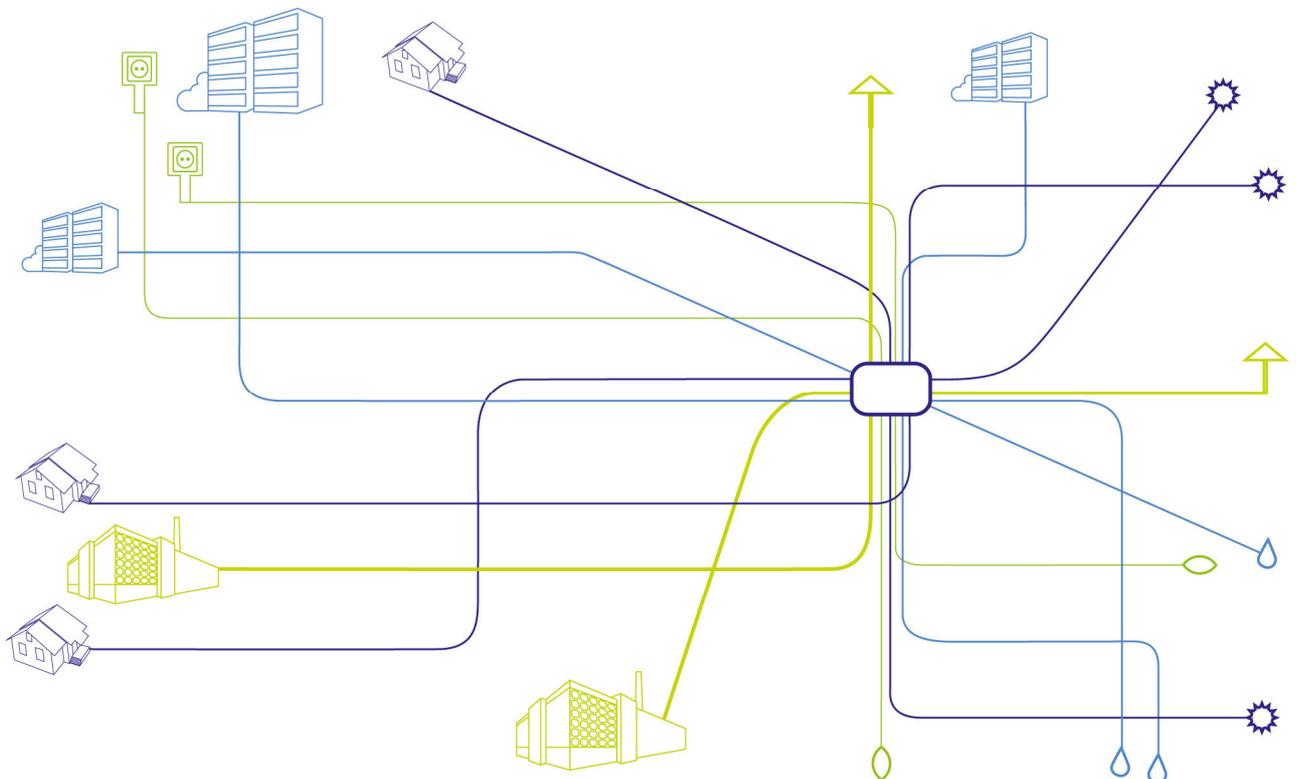




Lithium Ionen Batteriesystem

Entwicklung 2010



VORWORT

Die Publikationsreihe **BLUE GLOBE REPORT** macht die Kompetenz und Vielfalt, mit der die österreichische Industrie und Forschung für die Lösung der zentralen Zukunftsaufgaben arbeiten, sichtbar. Strategie des Klima- und Energiefonds ist, mit langfristig ausgerichteten Förderprogrammen gezielt Impulse zu setzen. Impulse, die heimischen Unternehmen und Institutionen im internationalen Wettbewerb eine ausgezeichnete Ausgangsposition verschaffen.

Jährlich stehen dem Klima- und Energiefonds bis zu 150 Mio. Euro für die Förderung von nachhaltigen Energie- und Verkehrsprojekten im Sinne des Klimaschutzes zur Verfügung. Mit diesem Geld unterstützt der Klima- und Energiefonds Ideen, Konzepte und Projekte in den Bereichen Forschung, Mobilität und Marktdurchdringung.

Mit dem **BLUE GLOBE REPORT** informiert der Klima- und Energiefonds über Projektergebnisse und unterstützt so die Anwendungen von Innovation in der Praxis. Neben technologischen Innovationen im Energie- und Verkehrsbereich werden gesellschaftliche Fragestellung und wissenschaftliche Grundlagen für politische Planungsprozesse präsentiert. Der **BLUE GLOBE REPORT** wird der interessierten Öffentlichkeit über die Homepage www.klimafonds.gv.at zugänglich gemacht und lädt zur kritischen Diskussion ein.

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm „Neue Energien 2020“. Mit diesem Programm verfolgt der Klima- und Energiefonds das Ziel, durch Innovationen und technischen Fortschritt den Übergang zu einem nachhaltigen Energiesystem voranzutreiben.

Wer die nachhaltige Zukunft mitgestalten will, ist bei uns richtig: Der Klima- und Energiefonds fördert innovative Lösungen für die Zukunft!

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Theresia Vogel'.

Theresia Vogel
Geschäftsführerin, Klima- und Energiefonds

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Ingmar Höbarth'.

Ingmar Höbarth
Geschäftsführer, Klima- und Energiefonds

1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis	1
2	Kurzfassung	2
3	Abstract	3
4	Einleitung	4
5	Inhaltliche Darstellung	7
5.1	Arbeitspaket 1000 Projektleitung /Fördermanagement	7
5.2	Arbeitspaket 2110 Charakterisierung der Performance verschiedener Zelltechnologien	7
5.3	Arbeitspaket 2120 Charakterisierung der Sicherheit von Zelltechnologien auf Basis von Lithium Metall Oxiden	9
5.4	Arbeitspaket 2130 Optimierung des Zelldesigns mit prismatischer Zellbauform	12
5.5	Arbeitspaket 2140 Optimierung des Batteriedesigns aufgrund des Ausgasverhaltens von Zellen auf Basis von Lithium-Metall-Oxiden	19
5.6	Arbeitspaket 2210 Verbesserte Lebensdauerabschätzung mit Impulsverfahren	25
5.7	Arbeitspaket 2220 Verbesserte SOC-Bestimmung mit selbstadaptierendem Algorithmus	28
5.8	Arbeitspaket 2230 Weiterentwicklung BMU, CSC und Sensorik	32
5.9	Arbeitspaket 2310 Abschaltstrategie bei hohen Strömen	38
5.10	Arbeitspaket 2320 Elektrisches Verbindungskonzept für prismatische Zellbauform	43
5.11	Arbeitspaket 3100 Performance-Steigerung von EV-Batterien durch Parallelschaltung der Zellen/Module	47
5.12	Arbeitspaket 3200 Mechanische Systemkonstruktion auf Basis prismatischer Metal-Can-Zellen 50	
5.13	Arbeitspaket 3300 Thermalmanagement für EV-Batterien mit prismatischer Zellenbauform ..	53
5.14	Arbeitspaket 3400 Systemarchitektur für verschiedene Ladestrategien	57
5.15	Arbeitspaket 3500 Aufbau, Inbetriebnahme und Testing von EV-Batterien	64
5.16	Arbeitspaket 4100 Optimierte Anforderungen an Lastzyklen für NFZ-Leistungsbatteriesysteme	69
5.17	Arbeitspaket 4200 Steigerung der Lebensdauer von NFZ-Leistungsbatteriesystemen	72
6	Ergebnisse und Schlussfolgerungen	74
7	Ausblick und Empfehlungen	78
8	Literaturverzeichnis	80
9	Anhang	80
9.1	Abbildungsverzeichnis	80
9.2	Tabellenverzeichnis	81

2 Kurzfassung

Steigende Emissionen und sinkende Ressourcen bei den fossilen Energieträgern sind die wesentlichen Einflussgrößen der Klimapolitik. Lösungen von Seiten der Automobilindustrie sind hier nur durch neue Antriebskonzepte mit elektrischen Batteriesystemen darstellbar.

