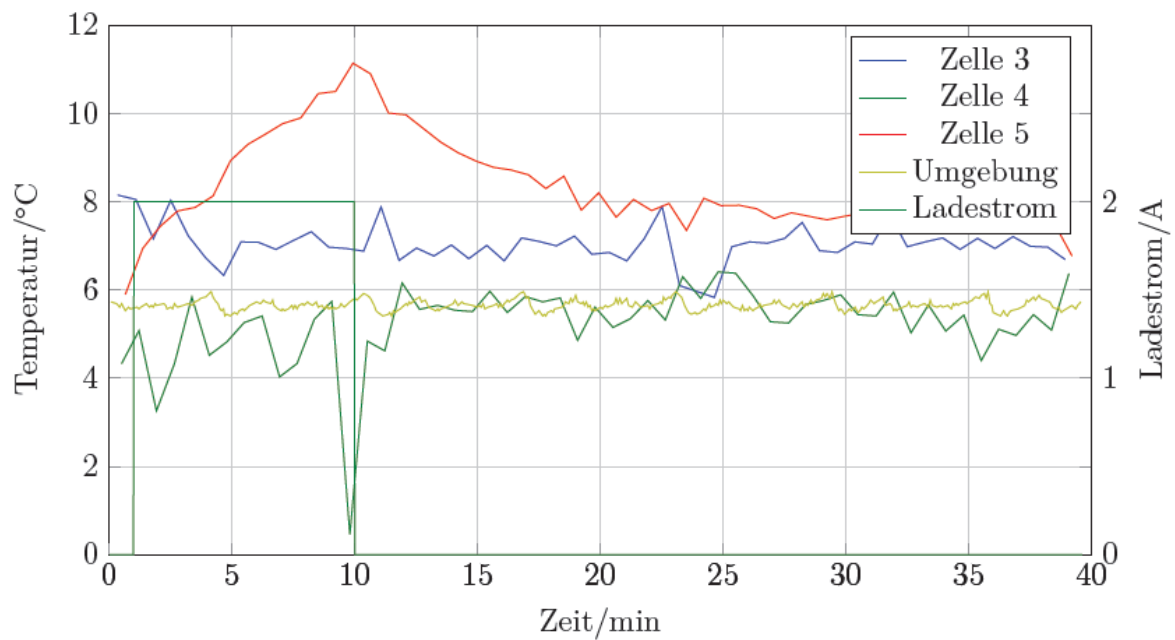
Messungen mit diesem System haben gezeigt (vgl. Zwischenbericht M06-M11), dass gute Ergebnisse im Frequenzbereich von 0,5 bis 80 Hz zu erreichen sind. In Abbildung 19 ist beispielhaft eine Vergleichsmessung zwischen einem professionellen Laborequipment, Digatron EISmeter und dem aktiven CSC aus Abbildung 3 zu sehen.



**Abbildung 19: Fehlerdarstellung von Betrag, Phase, sowie Real-/Imaginärteil als Kurvenschar verschiedener Anregungsamplituden (10 mV, 30 mV, 50 mV).**

Es konnte mittels EIS gezeigt werden, dass Temperaturmessungen ohne extern an der Zelle angebrachten Sensor möglich sind, was derzeit bereits Stand der Technik mit Laborequipment ist. Der Gewinn daraus, ist also eine nunmehr sehr anwendungsorientierte Lösung für Batteriepacks, um die Temperaturen im Kern der Zellen in jeder der seriell verschalteten Zellen zu ermitteln. In üblichen Batteriesystemen ist nicht jede Zelle mit einem physikalischen Temperatursensor ausgestattet. Somit bietet die Temperaturbestimmung jeder Zelle mittels Impedanzspektroskopie einen Mehrwert z.B. Sicherheitsgewinn durch schnellere Erfassung von zu heißen oder zu kalten Batteriezellen.

In Abbildung 20 ist exemplarisch zu sehen, dass die via EIS ermittelte Temperatur von Zelle 5 (rote Kurve) gegenüber den übrigen Zelltemperaturen ansteigt, da in jene Zelle ein signifikanter Ladestrom eingepreßt wurde.

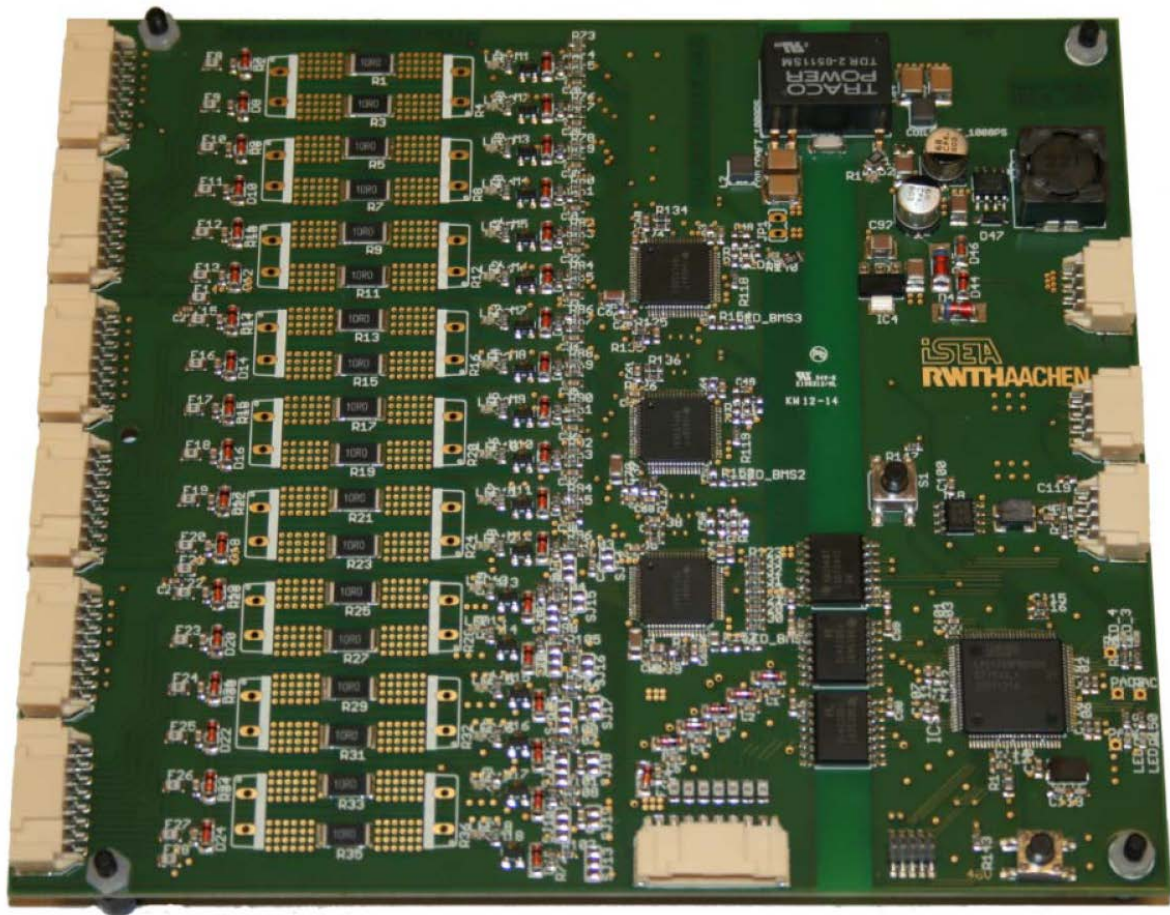


**Abbildung 20: Belastung einer Zelle im Pack und Aufnahme des Temperaturverlaufs mittels EIS auf einem CSC.**

#### III.1.4.2 CSC mit passiver Zellsymmetrierung

Eine Erweiterung aus Kapitel III.1.4.1 stellt das CSC mit passiver Zellsymmetrierung dar (Abbildung 21). Allgemein bekannt sind die Funktionen eines CSC mit passiver Zellsymmetrierung. Das sind im Wesentlichen Zellspannungsmessung, Zellsymmetrierung mittels ohmschen Widerständen, Temperaturmessung via resistiver Sensoren, Fehlerüberwachung (Über-/ Unterspannung sowie -temperatur), sowie Kommunikation via CAN-Bus mit dem BMS Master.