Der Geschäftsbereich Cells- and Battery Packs innerhalb der Magna E-Car Systems entwickelt seit mehreren Jahren Batteriesysteme für mobile Anwendungen und deckt dabei die gesamte Wertschöpfungskette von der Zell-Entwicklung bis zur Integration von Batteriesystemen in Fahrzeugen als Beitrag für eine zukünftige Elektromobilität ab.

In diesem Rahmen wurde das Projekt „LIBS 2010 - LIBS – Lithium Ionen Batteriesystem – Entwicklung 2010“ durchgeführt. Die Aufgabenstellung in diesem Projekt war die Neu- bzw. Weiterentwicklung von Batteriesystemen bis zur Konzeptreife für die Anwendung in elektrischen PKWs bzw. in Hybrid-Nutzfahrzeugen basierend auf dem Stand der Technik bzw. auf dem Vorgängerprojekt „LIBS08“.

Das Ziel im Bereich Nutzfahrzeug war die Steigerung der Lebensdauer von 15.000 Betriebsstunden um etwa 30%, welche durch Modifikation des inneren Zell-Aufbaus der bereits vorhandenen Hochleistungszelle und durch Konzeptionierung neuartiger Betriebs-Algorithmen erreicht wurde. Die Ergebnisse einer umfangreichen Validierung der Lebensdauer konnten zeigen, dass eine Lebensdauer von 20.000h erreicht wurde. Aufgrund dessen, dass zukünftig Lebensdaueranforderungen im NFZ-Bereich von 30.000h erreicht werden sollen, wurde zusätzlich eine neue Technologie (Lithiumtitanoxid - LTO) untersucht. Die Ergebnisse zeigten ein signifikant besseres Lebensdauerverhalten der LTO-Technologie.

Das Ziel im Bereich Personenkraftfahrzeuge war die erstmalige Darstellung eines Batteriesystemprototypen auf Basis von Hochenergie-Zellen mit prismatischer Bauform. Der Aufbau eines PHEV-Systemprototypens wurde erfolgreich durchgeführt.

Das Feedback von potentiellen Kunden im Rahmen von Akquisetätigkeiten zeigte, dass die erreichten Leistungsdaten des aufgebauten PHEV-Prototypens hinsichtlich Energieinhalt und Sicherheit den Kundenwünschen entsprechen. Weiteren Optimierungsbedarf gibt es jedoch in den Bereichen, Kosten, Leistung, Lebensdauer und Bauraum.

Sowohl die theoretischen Forschungsergebnisse als auch die experimentellen Arbeiten bis hin zum verifizierten Funktionsprototypen bilden die Grundlage für die darauf aufbauende Serienentwicklung und Produktion bei MAGNA E-Car Systems. Ein weltweites Kontaktnetzwerk zu renommierten Zellherstellern bildete dabei ein zuverlässiges Rahmensystem zur geeigneten Festlegung der Forschungsschwerpunkte in den Arbeitspaketen.

Aus den Ergebnissen wurden bereits weiterführende Forschungsprojekte abgeleitet, mit dem Ziel, marktfähige Batteriesysteme für den Massenmarkt liefern zu können.

3 Abstract

Increasing emissions and decreasing resources of fossil energies are the main motivators for goals set in terms of environmental protection. The automotive industry can contribute solutions in the form of entirely new drive concepts based on electric battery systems.

For several years now, the Business Unit Cells- and Battery Packs at MAGNA E-Car has been doing research on batteries and decided to contribute to the future electro-mobility by covering the whole value-added chain in the field of battery systems, from development and production of cells to the integration of a battery system in a vehicle.

In this context, the project was aiming for new and further development of battery systems for application in electric passenger cars and in hybrid utility vehicles on the basis of the predecessor project „LIBS08“ and the state of technology.

The focus in the area of utility vehicles laid on increasing the actual battery life time of 15.000 operating hours by approximately 30%. This was achieved by changing the battery chemistry and the inner cell structure and by the utilization of a newly developed operation algorithm. Because of the fact, that the life time requirements for battery systems for utility vehicles will increase to around 30.000 operating hours in the future, a new cell technology was investigated (Lithiumtitanoxid - LTO). The result shows, that this new technology provides a significant better life time behavior.

The focus in the area of electric passenger car laid on the first-time demonstration of a high energy battery system based on prismatic-shaped cells and a novel cell chemistry. A PHEV-prototype was successfully build up accordingly.

The feedback of potential customers gained during acquisition activities showed that the performance of the battery prototype in terms of energy and safety already meets the requirements.

Nevertheless, there is optimization potential in the field of costs, power, life time and packaging. The results of research as well as the experimental activities and the verified functional prototype form the basis for subsequent series development and production at MAGNA E-Car Systems. An international contact network including renowned cell manufacturers provided a suitable framework to determine the main research topics.

From these results, continuative research will be derived in order to approach - as quickly as possible - the long-term goal of developing marketable battery systems.

4 Einleitung

Steigende Emissionen und sinkende Ressourcen bei den fossilen Energieträgern sind die wesentlichen Einflussgrößen der Klimapolitik. Lösungen von Seiten der Automobilindustrie sind hier nur durch völlig neue Antriebskonzepte mit elektrischen Batteriesystemen darstellbar.

Die Anforderungen an automotive Batteriesysteme sind sehr vielschichtig und teilweise auch gegenläufig. Die Leistungsdichte soll möglichst hoch sein, um mit einem Elektroantrieb vergleichbare Beschleunigungen wie mit dem Verbrennungsmotor zu ermöglichen. Die Energiedichte eines Batteriesystems soll hoch sein, um Reichweiten von mehreren hundert Kilometern zu ermöglichen. Gleichzeitig entsteht durch das Mitführen von hohen Energiedichten ein Gefahrenpotential, das verringert werden muss. Die Kosten eines Batteriesystems sollen klein sein und die Lebensdauer soll den üblichen automotiven Ansprüchen genügen.

Die wesentlichen, von einander nicht unabhängigen Hauptziele in diesem Projekt waren:

- die Steigerung der Batterieperformance
 - o Leistungsdichte
 - o Energiedichte
- die Sicherstellung der erforderlichen Sicherheit,
- die Steigerung der Lebensdauer sowie
- die Senkung der Produktkosten
- die Entwicklung notwendiger Zusatzfunktionen (z.B.: Ladekonzept)
- die Reduktion des Bauraumes (volumetrische Integration)
- die Reduktion des Gewichtes (gravimetrische Integration)

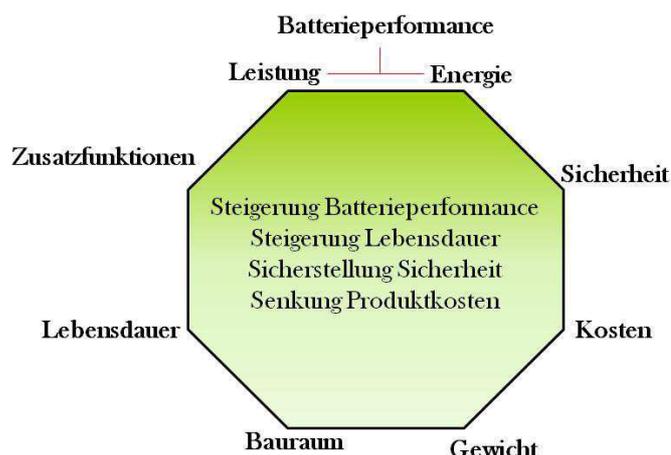


Abbildung 1 Projekt-Hauptziele

Die Aufgabenstellung in diesem Projekt war die Neu- bzw. Weiterentwicklung von Batteriesystemen bis zur Konzeptreife für die Anwendung in elektrifizierten PKWs bzw. in Hybrid-Nutzfahrzeugen basierend auf dem Stand der Technik bzw. auf dem Vorgängerprojekt „LIBS08“.

Der Fokus im Bereich Nutzfahrzeug war die Steigerung der Lebensdauer von erwarteten 15.000 Betriebsstunden um etwa 30%, welche durch veränderte Zelleigenschaften der bereits vorhandenen Hochleistungszelle, durch Modifikation des inneren Zell-Aufbaus und durch Konzepte neuartigen Betriebs-Algorithmen erreicht wurden. Die Sicherheit muss dabei weiterhin gewährleistet sein.

Der Fokus im Bereich Personenkraftfahrzeuge war die erstmalige Darstellung eines Batteriesystemprototyps auf Basis von Hochenergie-Zellen mit prismatischer Bauform. Das Ziel war die Entwicklung eines Batteriesystemprototyps welcher alle oben genannten Hauptziele konkurrenzfähig darstellt. Da auf dem Gebiet der Hochenergie-Batteriesysteme zu Beginn des Projektes wenig Vorkenntnis vorhanden war, erforderten die im folgenden angeführten Themen neue Lösungen:

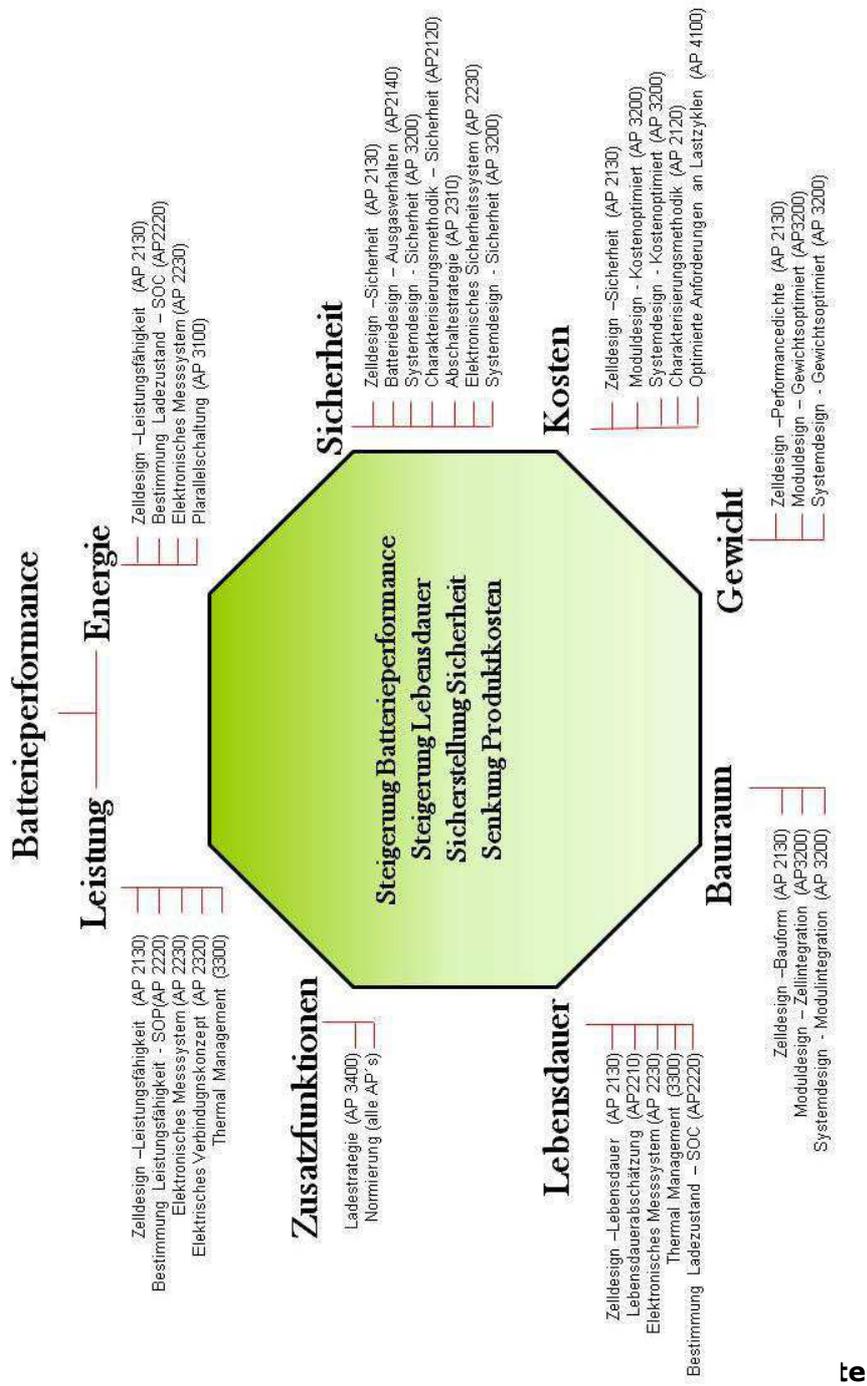
- Prismatische Hochenergiezelle – Spezifikation und Entwicklung
- Charakterisierungsstrategie für Hochenergiezellen
- Sicherheit – Charakterisierung und Auswirkung auf das Batteriedesign
- Lebensdauerabschätzung
- Algorithmen für die Systemzustandsbestimmung
- Überwachungs- und Steuerelektronik
- Abschaltstrategie im Kurzschlussfall
- Elektrische Verbindungstechnik
- Thermalmanagement
- Ladestrategie

Um diese Ziele zu erreichen wurden die Entwicklungsaktivitäten in die im folgenden angeführten Arbeitspaketen aufgeteilt.

- AP 2110 Charakterisierung der Performance neuer Zelltechnologien
- AP 2120 Charakterisierung der Sicherheit von Zelltechnologien AP 2130 Optimierung des Zelldesigns mit prismatischer Zellbauform
- AP 2140 Optimierung des Batteriedesigns aufgrund des Ausgasverhaltens von Zellen
- AP 2210 Verbesserte Lebensdauerabschätzung mit Impulsverfahren
- AP 2220 Verbesserte SO_x-Bestimmung mit selbstadaptierendem Algorithmus
- AP 2230 Weiterentwicklung BMU, CSC und Sensorik
- AP 2310 Abschaltstrategie bei hohen Strömen
- AP 2320 Elektrisches Verbindungskonzept für prismatische Zellbauform
- AP 3100 Performance-Steigerung von EV-Batterien durch Parallelschaltung der Module
- AP 3200 Mechanische Systemkonstruktion auf Basis prismatischer Metal-Can – Zellen
- AP 3300 Thermalmanagement für EV-Batterien mit prismatischer Zellenbauform
- AP 3400 Systemarchitektur für verschiedene Ladestrategien
- AP 4100 Optimierte Anforderungen an Lastzyklen für NFZ-Leistungsbatteriesysteme
- AP 4200 Steigerung der Lebensdauer von NFZ-Leistungsbatteriesystemen

Die Verknüpfung der Hauptziele mit den in den Arbeitspaketen definierten Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten werden in folgenden Diagrammen dargestellt.

AI



te

5 Inhaltliche Darstellung

5.1 Arbeitspaket 1000 Projektleitung /Fördermanagement

Ziel dieses Arbeitspaketes ist die Koordination des Gesamtprojektes einschließlich des Projektteams und die Abwicklung der Förderaktivitäten.

Im Rahmen des Projektes LIBS 2010 wurden die Themen entsprechend dem Projektplan umgesetzt.

5.2 Arbeitspaket 2110 Charakterisierung der Performance verschiedener Zelltechnologien

Derzeit ist die Charakterisierung von Zellen dadurch bestimmt, dass jeder Zellen-Hersteller seine eigenen Verfahren verwendet, um die Performance der Zelle zu bewerten bzw. darzustellen. Sowohl der gesamte Bereich der Charakterisierung als auch die Tests zur Erzeugung spezieller Informationen für Batteriemodellentwicklung (SOX-Bestimmung) werden von derzeit verfügbaren Charakterisierungsrichtlinien bzw. -normen (z.B. „Freedom Car“) nicht ausreichend abgedeckt. Die Folge ist, dass Zellen von verschiedenen Herstellern für verschiedene Anwendungen nur unzureichend vergleichbar sind.