Erweitert, im Sinne des hier angetriebenen Projektfortschrittes, stellt sich das CSC mit einem Software-EIS Modul dar. Dabei steuert das CSC die Balancing Widerstände mit verschiedenen Frequenzen und Pulsweiten an, um danach die Quasi-Sprungantwort der Zellen zu vermessen. Der Strom durch die Zellen wird anhand der offenen Klemmenspannung und der bekannten Größe des Balancingwiderstands geschätzt.

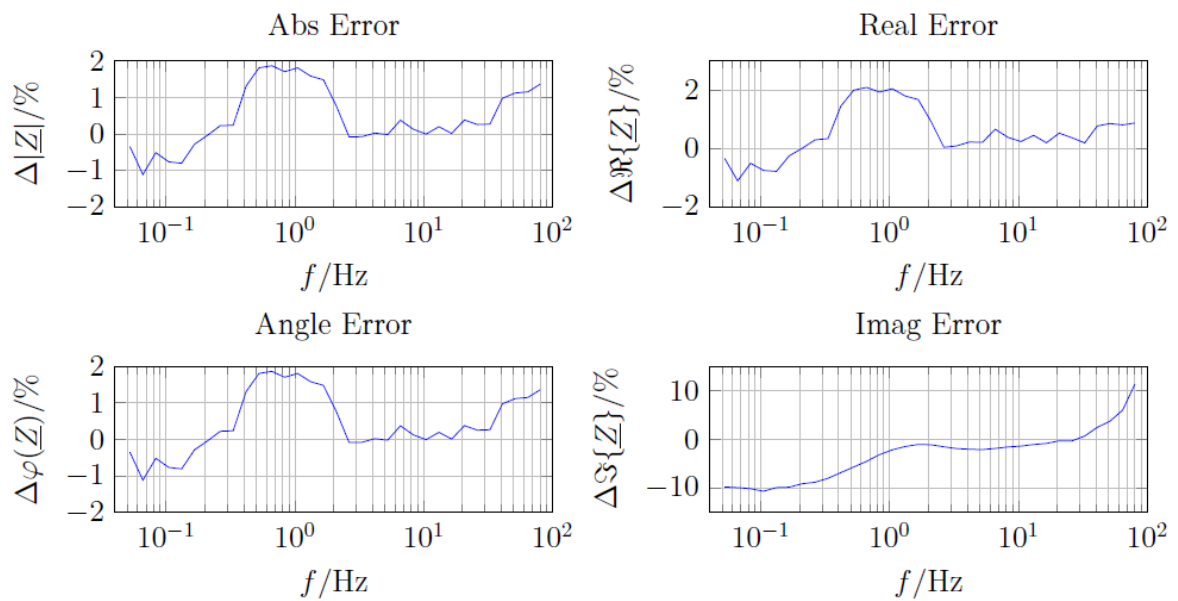


**Abbildung 21: Aktuelle Evolutionsstufe des Mehrwert-CSC mit passivem Zellbalancin.**

Eine Fehlermessung wurde, wie im vorherigen Kapitel auch, ebenfalls gemacht und ist in Abbildung 22 zu sehen. Man erkennt hier eine Genauigkeit, welche vergleichbar mit dem CSC mit aktiver Symmetrierung ist, wobei man einen sinnvoll nutzbaren Frequenzbereich von 0,05 bis 80 Hz zur Verfügung hat.

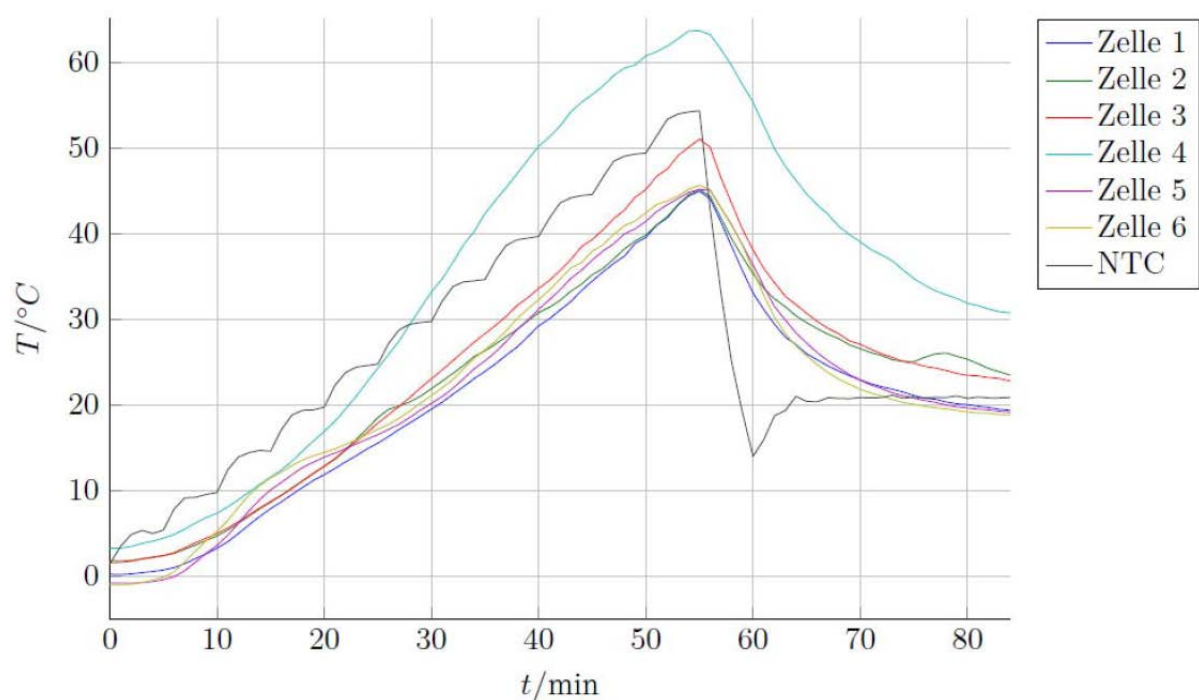
Die Tatsache, dass hierbei ausschließlich Hardware genutzt wurde, welche ohnehin in kommerziellen Batteriepacks zum Einsatz kommen könnte, zeigt, dass der Mehrwertcharakter beim CSC mit passiver Zellsymmetrierung besonders hoch ist.





**Abbildung 22: Fehlerdarstellung von Betrag, Phase, sowie Real-/Imaginärteil.**

Ein Test zur Temperaturermittlung verschiedener Einzelzellen via EIS wurde ebenfalls durchgeführt (Abbildung 23).