Ziel dieses Arbeitspaketes war es, herstellerunabhängige Charakterisierungsmethoden und Tests zu definieren, welche zu uniformen Datensätze führen deren Auswertung einen fairen Zellvergleich in unterschiedlichen Anwendungsfällen bzw. eine direkte weitere Bearbeitung in Batteriemodellen (SOX-Entwicklung) ermöglichen. Besonderes Augenmerk wird auf die Zellerwärmung beim Laden bzw. Entladen während der Tests gelegt, welche einen Einfluss auf die elektrische Performance der Zelle hat. Insbesondere wurde darauf geachtet, dass sequentiell ablaufende Tests sich nicht gegenseitig beeinflussen (z. B.: Erwärmung der Zelle durch den vorherigen Test, SOC Verschiebung durch den vorherigen Test). Ein weiterer Fokus war die Anwendbarkeit (Wirtschaftlichkeit, Komplexität) der Charakterisierungsmethodik.

Basierend auf den bereits vorhanden internen Wissen über Charakterisierungsmethodiken von Li-Ionen Batteriezellen wurde in Abstimmung mit Chemikern, Elektrotechnikern und Testingenieuren diese Charakterisierungsmethodiken erweitert und hinsichtlich Aussagekraft und Durchführbarkeit bewertet. Das Ergebnis ist ein Charakterisierungsplan für Li-Ionen Batteriezellen. Aus den erzielten Ergebnissen wurde ein international abgestimmter internen Magna E-Car Systems Standard entwickelt.

Aus den bereits gewonnenen Ergebnissen wurde ersichtlich, dass sich die Charakterisierungsmethodik für Leistungs- und Energiezellen wesentlich unterscheiden. Aus diesem Grund wurden für Energie- und Leistungszellen zwei getrennte Charakterisierungsstandards entwickelt werden.

Die in diesem Arbeitspaket entwickelte Charakterisierungsmethodik beinhaltet folgende Teilbereiche:

- Charakterisierungsmethode Energie
Diese Charakterisierungsmethode ermittelt die verfügbare Energie der Batteriezelle.

- Charakterisierungsmethode Leistungsfähigkeit
Diese Charakterisierungsmethode ermittelt die Leistungsperformance der Zelle über den gesamten Ladezustandsbereich und für unterschiedliche Pulsdauern.

- Charakterisierungsmethode Open Circuit Voltage (OCV)
Diese Testmethode ermittelt die OCV der Zelle über den gesamten Bereich des Ladezustandes. Die Testmethode basiert auf dem FreedomCAR Battery Test Manual for Power-Assist Hybrid Electric Vehicles.

- Charakterisierungsmethode Static Capacity
Mit dieser Testmethode wird die aktuelle bzw. die verfügbare Kapazität der Zelle bestimmt. Die Testmethode basiert auf dem FreedomCAR Battery Test Manual for Power-Assist Hybrid Electric Vehicles, section 3.2 Static Capacity Test.

5.3 Arbeitspaket 2120 Charakterisierung der Sicherheit von Zelltechnologien auf Basis von Lithium Metall Oxiden

Durch den Verbau von Batterien in Fahrzeugen muss das Batteriesystem Anforderungen erfüllen, welche in der Consumer-Industrie bzw. bei stationären Anwendungen bislang nicht berücksichtigt werden mussten.

Ein wichtiges Ziel in der Entwicklung von automotiven Batteriesystemen ist die Gewährleistung der Sicherheit unter allen Betriebssituationen. Abgesehen von der Ausgasung verursacht durch Überhitzung bzw. internen Zellkurzschlüssen, welche in AP 2140 behandelt wird, sind die Missbrauchssituationen Kurzschluss und Crash von großer Bedeutung. In diesen Fällen muss eine den automotiven Standards entsprechende Sicherheit gewährleistet sein.

Da derzeit das Verhalten von prismatischen Zellen im Kurzschluss- und im Crash-Fall nicht ausreichend bekannt ist, ist das Ziel dieses Arbeitspaketes eine entsprechende Charakterisierung des Sicherheitsverhalten von Batteriezellen um die notwendige Grundlage für die mechanische und elektrische Auslegung zu schaffen.

Charakterisierung des Kurzschlussverhaltens

Ziel der Charakterisierung des Verhaltens im Kurzschlussfall war die exakte Bestimmung der Höhe und der Dynamik des Stromes. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse stellen die Basis für die Auslegung des Abschaltkonzeptes (AP 2310) und des elektrischen Verbindungskonzeptes (AP 2320) dar.

Die Herausforderung bei der Charakterisierung des Kurzschlussfalles war die Definition der Testkonditionen. Insbesondere die elektrische Verbindung der kurzzuschließenden Anschlüsse (Abschlusswiderstand), welche eine große Auswirkung auf das Messergebnis hat, war zu definieren. Eine in diesem Projekt durchgeführte Recherche ergab, dass die einschlägigen Normen hier unterschiedliche Definitionen aufweisen.

International	Europäisch	Titel	Abschluss- Widerstand
SAND 2005-3123	-	FreedomCAR Electrical ESS Abuse Test Manual for Electric and Hybrid Electric Vehicle Applications	≤ 5 mΩ
SAE J2464	-	Electric and Hybrid Electric Vehicle Rechargeable Energy Storage System (RESS) Safety and Abuse Testing	≤ 5 mΩ
IEC 62281	DIN EN 62281	SICHERHEIT VON PRIMAER- U. SEKUNDAER-LITHIUMBATTERIEN BEIM TRANSPORT	≤ 100 mΩ
UL 1642	-	Safety of Lithium-Ion Batteries - Testing	≤ 100 mΩ
UN 3480	UN 3480	United Nations recommendations on the transport of dangerous goods	≤ 100 mΩ
-	DIN V VDE V 0510-11	SICHERHEITANFORDERUNG AN LITHIUM-SEKUNDAERBATTERIEN FUER HYBRIDFAHRZEUGE UND MOBILEN ANWENDUNGEN	≤ 100 mΩ

Aus der Tabelle ist ersichtlich, dass amerikanische Normen einen Abschlusswiderstand von $\leq 5 \text{ m}\Omega$ fordern hingegen die europäischen Normen einen Abschlusswiderstand von $\leq 100 \text{ m}\Omega$ fordern. Aufgrund dessen, dass sowohl europäische als auch internationale Normen (z.B. IEC) einen Abschlusswiderstand von $\leq 100 \text{ m}\Omega$ fordern wurde als interner Magna E-Car Standard der Kurzschluss-Abschlusswiderstand mit $\leq 100 \text{ m}\Omega$ festgelegt.

Die Kurzschluss tests an allen Evolutionsstufen der in AP 2130 entwickelten Zelle (näheres in der Beschreibung von AP 2130) wurden im AP 3500 durchgeführt.

Charakterisierung des Crashverhaltens

Ziel war es das Verhalten der eingesetzten Li-Ionen Zelle bei einem Crash zu analysieren. Aus den gewonnen Erkenntnissen sollte in einem weiteren Schritt ein FE-Modell der Zelle entwickelt werden um die Basis für Crashsimulationen auf Modul und Systemebene zu schaffen. Im Wesentlichen treten während einem Crash zwei zerstörende Größen auf: hohen Beschleunigungen und Deformation durch mechanisch äußere Einwirkung. Weiters sollte die Auswirkung einer Deformation bzw. Beschleunigung auf die elektrischen Eigenschaften der Zelle untersucht werden.

Im ersten Schritt wurde die im folgenden beschriebene Testmethode entwickelt welche die gewünschten Parameter für die FE-Modellierung liefern sollte.

- Dynamische Versuche

Das Ziel der dynamischen Versuche ist es, sowohl die äußere als auch die innere Zerstörung der Zelle bei großen Beschleunigungswerten zu eruieren.

Im Rahmen der dynamischen Versuche werden Zellen definiert beschleunigt (jeweils 3 Zellen pro Richtung).