**Abbildung 23: Temperaturvermessung via EIS mithilfe des Mehrwehrt-CSC.**

Dabei ist eine stetige Temperaturmessung via EIS an einem 6s-Pack zu sehen. Zusätzlich wurde die Umgebungstemperatur mittels eines NTC aufgenommen – man erkennt sehr leicht die stufenartige Änderung des Temperatur-Istwertes der

---

Temperaturkammer. Die Zellkerntemperaturen folgen kontinuierlich. Man erkennt, dass eine der sechs Zellen stärker steigt, was durch eine Belastung mittels signifikantem Stromfluss durch allein diese Zelle zurückzuführen ist.

So ist es also möglich thermische Hotspots an Zellen und Modulen schneller zu erkennen, als das etwa mit Oberflächentempersensoren (NTC) möglich wäre.

Für Phase 2 ist eine Ausweitung dieses Themas geplant, indem verschiedene Zellen mittels EIS charakterisiert werden sollen, um die Temperatur nach diesem Verfahren online bestimmen zu können. Es sollen auch erweiterte Lookuptabellen eingesetzt werden, damit die Abhängigkeit zwischen Impedanz und Ladezustand (SOC), sowie Alterung (SOH) kompensiert werden kann. Ebenfalls ist eine Fehlerdiagnostik für die Zellzuleitungen geplant, welche mittels Software- und Hardwaremodul realisiert werden soll.

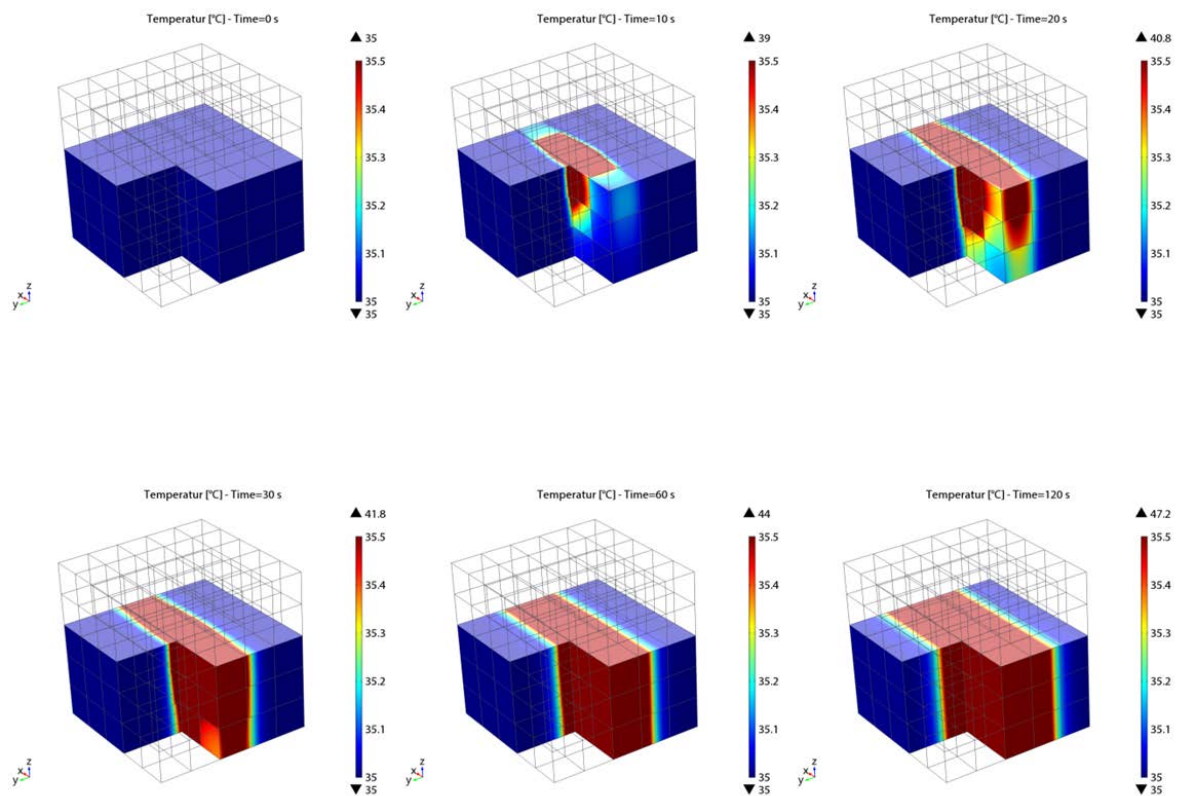
### **III.1.5 Modellbildung & Identifikation optimaler Sensorpositionen (AP6.9)**

#### III.1.5.1 Berichtszeitraum 01.08.13 – 31.01.15

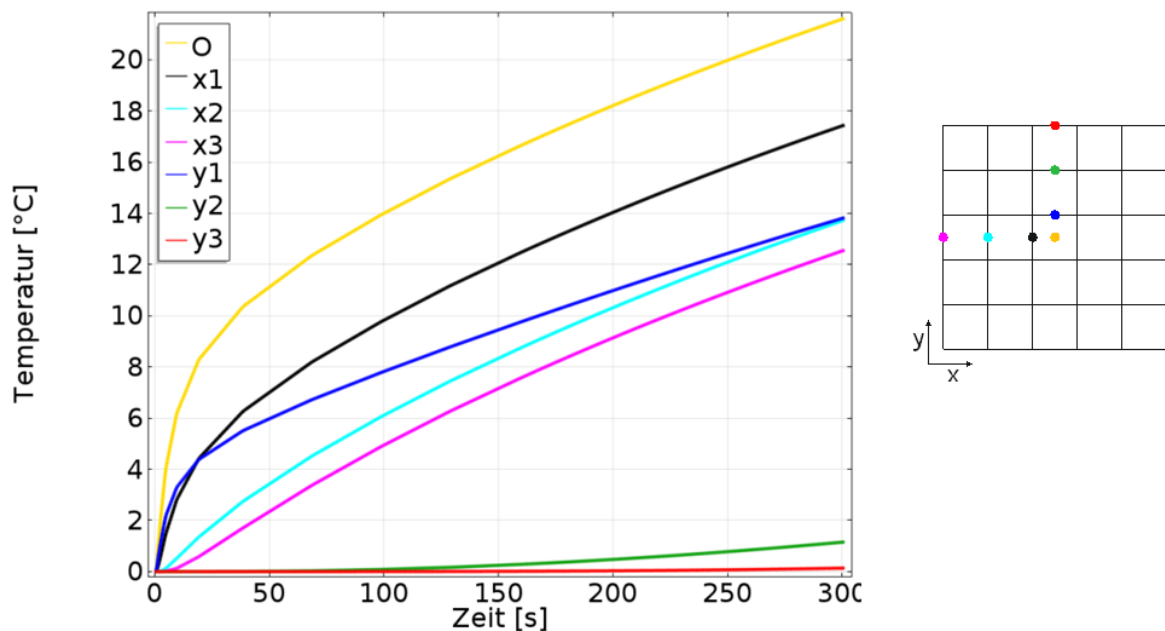
In Arbeitspaket 6.9 wurde der Ansatz untersucht, einerseits die Anzahl der verbauten Temperatursensoren zu reduzieren und andererseits über eine Modellierung des thermischen Verhaltens des Batterie-Packs bzw. des Batterie-Moduls trotz reduzierter Datenbasis in der Lage zu sein, auf die Temperaturen der Einzelzellen rückzuschließen.

Dazu wurden unterschiedlich konstruierte Batterie-Module in der FEM-Software COMSOL modelliert und im Hinblick auf ihre thermischen Eigenschaften analysiert. Dabei standen insbesondere der Einfluss der anisotropen Wärmeleitfähigkeit der Zellen, welche aus der geschichteten inneren Struktur von Lithium-Ionen-Zellen resultiert, sowie die Auswirkungen unterschiedlicher Kühl-Topologien auf die resultierende Temperaturverteilung im Batterie-Modul im Fokus.

Daher wurden zunächst einige simplifizierte Modul-Modelle betrachtet, um die Dynamik der Wärmeausbreitung mit Hilfe von transienten FEM-Simulationen zu analysieren. Wie man in den Abbildung 24 und Abbildung 25 erkennt, konnte durch die Simulation einer hypothetischen, würfelförmigen Zellanordnung gezeigt werden, dass die niedrige Wärmeleitfähigkeit in Schichtungsrichtung des Zellwickels eine große Zeitkonstante für die Ausbreitung von Wärmepulsen im Modul zur Folge hat. Bei reduzierter Sensorzahl erschwert dies die Detektion von transienten thermischen Prozessen, wie zum Beispiel dem thermischen Durchgehen einer Zelle.



**Abbildung 24: Volumen-Schnitt der würfelförmigen Zellanordnung. Ausgehend von einer homogenen Modultemperatur von 35 °C wird die Heizleistung des zentralen Zellelementes bei  $t = 1$  s um 10 W erhöht. Die zeitliche Entwicklung der Temperaturverteilung innerhalb des Moduls weist in Folge der anisotropen Wärmeleitfähigkeit des Zellwickels seinerseits eine starke Richtungsabhängigkeit auf.**



**Abbildung 25:** Zeitliche Entwicklung der Temperatur in °C an den oben gezeigten Sensorpositionen. Die gezeigte Schnittebene befindet sich auf der Höhe  $z = 37,5$  mm, sodass das Modell genau auf halber Höhe geschnitten wird.

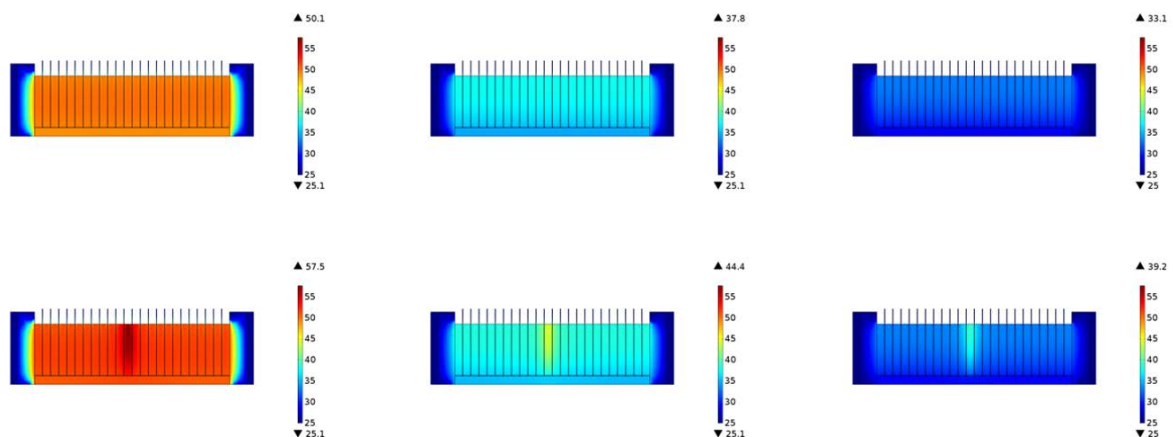
Die große Zeitkonstante des thermischen Systems wirkt also für den zeitlichen Verlauf der Temperaturverteilung wie ein Tiefpassfilter, sodass bei weiteren Simulationen von einem quasi-stationären Zustand des Moduls ausgegangen wird. Im Hinblick auf eine mögliche Reduktion der Anzahl verbauter Temperatursensoren ist in diesem Kontext zu analysieren, in welchem Radius um eine Zelle, deren Abwärme von der mittleren Abwärme der übrigen Zellen des Moduls abweicht, das abnorme Verhalten dieser Zelle noch zu detektieren ist. Da das thermische Verhalten stark von der Topologie des betrachteten Moduls abhängt, werden zur besseren Einordbarkeit der Simulationsergebnisse die in Arbeitspaket 6.5 ausgewählten Modul-Topologien als Grundlage für Modellierung und Simulation verwendet (siehe Abbildung 26).



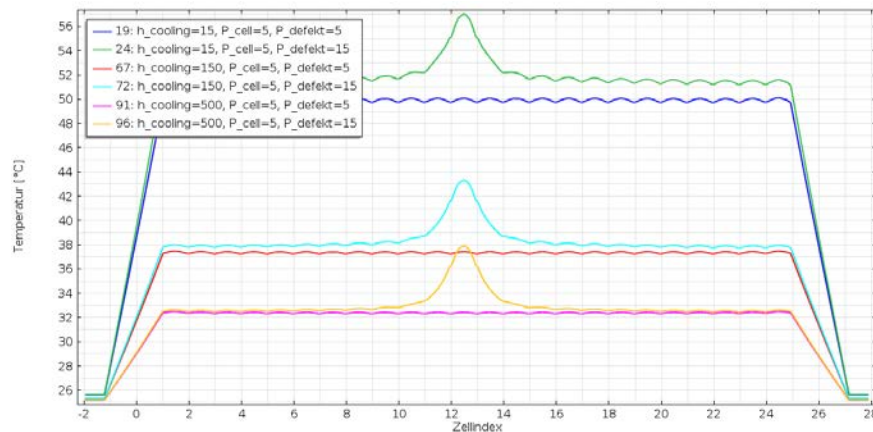
**Abbildung 26:** Batterie-Stack bestehend aus 24 prismatischen 5 Ah Hochleistungs-Li-Ionen Zellen.

Das Ziel dieser Simulationen war es, zu untersuchen, in wie weit sich charakteristische Abweichungen der quasi-statischen Temperaturverteilung von ihrem Normalzustand

nutzen lassen, um die Quelle dieser Abweichungen zu lokalisieren. Im Falle einer übermäßig gealterten bzw. defekten Zelle innerhalb des Stacks ist davon auszugehen, dass die Heizleistung und damit auch die Temperatur dieser Zelle signifikant erhöht sind und somit die Temperaturverteilung im Pack auch über den Bereich einiger benachbarter Zellen hinweg beeinflusst wird. Die in den Abbildung 27 und Abbildung 28 dargestellten Simulationsergebnisse zeigen, dass sich die erhöhte Temperatur einer einzelnen Zelle auch in einem über die Bodenplatte gekühlten Batteriemodul und trotz der transversal zur Schichtungsrichtung des Wickels niedrigen Wärmeleitfähigkeit der Zellen nicht auf diese eine Zelle beschränkt. Stattdessen erhöht sich im Fall einer geringen Kühlleistung die Temperatur aller Zellen im Modul (siehe grüne Kurve in Abbildung 28). Sofern der Normalzustand also über ein modellgestütztes Verfahren ermittelt werden kann, kann auch mit einer reduzierten Anzahl an Temperatursensoren eine Aussage zu möglicherweise defekten Zellen im Modul getroffen werden. Soll über einen modellgestützten Ansatz auf die Temperatur jeder einzelnen Zelle zurückgeschlossen werden und ein möglicher Einzel-Zell-Defekt so frühzeitig erkannt werden können, ist es jedoch in diesem Fall nicht möglich, die Sensor-Anzahl unter einen Wert von einem Sensor je drei Zellen zu reduzieren. Das Erarbeiten einer Methodik der analytischen Modellierung, die es erlauben soll, ein solches modellbasiertes Verfahren in eine BMS-Umgebung zu integrieren, wird Teil des Aufgabenbereichs von AP6.9 in der zweiten Projektphase sein.