- Beschleunigung in x (längs)
- Beschleunigung in y (quer)
- Beschleunigung in z (oben)
- Beschleunigung in -z (unten)

Die Analyse der äußeren Zerstörung wird mit einer High-Speed Videoaufnahmen sowie durch eine visuelle Kontrolle (Pole, Überdruckventil, etc.) und durch eine Geruchsprobe (undichte Zelle) durchgeführt.

Analyse der inneren Zerstörung wird mit einer Tear-Down-Analyse durchgeführt. Dabei wird die Zelle geöffnet und die Auswirkung der Beschleunigungsversuch auf Stromsammler, Anbindung an die Terminals etc. analysiert.

- Quasistatische Versuche

Das Ziel der quasistatischen Tests ist es, durch gezielte Deformation unter Aufzeichnung der Messgrößen Kraft, Weg und Zeit (Steifigkeitsbestimmung und Grenzverformung) die Parameter für die anschließende FE-Modellerstellung zu ermitteln. Da das mechanische Verhalten des Zellgehäuses sich signifikant vom mechanischen Verhalten des Zellinneren (Elektroden, Separator,

etc.) unterscheidet, wird das Zellinnere separat untersucht. Als Resultat sollen zwei FE-Modelle entwickelt werden, eines für das Zellgehäuse und ein zweites für das Zellinnere welche zusammengeführt das Gesamtmodell einer Zelle ergeben.

Versuch mit Zellinnerem

- Biegung um Z-Achse
- Stauchung in X
- Stauchung in Y
- Stauchung in Z

Versuche mit Zelle mit Gehäuse

- Biegung um Z-Achse
- Stauchung in X
- Stauchung in Y
- Stauchung in Z Summe

Um die Auswirkung einer Deformation bzw. Beschleunigung auf die elektrischen Eigenschaften der Zelle untersucht zu können sollen alle Versuche welche mit gesamten Zellen durchgeführt werden (Gehäuse und Zellinnerem) im elektrischen Betrieb durchgeführt werden. Dabei ist der Testaufbau so auszulegen, dass ein definierter Strom fließt. Aus der Aufzeichnung der Messgrößen von Strom, Spannung und Zeit kann in einer späteren Analyse die Grenzverformung bezüglich elektrischen Verhaltens ermittelt werden.

Die Sicherheitscharakterisierung ist stark durch die Zelldimension und der Zellchemie geprägt. Um eine optimale aussagekräftige Modellierung des Crashverhalten zu gewährleisten ist es notwendig die Versuche mit Zellen durchzuführen welche das finale Zelldesign (Geometrie, Chemie, Gehäusematerial) aufweisen. Da das Zelldesign in diesem Projekt aufgrund der äußeren Projekteinflüsse zweimal wesentlich verändert wurde (näheres in der Beschreibung von Task 2130) wurde das finale Design der in AP 2130 entwickelten Prototypenzelle bis zum Ende des Projektes nicht vollständig erreicht. Daher war die Durchführung der Charakterisierung des Crashverhaltens im Rahmen dieses Projektes nicht zielführend und wurde daher nicht durchgeführt.

5.4 Arbeitspaket 2130 Optimierung des Zelldesigns mit prismatischer Zellbauform

Ziel dieses Arbeitspaketes ist die Entwicklung einer Li-Ionen Zelle passend zu den im AP 3200 entwickelten und in AP 3500 aufgebauten Batteriesystemprototypen. Der Fokus des Arbeitspaketes lag auf der Optimierung des Zelldesigns basierend auf den Erkenntnissen des Vorprojektes „LIBS 2008“ für Zellen in elektrifizierten Antriebskonzepten um folgende Optimierungspotentiale ausschöpfen zu können:

- Modularen Zell- und Modulkonzepten zur Erstellung von Bauraum- und kosteneffizienten Systemkonzepten.
- Homogenisierung der thermischen Belastung zur Verbesserung der Lebensdauer
- Vereinfachung der Verbindungstechnik (Terminal-Design) unter Berücksichtigung der Vermeidung einer asymmetrischen Belastung, welche negative Auswirkungen sowohl auf die Lebensdauer als auch die Leistungsfähigkeit der Systeme hätte.

Das Zelldesign wurde anhand folgender Kriterien umgesetzt:

Zellchemie

Bei der Analyse der Marktbedürfnisse ist eine starke Divergenz der Anforderungen hinsichtlich Spannungslage, Energie- und Leistungsanforderung abzulesen. Abgeleitet von den wesentlichsten Kriterien wie Sicherheit, Lebensdauer, Leistungsfähigkeit, Energiedichte und Energieinhalt wurde auf Basis der am Markt verfügbaren Technologien eine Bewertung hinsichtlich der Zellchemie durchgeführt. Die nachfolgende Auswahl der Zellchemie brachte folgendes Ergebnis welches einen optimalen Kompromiss zwischen Energiedichte, Leistungsdichte, Lebensdauer und Kosten darstellt:

- NFZ- Leistung, HEV: Graphit Anode / Lithiumeisenphosphat Kathode (LFP) auf Grund der höheren Energiedichte.
Optional: Lithiumtitanoxid Anode / Lithiummanganoxid Kathode (LTO) auf Grund der signifikant höheren Lebensdauerperformance.
- PKW-Energy Driven EV: Graphit Anode / Lithiummanganoxid Kathode (LMO) auf Grund der höheren Energiedichte
- PKW-Energy/Power Driven PHEV: Graphit Anode / Lithiumeisenphosphat Kathode (LFP) auf Grund optimalen Kompromiss Leistung-Energiedichte

Die nachstehende Tabelle zeigt die der Zellchemie-Auswahl zugrundeliegende Entscheidungsmatrix.

Tabelle 1: Evaluierung von Zellchemie Optionen

		Cathode material				
		LFP	NMC	mixed Oxides	LMO	
Anode material	Graphite	Energy density/Specific Energy	0	+	+	+
		power performance	+	0	0	0
		Low Temp. performance	-	0	0	0
		Safety	+	-	0	0
		Durability/Life	+	0	0	-
		Voltage Level	-	+	+	+
		Voltage Characteristic (U vs. SOC)	+	0	0	0
	Cost	0	0	+	+	
	Hard carbon	Energy density/Specific Energy	-	0	0	0
		power performance	+	+	+	+
Low Temp. performance		+	+	+	+	
Safety		+	-	0	+	
Durability/Life		+	0	0	-	
Voltage Level		-	0	0	0	
Voltage Characteristic (U vs. SOC)		-	-	-	-	
Cost	-	-	0	0		
Lithium Titanate	Energy density/Specific Energy	-	-	-	-	
	power performance	++	+	+	++	
	Low Temp. performance	+	+	+	+	
	Safety	++	+	+	++	
	Durability/Life	++	+	+	+	
	Voltage Level	-	-	-	-	
	Voltage Characteristic (U vs. SOC)	+	0	0	+	
Cost	-	-	-	-		

Die Anforderungen an die Zellperformance leitet sich im wesentlichen von den Anforderungen an die Zielapplikation ab.

Zu Beginn des Projektes lag der Fokus auf Batteriesysteme für reine Elektrofahrzeuge mit einem Energieinhalt von 25-35 kWh. Basierend auf dieser Systemspezifikation wurde ein optimaler Energieinhalt einer LMO-Zelle von 50 Ah definiert.

In der zweiten Phase des Projektes lag der Fokus auf Batteriesystemen für Plug-In-Hybridfahrzeuge-Batterien (PHEV). Der angestrebte Energieinhalt entsprechender Batterien liegt im Bereich von 8-10 kWh. Der optimale Energieinhalt der LFP-Zelle wurde mit 27 Ah definiert.

Zelldesigns für Leistungsapplikationen im NFZ sind stark von der Lebensdauer bestimmt. Eine Leistungszelle welche einen entsprechenden Energieinhalt bei gleichzeitiger Maßschneidung auf Leistungsanforderungen, thermische Stabilität und Lebensdauer erfüllt basiert abgeleitet von unseren Untersuchungen auf LFP und hat eine Kapazität von 4,4 Ah.