**Abbildung 27: Temperaturverteilung im Stack bei Variation des Wärmeübergangskoeffizienten für die konvektive Kühlung der Grundplatte. Die obere Reihe zeigt die Situation bei homogener Verteilung der Heizleistung auf alle Zellen. V. l. n. r.: a)  $h_{cooling} = 15 \text{ W / (m}^2 \cdot \text{K)}$  b)  $h_{cooling} = 150 \text{ W / (m}^2 \cdot \text{K)}$  c)  $h_{cooling} = 500 \text{ W / (m}^2 \cdot \text{K)}$ . Die Heizleistung beträgt in allen drei Fällen 5 W pro Zelle. Die zweite Zeile zeigt die resultierende Temperaturverteilung für den Fall, dass die Heizleistung von Zelle 12 Anstelle von 5 W nun 15 W beträgt.**



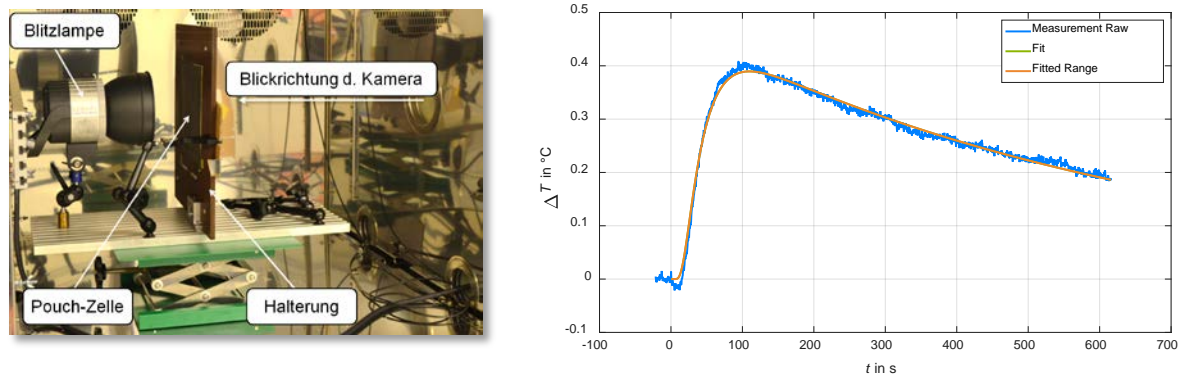
**Abbildung 28:** Temperaturprofil entlang einer Schnittgeraden in Längsrichtung durch den Stack, welche die Zellen mittig schneidet. Man erkennt gut, dass die erhöhte Heizleistung der zwölften Zelle bei niedrigen Kühlleistungen zu einer Erhöhung der mittleren Temperatur im gesamten Stack führt. In der direkten Umgebung der „defekten“ Zelle bilden sich große Temperaturgradienten aus, die jedoch bereits im Bereich der über-nächsten Nachbarzellen wieder stark abflachen. Im Falle hoher Kühlleistungen (gelbe Kurve) wo Abweichungen vom Normalzustand stark auf die Umgebung des „Defektes“ begrenzt sind, wäre bei einer sensorikbedingten Temperaturauflösung von 0,5°C lediglich im Bereich der Zellen 10 bis 15 eine Abweichung vom thermischen Normalzustand des Packs messbar.

### III.1.5.2 Berichtszeitraum 01.02.15 – 30.04.15

Zur Optimierung der Parametrierungen der Simulationsmodelle wurden am ISEA im Berichtszeitraum vom 01.02.15 – 30.04.15 Batteriezellen thermisch vermessen, um die bislang verwendeten Literaturwerte zu validieren. Insbesondere die thermischen Materialparameter Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität sind für neue Zelltypen in der Regel nicht bekannt und müssen daher abgeschätzt oder vermessen werden. Im Rahmen früherer Projekte wurden am ISEA Prüfstände entwickelt, um diese Größen zuverlässig bestimmen zu können.

Das zur Messung der Wärmeleitfähigkeit eingesetzte Verfahren, basiert auf der im Laborbereich üblichen Laser-Flash-Methode und wurde zur Messung ganzer Zellen adaptiert. Eine Aufnahme dieses Messaufbaus ist in Abbildung 29a gezeigt. Zur Messung wird die Zell-Vorderseite mit Hilfe eines hochenergetischen Impulses aus einer Xenon-Blitzleuchte thermisch angeregt und in der Folge der zeitliche Temperaturverlauf auf der Zellrückseite mit einer hochauflösenden Infrarot-Kamera thermografisch vermessen. Über ein modellgestütztes Auswertungsverfahren wird ein analytisches Modell für diesen Temperaturverlauf an die Messdaten angepasst und auf diese Weise ein Wert für die Temperaturleitfähigkeit des Materials ermittelt. Bei bekannter Dichte  $\rho$  und Wärmekapazität  $c_p$  der Probe kann daraus über Formel ( 1 ) die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  der Zelle berechnet werden.

$$\lambda(T) = \alpha(T) \rho(T) c_p(T) \quad (1)$$



**Abbildung 29: (a) - Links: Aufbau zur thermografischen Messung der Wärmeleitfähigkeit einer Batteriezelle nach der Laser-Flash-Methode. (b) - Rechts: Zeitlicher Temperaturverlauf nach Anregung bei  $t = 0$  s auf der Rückseite einer 46 Ah Pouchzelle bei einer Umgebungstemperatur von  $0$  °C. Aus der Parameteroptimierung ergibt sich eine Temperaturleitfähigkeit von  $\alpha(T = 0$  °C) =  $(0,5371 \pm 0,0033)$  mm<sup>2</sup>/s.**

Während des zweiten Berichtszeitraumes wurde so die Wärmeleitfähigkeit verschiedener Zellen vermessen und in die im ersten Berichtszeitraum erstellten Simulationen integriert. Ein typisches Messergebnis ist exemplarisch in Abbildung 29b gezeigt. Man erkennt, dass die Messdaten und das daran angepasste analytische Modell gut übereinanderliegen, was zeigt, dass das Experiment durch das gewählte Modell hinreichend genau beschrieben werden kann. Das in dieser Messung mit einer Abweichung vom Messwert von  $\pm 0,61$  % sehr kleine 95 %-Konfidenzintervall unterstützt dieses Ergebnis. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Parametrierungen und darüber auch die Verlässlichkeit der thermischen Modelle durch die Vermessung der Wärmeleitfähigkeit deutlich verbessert werden konnten, indem Literatur- und Schätzwerte durch genaue Messwerte ersetzt wurden.

### III.1.6 Aufbau und Inbetriebnahme eines Hardware-in-the-Loop Prüfstands für Batteriemanagementsysteme (AP8.1)

Die RWTH hat im Rahmen von AP 8.1 im Berichtszeitraum 01.08.13 – 31.01.15 die Konzeption, Spezifikation, Beschaffung und Inbetriebnahme eines Hardware-in-the-Loop (HiL) Prüfstands für Batteriemanagementsysteme (BMS) durchgeführt und im Ergebnisbericht E8.1 zusammengefasst. Der Prüfstand dient zum Testen der im Rahmen des Projekts entwickelten Komponenten eines modularen Batteriemanagementsystems. Hierfür werden alle relevanten Signale und Größen die das BMS in einem realen Batteriepack erfasst durch den HiL-Prüfstand nachgebildet. Hauptkomponenten des Prüfstands sind hierfür eine Vielzahl von regelbaren Spannungsquellen zur Batteriezellnachbildung sowie ein Echtzeitrechner, auf dem ein Batteriezellmodell ausgeführt wird. Abbildung 30 illustriert das Konzept des Prüfstands: Durch die Emulation des Verhaltens einer kompletten HV-Batterie sind realistische Tests des BMS möglich. Insbesondere können so auch kritische Betriebszustände (bspw. Überladung) nachgestellt werden, und die korrekte Reaktion des BMS hierauf überprüft werden. Dies ist mit echten Zellen aus Sicherheitsgründen in der Regel nicht möglich. Ein weiterer Vorteil ist die Reproduzierbarkeit von Ergebnissen: Durch das komplexe, nichtlineare Verhalten von Batteriezellen sind Prüfbedingungen oft nur mit großem

Aufwand reproduzierbar. Dies betrifft zum Beispiel das Testen von Algorithmen zum Ladezustandsausgleich.

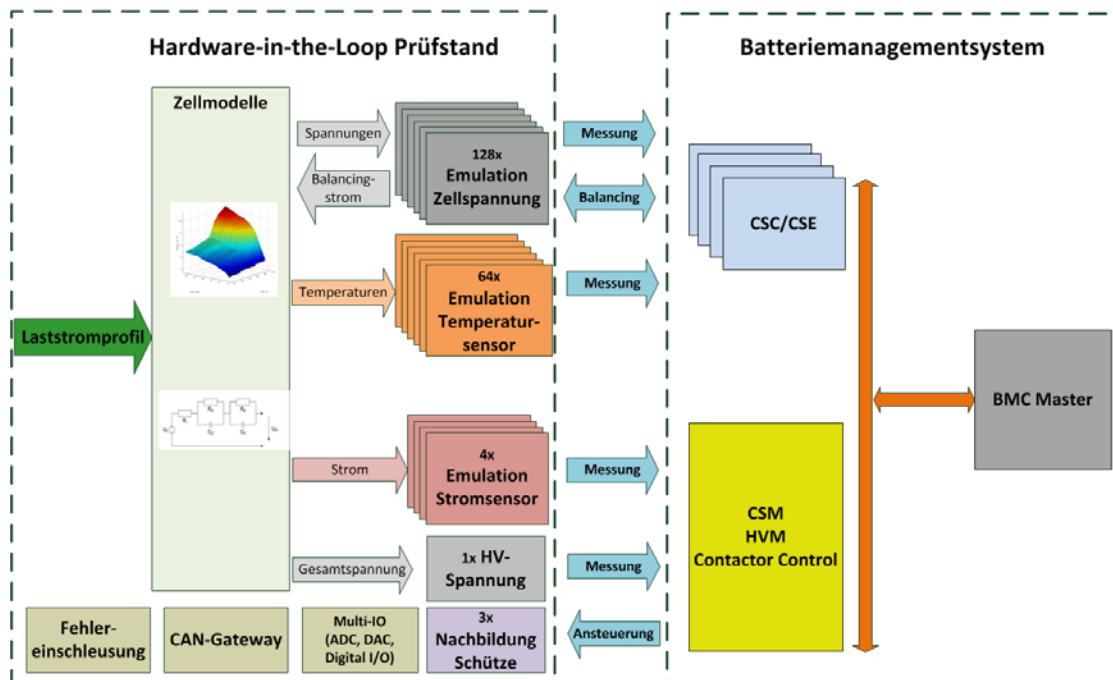
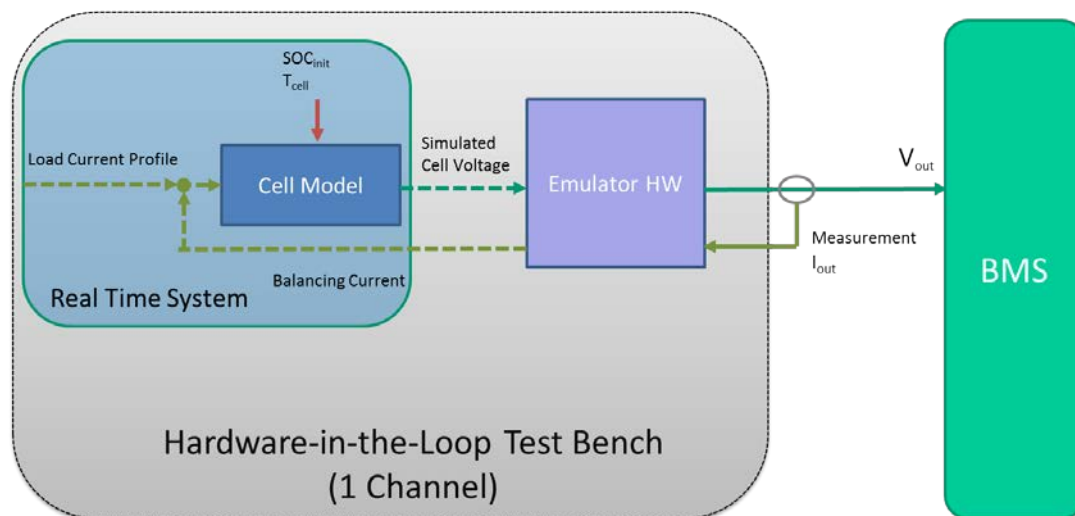


Abbildung 30: Konzept HiL-Prüfstand für BMS.

Kernstück des Prüfstands sind die 128 Kanäle zur Emulation von Batteriezellen. Die Funktionsweise ist in Abbildung 31 illustriert: Das auf dem Echtzeitrechner laufende Zellmodell erhält als Eingangsgröße ein Lastprofil. Dies kann z.B. ein typisches Stromprofil für ein Elektrofahrzeug sein. Die berechnete Spannungsantwort der Zelle wird durch spezielle Emulator-Hardware in eine messbare Spannung umgewandelt, die dann dem BMS zugeführt wird, und von diesem gemessen werden kann. Da das BMS in der Lage ist, einen Ladezustandsausgleich durchzuführen, muss der Ausgangsstrom des Zellemulationskanals gemessen werden. Dieser gemessene Wert wird dem simulierten Lastprofil überlagert, und dem Modell zugeführt.

Zusätzlich dazu stehen am Prüfstand eine Vielzahl von weiteren I/O-Kanälen zur Verfügung, beispielsweise zur Emulation von Stromsensor und Temperatursensoren. Zur Emulation von Fehlerfällen steht eine Reihe von HV-Relais zur Verfügung, mit denen beispielsweise Fehler im Kabelbaum nachgebildet werden können.





**Abbildung 31: Funktionsweise Zellemulation.**

Die Implementierung der notwendigen Modelle umfasst die Anpassung von vorhandenen elektrischen Zellmodellen für die Echtzeitanwendung auf dem Prüfstand. Hierfür wurden insbesondere Tools erstellt, mit denen sich statistische Schwankungen der Zelleigenschaften in die Parametrierung der individuell simulierten Zellen einbringen lassen. Zur Emulation der Zelltemperatursensoren wurde ein thermisches Modell der einzelnen Batteriezellen erstellt. Dieses basiert auf einem thermischen Ersatzschaltbild und erhält als Eingangsgröße die thermische Verlustleistung, die im elektrischen Zellmodell berechnet wird. Hiermit lassen sich plausible Sensordaten emulieren. Des Weiteren wurde ein elektrisches Modell der Vorladeeinheit und Schütze erstellt. Diese Modelle wurden in MATLAB/Simulink mit den zur Ansteuerung des Prüfstands notwendigen Modellkomponenten gekoppelt. Nachdem der Prüfstand Anfang Dezember 2014 durch die Fa. dSpace geliefert wurde, konnten im Anschluss erste Tests mit dem System durchgeführt werden.