Bauform

Um eine größtmögliche Integrationsdichte hinsichtlich volumetrischer Energiedichte auf Systemebene zu erreichen wurde die prismatische Zellbauform als optimale Bauform ausgewählt, da hier im Vergleich zu zylindrischen Zellen ungenutzte Zwischenräume vermieden werden können. Die Herausforderung bei der Entwicklung von prismatischen Zellen ist vor allem die Dichtheit des Gehäuses über die gesamte Lebensdauer. Da der Elektrolyt von Li-Ionen Zellen stark durch Feuchtigkeitseinwirkung zerstört wird, muss der Eintritt von Feuchtigkeit verhindert werden.

Gehäuse

Eine Frage die in der Batterie- und Fahrzeugindustrie sehr kontrovers diskutiert wird ist jene nach dem optimalen Zellgehäuse. Aus den Erfahrungen der letzten Jahre und aus den bereits gewonnenen Erkenntnissen dieses Projektes kann nun bestätigt werden, dass die Pouch-Zellen Technologie vor allem mechanische Defizite aufweist, welche zu Einschränkungen in der Zuverlässigkeit, Sicherheit und Lebensdauer führen. Aus der Sicht von Magna E-Car Systems birgt diese Technologie derzeit ein unzureichend kalkulierbares Risiko für den Einsatz in kundentauglichen Elektrofahrzeugen. Aus diesem Grund wurde der kurz- bis mittelfristige Fokus der Batterieentwicklung auf die sogenannte Metal-Can Technologie gelegt.

Die nachstehende Tabelle zeigt die der Zellgehäuse-Auswahl zugrundeliegende Entscheidungsmatrix.

Tabelle 2: Bewertungsmatrix Zellgehäuse: metal can versus pouch

	metal can	pouch	Komentar
Zellgehäuse	+	-	Metallgehäuse mit Überdruckventil ermöglicht ein gezieltes Vent Management, Einfache Integration, Vermeidung von Zell Leckagen und einfachere Produktionsabläufe! Definiertes Öffnen von Pouch Zelle im Abusefall bis dato nicht gelöst!
Verbindungstechnik	+	0	Terminals aus gleichen Merialien --> keine Korrosionsproblematik Einfachere Busbarlösungen möglich Dünne Tabs bei Pouchzelle --> limitierte Strombelastbarkeit --> Verluste
Sicherheit	+	+	Gerichtetes Venting möglich!
mechanische Integration	+	0	Eine robuste Stabilisierung von Metallgehäusen gewährleistet Sicherheit im Crashfall! Pouchzellen müssen unter Druckbeaufschlagung verbaut werden; Problematik des Zellswellings und Toleranzausgleiches nicht ausreichend gelöst
Kühlung	0	0	Bei Metallgehäuse Luft- und Wasserkühlung möglich! Pouchzellen nur bedingt für Luftkühlung geeignet: Zelle muss durch Platten etc. mech. stabilisiert werden --> Wärmetransport durch Zusatzelemente Undefinierter Druck auf die Pouchzellen --> Risiko von Leckagen
Temperaturniveau im Betrieb	0	0	(+) Höhere Masse und somit Wärmekapazität durch Metall-Zellgehäuse, (-) Gradient bei dickeren Zellen ungünstiger
Produktion	+	-	Robustes Metallgehäuse: geringes Sicherheitsrisiko da Leckagen oder Verletzung der Zellen im Packzusammenbau Pouchzellen benötigen meist Klebprozess zur Modulstabilisierung
Zyklen-Lebensdauer	0	+	Stark abhängig von der Betriebstemperatur und somit von den Kühlungskonzepten
Kalender Lebensdauer	0	0	Kein Zellhersteller hat eine Zelle über 10 Jahre gelagert. Die Mechanismen und Modelle sind bekannt --> Zersetzung von Elektrolyt beginnend bei 55°C Metallablösungen aus der Kathode --> Vergiftung der Anode, etc. Es sind daher alle Zellen mit fl. Elektrolyt sensitiv gegenüber hohe Temperaturen.

Thermisches Verhalten

Als erster Schritt war es notwendig eine Temperaturklassifizierung der unterschiedlichen Betriebsbereiche für die verwendete Li-Ionen Zelle zu erarbeiten um einerseits die Auslegungskriterien für das Sicherheitssystem zu definieren und andererseits die Basis für eine Kühlungsauslegung (AP 3300) zu schaffen. Grundsätzlich wird zwischen sicherheitsrelevanten und Lebensdauer relevanten Betriebsbereichen unterschieden. Auf Basis der im AP 3500 durchgeführten thermischen Zell-Charakterisierung wurde folgende Temperaturklassifizierung definiert.

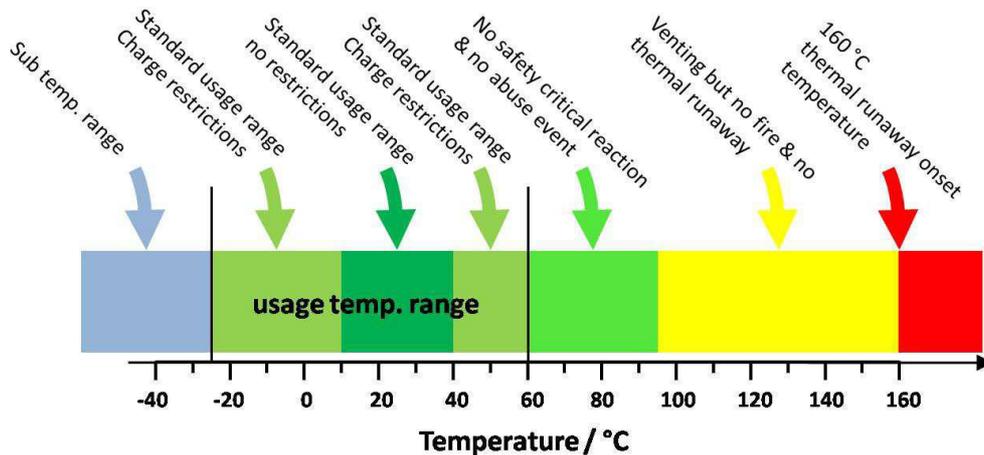


Abbildung 3 Sicherheitsrelevante Temperaturklassen

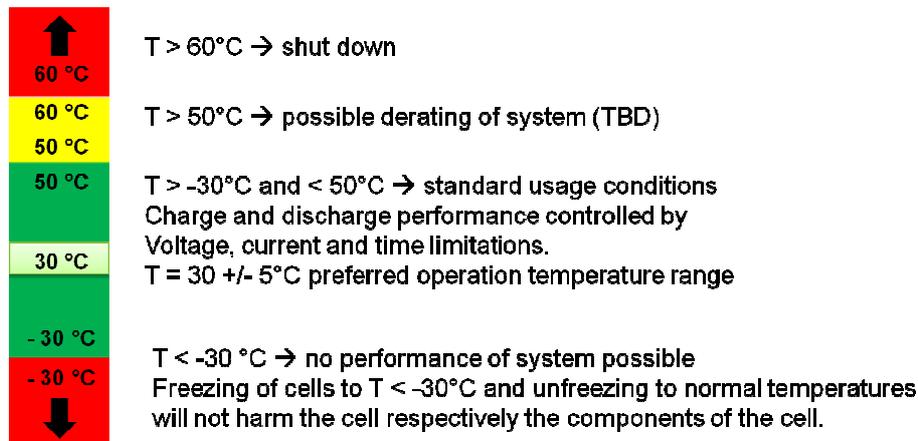


Abbildung 4 Lebensdauer relevante Temperaturklassen

Der Temperaturgradient über eine Zelle im Betrieb ist ein wesentliches Lebensdauerkriterium. In allen Lastfällen soll der Gradient möglichst gering sein um eine möglichst gleiche elektrochemische Belastung der Zellchemie zu gewährleisten. Dadurch kann eine optimale Lebensdauer erreicht werden. Um das thermische Verhalten in unterschiedlichen Lastfällen zu analysieren wurden transiente Thermalsimulation unter Verwendung des CFD-Verfahren durchgeführt. Da das thermische Verhalten des Zellgehäuses sich signifikant vom thermischen Verhalten des Zellinneren unterscheidet, wurden das Gehäuse und das Zellinnere getrennt modelliert. Weiters wurde das richtungsabhängige Temperaturverhalten des Zellinneren durch die Simulation abgebildet.