**Abbildung 32: HiL-Prüfstand (links) und Versuchsaufbau mit Zellcontrollerplatine (rechts).**

---

In Abbildung 32 ist der Prüfstand, sowie ein erster Versuchsaufbau für die Inbetriebnahme, gezeigt. Hierfür wurde eine Zellcontrollerplatine (CSC) der RWTH an den Prüfstand angeschlossen. Für erste Versuche wurde ein Strang von 18 Batteriezellen simuliert, und verschiedene Versuche mit simulierten Lade- und Entladevorgängen (inklusive Balancing) durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass sich das Verhalten eines Batteriestrangs durch den HiL-Prüfstand sehr gut nachbilden lässt.

## III.2 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

### III.2.1 **Bereits veröffentlicht**

T. Zimmermann, M. Hofmann, A. Jossen, S. Rothgang, H. Nordmann, D. U. Sauer, *DriveBattery2015 – Untersuchungen an vielzelligen und modularen Batteriesystemen*, Batterieforum 2014, Berlin, 2014.

D. Jabs, C. Jungemann, *Avalanche Breakdown of pn-junctions – Simulation by Spherical Harmonics Expansion of the Boltzmann Transport Equation*, International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices (SISPAD), pp. 173-176 Yokohama, Japan, Sept. 2014.

S. Rothgang, T. Baumhöfer, D. U. Sauer, *Diversion of Aging of Battery Cells in Automotive Systems*: IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC, Coimbra, Portugal, 2014.

H. Nordmann, *Projektvorstellung DriveBattery2015*, Kompetenztreffen Elektromobilität NRW 2015, Essen, 2015.

H. Nordmann, M. Schüßler, D.U. Sauer, *Implementierung von EIS Messverfahren auf passiver Balancierelektronik*, Batterieforum 2015, Berlin, 2015.

### III.2.2 **Geplante Veröffentlichungen**

H. Zappen, *Verifizierung von Batteriemanagementsystemen durch Hardware-in-the-Loop Tests: Testszenarien und Fehlereinschleusung*, Entwicklerforum Batterien & Ladekonzepte, München, 2015.

S. Rothgang, T. Baumhöfer, D. U. Sauer, *Disparity in Initial and Lifetime Parameters of Lithium-Ion Cells*, *IET Journal of Electrical Systems in Transportation*, zur Publikation im Nachgang zur VPPC eingeladen, im Reviewprozess Februar 2015.

S. Rothgang, T. Baumhöfer, D. U. Sauer, *Necessity and Methods to Improve Battery Lifetime on System Level*, akzeptiert für EVS28, Seoul, Südkorea, Mai 2015.

D. Jabs, C. Jungemann, K. H. Bach, *A robust Algorithm for Microscopic Simulation of Avalanche Breakdown in Semiconductor Devices*, im Genehmigungsprozess bei Infineon, 2015.

---

## IV. Anhang:

### IV.1 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Überblick der Zellparameter. ....	17
--	----

### IV.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Am ISEA entwickelte Balancingeinheiten, schematisch (links), Hardware (rechts), sowie passiv (oben) und aktiv (unten).....	4
Abbildung 2: Organisation der Arbeitspakete des Verbundprojektes DriveBattery2015. ....	5
Abbildung 3: CSC zur aktiven Zellsymmetrierung und Impedanzspektroskopie. ....	6
Abbildung 4: Steuerung der Leistungsaufteilung durch den Energiemanager. ....	7
Abbildung 5: Strategie zum Ausgleich der Ladezustände. ....	8
Abbildung 6: Dynamische Leistungsaufteilung (Bat 1: High Energy, Bat 2: High Power). ....	9
Abbildung 7: Verlustleistung in Abhängigkeit der Leistungsaufteilung für einen Ausschnitt aus einem Leistungsprofil (200 Sekunden).....	10
Abbildung 8: Vergleich der erreichten Verlustleistung der beschriebenen Leistungsaufteilungsstrategien.....	11
Abbildung 9: Dichten und Generationsraten von Elektronen (durchgezogen) und Löchern (gestrichelt).....	13
Abbildung 10: Potential und Geschwindigkeiten von Elektronen (durchgezogen) und Löchern (gestrichelt).....	13
Abbildung 11: Energieverteilungsfunktionen von Elektronen und Löchern mit SHE (durchgezogen) und MC (gestrichelt).....	14
Abbildung 12: Konvergenz des Algorithmus (links) im zusätzlich eingeführten Parameter sowie in der Generationsrate aufgrund von Stoßionisation innerhalb von 7 Iterationsschritten und HC-Dichten (rechts) von Elektronen (rot) und Löchern (schwarz) ab Teilchenenergien von 1eV bis 3eV entlang der normierten Pfadlänge der Si/SiO <sub>2</sub> - Grenze des vertikalen NMOSFETs (x=1 entspricht dabei dem rechten unteren Ende der Grenze).....	15
Abbildung 13: Potential und Generationsraten durch Elektron/Loch-Stoßionisations in der Raumladungszone eines vertikalen Leistungs-NMOSFETs für eine Source-/ Drain-Spannung von 35,83 V, 0 V Spannung an allen anderen Kontakten und eine Stromdichte von 10 pA/μm <sup>2</sup> .....	15
Abbildung 14: Injektionswahrscheinlichkeiten bei versch. Gate-/ Substratspannungen – durchgezogene Linien: Ergebnisse des verbesserten Simulators; gestrichelte Linien: Messdaten aus Literatur.....	16
Abbildung 15: Histogramme der Initialkapazitäten bei unterschiedlichen Stromraten.....	18
Abbildung 16: Detailliertes Zellmodell des inneren Zellaufbaus. ....	19
Abbildung 17: Serielles Modul mit Kühlgradienten.....	20
Abbildung 18: Ablaufdiagramm einer kompletten EIS-Messung.....	21
Abbildung 19: Fehlerdarstellung von Betrag, Phase, sowie Real-/Imaginärteil als Kurvenschaar verschiedener Anregungsamplituden (10 mV, 30 mV, 50 mV).....	22
Abbildung 20: Belastung einer Zelle im Pack und Aufnahme des Temperaturverlaufs.....	23
Abbildung 21: Aktuelle Evolutionsstufe des Mehrwert-CSC mit passivem Zellbalancin.....	24