Zellanschlüsse (Terminals)

Die Terminals einer Batteriezelle bilden die Basis des Verbindungskonzeptes welches die Aufgabe hat, die einzelnen Zellen elektrisch möglichst verlustarm miteinander zu verbinden. Die im AP 2320 durchgeführten Untersuchungen brachten die Erkenntnis, dass sich im Wesentlichen zwei Verbindungstechnologien für den Einsatz in automotiven Batteriesystemen eignen:

- Schraubtechnologie
Die Zelle weist Terminals mit Gewindebolzen auf welche mit den Zellverbindern durch eine Schraubenmutter befestigt wird.
- Laserschweißtechnologie
Die Zellen weisen Schweißterminals auf welche mit den Zelleverbindern mittels Laserschweißung stoffschlüssig verbunden werden. Durch die exakte Steuerung der Laserschweißanlage ist es möglich den Wärmeeintrag auf die Terminals exakt zu bestimmen und zu steuern. Dadurch kann eine Überhitzung der Zelle aufgrund des schweißbedingten Wärmeeintrags ausgeschlossen werden.

Die Entwicklung der Terminals wurde in enger Abstimmung mit den Arbeitsinhalten in Arbeitspaket 2320 „Elektrisches Verbindungskonzept für prismatische Zellbauform“ durchgeführt. Aus den in AP 2320 gewonnen Erkenntnissen ist ersichtlich, dass für endkundentaugliche Batteriesysteme (Lebensdauer bis zu 10 Jahren) die in hohen Stückzahlen produziert werden eine stoffschlüssige Verbindungstechnologie notwendig ist.

Da die Entwicklung der Schweißterminals einerseits nicht das Ziel dieses Projektes war und andererseits den budgetären Rahmen des Arbeitspaketes gesprengt hätte, wurde entschieden die erste Version der PHEV-Zelle mit Schraubterminals auszuführen.

Zelle

Die Umsetzung des Zelldesigns anhand der angeführten Kriterien in Kombination mit den Einflüssen aus dem Projektumfeld führte zu zwei wesentlichen Evolutionsstufen in der Zellentwicklung:

- Evolutionsstufe 1:
Zu Beginn des Projektes lag der Fokus der Zellentwicklung auf Hochenergiezellen für den Einsatz in reinen Elektrofahrzeugen. Die auf dieser Annahme resultierende LMO-Zelle wies eine Zellkapazität von 50 Ah auf.
- Evolutionsstufe 2:
Aufgrund der im Laufe des Projektes ersichtlichen Strategieänderung der Automobilhersteller wurde der Fokus des Projektes von Batteriesystemen für reine Elektrofahrzeuge auf Batteriesysteme für sogenannten Plug-In-Hybridfahrzeuge-Batterien (PHEV) geändert. Dies führe auch zu Änderungen der Leistungsdaten der Batteriezelle. Der Fokus in der zweiten Phase des Projektes lag daher auf der Entwicklung einer LFP-Zelle mit einem Energieinhalt von 27 Ah.

Die entwickelte diente als Basis für die in AP 3200 durchgeführte Systementwicklung und des in AP 3500 durchgeführten Aufbaus der Batteriesystemprototypen.

Aufgrund der in diesem Projekt aufgebauten Beziehungen zum österreichischen Normungsinstitut konnte eine Normierungstendenz bezüglich Zellgeometrie vor allem von deutschen Automobilherstellern erkannt werden. Aufgrund des historisch bedingten Naheverhältnisses von Magna E-Car Systems zu deutschen Automobilherstellern, ist es aus ökonomischer Sicht notwendig diesen Normierungstendenzen zu folgen. Dies wird eine dritte Evolutionsstufe notwendig machen.

Die Ergebnisse aus diesem Arbeitspaket zeigen, dass eine dritte Evolutionsstufe der Zelle notwendig ist. Die Anpassung der Zellgeometrie bezüglich normativer Anforderungen und die Weiterentwicklung der Zellanschlüsse um eine stoffschlüssige Zellverbindung zu ermöglichen sind die wesentlichen Entwicklungsvorhaben im nächsten Schritt.

5.5 Arbeitspaket 2140 Optimierung des Batteriedesigns aufgrund des Ausgasverhaltens von Zellen auf Basis von Lithium-Metall-Oxiden

Eines der größten Herausforderung in der Weiterentwicklung von automotiv einsetzbaren Batteriezellen bzw. Batteriesystemen ist die Steigerung der Energiedichte. Bei derzeit verwendeten (Energie-) Batteriezellen liegt der Energieinhalt bei etwa 40-50 Ah mit steigender Tendenz. Zukünftig werden Zellen einen Energieinhalt von bis zu 70 Ah aufweisen. Gleichzeitig mit der Steigerung der Energiedichte steigt auch das Gefahrenpotential, da im Falle eines thermischen Davonlaufens („Thermal Runaway“) die gespeicherte Energie in thermische Energie (Brand, Ausgasen, Temperaturen > 1200 °C) umgesetzt wird.

Ein „Thermal Runaway“ aufgrund einer Überladung muss daher mit einer geeigneten Sicherheitseinrichtung (Spannungs- und Temperaturüberwachung) verhindert werden. Es bleibt jedoch ein Restrisiko, welches auf einen Thermal Runaway aufgrund eines internen Zellkurzschlusses beruht. Dabei wird durch eine Verunreinigung (z.B. Eisenspan) oder durch einen mechanischen Defekt (Riss/ Bruch des Separators) ein Thermal Runaway punktuell ausgelöst. Aus derzeitiger Sicht kann daher ein Ausgasen einer Zelle in einem Batteriesystem technisch nicht vollständig verhindert werden. Ziel ist es daher, ein Ventgas-Ableitsystem zu entwickeln, welches die heißen Gase aus dem System ableitet, ohne dabei Personen zu gefährden. Zusätzlich muss die Ausbreitung des „Thermal Runaways“ auf die Nachbarzellen (Kettenreaktion) verhindert werden.

Aufgrund fehlender Normen für ein standardisiertes Testverfahren welches das komplexe Ausgasverhalten, einer Zellausgasung charakterisiert (Gasmenge, Temperatur-, Druckverlauf), ist die Bestimmung des Gefahrenpotential und infolgedessen die Konstruktion eines Ventgas-Ableitsystem auf Systemebene zurzeit schwierig.

Das Ziel dieses Arbeitspaket war die Entwicklung eines Ausgasmanagements welches eine sichere Ausgasung einer Zelle in einem Batteriesystem erlaubt.

Folgende Teilziele wurden umgesetzt:

- Erstellung einer FMEA für ein Batteriesystem
- Entwicklung eines Testverfahren zur Charakterisierung des Ausgasungsverhalten einer Li-Ionen Zelle bzw.- eines Zellverbundes bei unterschiedlichen Missbrauchs-Szenarien.
- Durchführung, Analyse und Bewertung von Ausgastests unterschiedlicher Zellen
- Weiterentwicklung der Pouch-Zellen Technologie bezüglich Ausgasverhalten.
- Ventgas-Ableitungssystems auf Zell- Modul- und Systemebene

Ermittlung des Gefahrenpotentials

Neben den in der Industrie üblichen Sicherheitsnormen (IEC61508, ISO 26262) gibt es Richtlinien von EUCAR, USABC Freedom Car, SAE J2464 und diversen Zellhersteller welche einen Hazard-Level auf Zellebene definieren. Diese Definitionen sind unterschiedlich und haben dadurch in der Vergangenheit in der E-Mobility Community für große Verwirrung gesorgt. Die Beurteilung des Gefährdungspotentials nach Hazard-Levels wurde als wichtiges Thema erkannt und als zusätzliches Thema in diesem Arbeitspaket aufgenommen. Nach einer Beurteilung aller derzeit vorliegenden Hazard-Level-Definitionen, wurde die Definition nach der USABC Freedom Car als die am besten geeignete Definition für die Kunden der Magna E-Car Systems auszuwählen.