---

Abbildung 22: Fehlerdarstellung von Betrag, Phase, sowie Real-/Imaginärteil. ....	25
Abbildung 23: Temperaturvermessung via EIS mithilfe des Mehrwehrt-CSC. ....	25
Abbildung 24: Volumen-Schnitt der würfelförmigen Zellanordnung. Ausgehend von einer homogenen Modultemperatur von 35 °C wird die Heizleistung des zentralen Zellelementes bei t = 1 s um 10 W erhöht. Die zeitliche Entwicklung der Temperaturverteilung innerhalb des Moduls weist in Folge der anisotropen Wärmeleitfähigkeit des Zellwickels seinerseits eine starke Richtungsabhängigkeit auf. ....	27
Abbildung 25: Zeitliche Entwicklung der Temperatur in °C an den oben gezeigten Sensorpositionen. Die gezeigte Schnittebene befindet sich auf der Höhe z = 37,5 mm, sodass das das Modell genau auf halber Höhe geschnitten wird. ....	28
Abbildung 26: Batterie-Stack bestehend aus 24 prismatischen 5 Ah Hochleistungs-Li-Ionen Zellen. ....	28
Abbildung 27: Temperaturverteilung im Stack bei Variation des Wärmeübergangskoeffizienten für die konvektive Kühlung der Grundplatte. Die obere Reihe zeigt die Situation bei homogener Verteilung der Heizleistung auf alle Zellen. V. l. n. r.: a) $h_{cooling} = 15 \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})$ b) $h_{cooling} = 150 \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})$ c) $h_{cooling} = 500 \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K})$ . Die Heizleistung beträgt in allen drei Fällen 5 W pro Zelle. Die zweite Zeile zeigt die resultierende Temperaturverteilung für den Fall, dass die Heizleistung von Zelle 12 Anstelle von 5 W nun 15 W beträgt. ....	29
Abbildung 28: Temperaturprofil entlang einer Schnittgeraden in Längsrichtung durch den Stack, welche die Zellen mittig schneidet. Man erkennt gut, dass die erhöhte Heizleistung der zwölften Zelle bei niedrigen Kühlleistungen zu einer Erhöhung der mittleren Temperatur im gesamten Stack führt. In der direkten Umgebung der „defekten“ Zelle bilden sich große Temperaturgradienten aus, die jedoch bereits im Bereich der über-nächsten Nachbarzellen wieder stark abflachen. Im Falle hoher Kühlleistungen (gelbe Kurve) wo Abweichungen vom Normalzustand stark auf die Umgebung des „Defektes“ begrenzt sind, wäre bei einer sensorikbedingten Temperaturauflösung von 0,5°C lediglich im Bereich der Zellen 10 bis 15 eine Abweichung vom thermischen Normalzustand des Packs messbar. ....	30
Abbildung 29: (a) - Links: Aufbau zur thermografischen Messung der Wärmeleitfähigkeit einer Batteriezelle nach der Laser-Flash-Methode. (b) - Rechts: Zeitlicher Temperaturverlauf nach Anregung bei t = 0 s auf der Rückseite einer 46 Ah Pouchzelle bei einer Umgebungstemperatur von 0 °C. Aus der Parameteroptimierung ergibt sich eine Temperaturleitfähigkeit von $\alpha T = 0 \text{ °C} = (0,5371 \pm 0,0033) \text{ mm}^2\text{s}$ . ....	31
Abbildung 30: Konzept HiL-Prüfstand für BMS. ....	32
Abbildung 31: Funktionsweise Zellemulation. ....	33
Abbildung 32: HiL-Prüfstand (links) und Versuchsaufbau mit Zellcontrollerplatine (rechts). ....	33

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN --	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Abschlussbericht
3. Titel Abschlussbericht Phase 1 des Verbundprojektes DriveBattery2015 (01.08.2013 – 30.04.2015)	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Baumhöfer, Thorsten <sup>1</sup> ; Becker, Jan <sup>1</sup> ; Jabs, Dominic <sup>2</sup> ; Jungemann, Christoph <sup>2</sup> ; Nemeth, Thomas <sup>1</sup> ; Nordmann, Hannes <sup>1</sup> ; Ritz, Simon <sup>1</sup> ; Rothgang, Susanne <sup>1</sup> ; Sauer, Dirk Uwe <sup>1</sup> ; Zappen, Hendrik <sup>1</sup> 1) ISEA-RWTH 2) ITHE-RWTH	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.04.2015  6. Veröffentlichungsdatum 21.05.15  7. Form der Publikation Schlussbericht – nicht öffentlich
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)  Institut f. Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA-RWTH) Jägerstraße 17-19 52066 Aachen  Institut für Theoretische Elektrotechnik (ITHE-RWTH) Kackertstraße 15-17 52072 Aachen	9. Ber. Nr. Durchführende Institution   10. Förderkennzeichen 03ET6003G  11. Seitenzahl 36
12. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 53107 Bonn	13. Literaturangaben 5  14. Tabellen 1  15. Abbildungen 32
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Projektträger Jülich, Forschungszentrum Jülich GmbH	
18. Kurzfassung  Die wesentlichen Ziele des Vorhabens aus Sicht der RWTH Aachen fokussieren Energiemanagement in Multi-Pack-Systemen, simulative Betrachtungen von physikalischen Halbleitermodellen, sowie deren Erstellung, Untersuchungen von Zellkonzepten zur Darstellung thermischer Alterungseffekte auf Modulniveau, Erweiterungen eines modularen Batteriemanagementsystems unter besonderer Berücksichtigung von Mehrwertfunktionalitäten, sowie die thermische Modellbildung auf Packlevel mit Ableitung von optimalen Temperatursensorpositionen. Abschließend besteht der letzte große Punkt aus der Erarbeitung von Fehlerinduktionsmodellen und –szenarien in Batteriepacks auf Hardwarelevel.	
19. Schlagwörter Energiemanager, Hot-Carrier-Effekte, Mehrwert-BMS, thermische Modulverschaltung, Optimierung Tempertursensorpositionen, Hardware-in-the-Loop Tester, Fehlerinduktionsmodell.	
20. Verlag --	21. Preis --

## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN --	2. type of document (e.g. report, publication) Report
3. title Final report, phase 1 of collaborative project "DriveBattery2015" (August, 1 <sup>st</sup> , 2013 – April, 30 <sup>th</sup> , 2015)	
4. author(s) (family name, first name(s)) Baumhöfer, Thorsten <sup>1</sup> ; Becker, Jan <sup>1</sup> ; Jabs, Dominic <sup>2</sup> ; Jungemann, Christoph <sup>2</sup> ; Nemeth, Thomas <sup>1</sup> ; Nordmann, Hannes <sup>1</sup> ; Ritz, Simon <sup>1</sup> ; Rothgang, Susanne <sup>1</sup> ; Sauer, Dirk Uwe <sup>1</sup> ; Zappen, Hendrik <sup>1</sup> 1) ISEA-RWTH 2) ITHE-RWTH	5. end of project 30.04.15  6. publication date 21.05.15  7. form of publication Final report – not public.
8. performing organization(s) (name, address)  Institut f. Stromrichtertechnik und Elektrische Antriebe (ISEA-RWTH) Jägerstraße 17-19 52066 Aachen  Institut für Theoretische Elektrotechnik (ITHE-RWTH) Kackertstraße 15-17 52072 Aachen	9. originator's report no.   10. reference no. 03ET6003G  11. no. of pages 36
12. sponsoring agency (name, address)  Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) 53107 Bonn	13. no. of references 5  14. no. of tables 1  15. no. of figures 32
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date) Projektträger Jülich, Forschungszentrum Jülich GmbH	
18. abstract  This collaborative project's essential targets in the RWTH Aachen University's point of view focus energymanagement in multi pack systems, simulative inspection of physical semiconductor models, as well as their development; Investigations of cell concepts to display thermal ageing effects at cellmodule level. Furthermore targeted are enhancements of the modular battery management system with special focus on added-value functionality, as well as thermal modelling of packs including a derivation of optimal positions of temperature sensors. Finally the project's aim is to develop fault induction models and scenarios on battery packs (hardware level).	
19. keywords Energymanager, Hot-Carrier-Effects, added-value-BMS, thermal module interconnection, optimization of temperature sensor positioning, Hardware-in-the-Loop tester, fault induction model.	
20. publisher --	21. price --