Missbrauchttests in Arbeitspaket 3500

- Überladen von Batteriezellen im Freien zur grob Analyse des Ausgasungsverhalten
- Überladen von Batteriezellen mit dem in diesem Arbeitspaket entwickelten Testverfahren
- Erzwingen von internen Zellkurzschlüssen mit dem in diesem Arbeitspaket entwickelnden Testverfahren

bildeten die Basis für eine FEMA. Das Ergebnis der FMEA ergab einen Hazard Level von 4 für die 27 Ah Zelle und einen Hazard Level von 5 für die 50 Ah Zelle nach dem Standard SAE J2464; FreedomCar.

Hazard Level	Description	Classification Criteria & Effect
0	No effect	No effect. No loss of functionality.
1	Passive protection activated	No defect; no leakage; no venting, fire, or flame; no rupture; no explosion; no exothermic reaction or thermal runaway. Cell reversibly damaged. Repair of protection device needed.
2	Defect/Damage	No leakage; no venting, fire, or flame; no rupture; no explosion; no exothermic reaction or thermal runaway. Cell irreversibly damaged. Repair needed.
3	Leakage $\Delta \text{mass} < 50\%$	No venting, fire, or flame*; no rupture; no explosion. Weight loss $< 50\%$ of electrolyte weight (electrolyte = solvent + salt).
4	Venting $\Delta \text{mass} \geq 50\%$	No fire or flame*; no rupture; no explosion. Weight loss $\geq 50\%$ of electrolyte weight (electrolyte = solvent + salt).
5	Fire or Flame	No rupture; no explosion (<i>i.e.</i> , no flying parts).
6	Rupture	No explosion, but flying parts of the active mass.
7	Explosion	Explosion (<i>i.e.</i> , disintegration of the cell).

* The presence of flame requires the presence of an ignition source in combination with fuel and oxidizer in concentrations that will support combustion. A fire or flame will not be observed if any of these elements are absent. For this reason, we recommend that a spark source be used during tests that are likely to result in venting of cell(s). We believe that "credible abuse environments" would likely include a spark source. Thus, if a spark source were added to the test configuration and the gas or liquid expelled from the cell was flammable, the test article would quickly progress from level 3 or level 4 to level 5.

Abbildung 5 Hazard Level nach USABC Freedom Car

Entwicklung eines Testverfahrens zur Charakterisierung des Ausgasungsverhaltens

Ziel war die Entwicklung eines Verfahrens zur Charakterisierung des Ausgasungsverhaltens einer Zelle unter realen Betriebsbedingungen (Zelle in einem geschlossenen Raum verbaut).

Es wurden zwei unterschiedliche Testsysteme entwickelt die im AP 3500 aufgebaut wurden. Ziel war die Wiederverwendbarkeit des Testsystems. Mit diesen Testsystemen wurden im Rahmen des AP 3500 Versuche durchgeführt. Die Analyse und Auswertung der Test wurde im AP 2140 durchgeführt:

- 1) Konstruktion und Aufbau eines Testsystems zur Charakterisierung des Ausgasungsverhalten von Li-Ionen Zellen in einem quaderförmigen Druckbehälter:
Die ersten Versuchsergebnisse basierend auf Pouch- und Metal-Can Zellen zeigten, dass die Dynamik des Ausgasungsvorgang wesentlich höher ist als bisher angenommen. Der Testaufbau konnte aufgrund seiner geometrischen Form (quaderförmig) dem Druck nicht standhalten und wurde irreversibel geschädigt (undicht). Dieser Effekt wurde bisher nicht beobachtet und stellt nun eine wichtige Erkenntnis für die Konstruktion von Batteriesystemen dar.



Abbildung 6 Testsystem mit quaderförmigen Druckbehälter

- 2) Konstruktion und Aufbau eines Testsystem zur Charakterisierung des Ausgasungsverhalten von Li-Ionen Zellen in einem zylindrischen Druckbehälter

Auf Basis der Erkenntnisse der ersten Versuche wurde eine Worst-Case Rechnung durchgeführt welche die Grundlage für die Auslegung des Druckbehälters bildete. Das nachfolgende Bild zeigt das konstruierte Testsystem.



Abbildung 7 Testsystem mit zylindrischem Druckbehälter

- 3) Konstruktion und Aufbau eines Testsystems zur Charakterisierung des Ausgasungsverhalten von Li-Ionen Zellen deren Ausgasung durch einen internen Kurzschluss ausgelöst wurde:
Die Gefährdung durch die Ausgasung von Zellen verursacht durch Kurzschluss oder Überladung kann durch ein entsprechendes Sicherheitskonzept verhindert werden (siehe AP 2230). Die

Ergebnisse der Überladetests bilden hier die Basis für eine entsprechende Gefährdungsanalyse welche dann die Grundlage für die Auslegung des Sicherheitskonzeptes darstellt.

Im Gegensatz dazu kann die Ausgasung einer Zelle aufgrund eines internen Zellkurzschlusses verursacht z.B. durch eine Verunreinigung (Eisenspan) oder durch einen mechanischen Defekt (Riss/ Bruch des Separators) durch ein Sicherheitskonzept nicht verhindert werden. Die Auslegung des Batteriesystems muss daher so ausgelegt werden, dass die Ausgasung einer Zelle nicht zu einer Gefährdung führt.

Ziel war es, eine Testkonstruktion zu entwickeln, die eine Ausgasung durch interne Kurzschlüsse provoziert um den Unterschied zu einer Ausgasung durch Überladung zu analysieren. Folgende Bilder zeigen die Testkonstruktion welche die Möglichkeit bietet mittels einer Bohrmaschine entweder eine Nadel oder einen Bohrer in die Zelle zu intrudieren. Aus Sicherheitsgründen wurde diese Konstruktion mittels einer Hydraulik fernbedienbar ausgeführt. Um den „Worst-Case“ darzustellen, wurde eine zweite Zelle elektrisch parallel geschaltet. Bei einem internen Zellkurzschluss wird damit auch die Energie der zweiten Zelle verwendet (siehe AP 3100).



Abbildung 8 Testsystem zur Provozierung von internen Zellkurzschlüssen

Durchführung, Analyse und Bewertung von Ausgastests unterschiedlicher Zellen

Es wurden in diesem Arbeitspaket das Ausgasverhalten zwei unterschiedliche Arten von Zelltechnologien (Pouch-Zellen, Metal-Can-Zellen) untersucht.

Folgende Test wurden im Rahmen des AP 3500 durchgeführt: Überladung einer Pouch-Zelle

- Kurzschluss eines Moduls mit prismatischen Zellen
- Provozierung von internen Zellkurzschlüssen
- Überhitzung einer Metal-Can Zelle (Overheat Test)
- Gasanalyse

Folgende wichtige Erkenntnisse wurden aus der Analyse der durchgeführten Tests gewonnen:

- 1) Aus den gewonnenen Testdaten wurde ersichtlich, dass Pouch und Metal-Can Zellen sich in Bezug auf das Ausgasverhalten wesentlich unterscheiden:

Pouch-Zellen, deren Gehäuse aus einer dünnen Kunststoffolie besteht öffnen sich bei einer Ausgasung unkontrolliert. Die Kunststoffolie wird bei den auftretenden Temperaturen meist vollständig zerstört. Nach intensiven Diskussionen mit Zellherstellern wurde klar, dass eine Verbesserung des Pouch-Zelle-Designs bezüglich dem Ausgasverhalten in absehbarer Zeit nicht möglich ist. Die Erkenntnisse aus diesem Arbeitstakte bestärken somit den bereits von Magna E-Car Systems durchgeführten Schwenk von der Pouch-Technologie zur Metal-Can Technologie.

Metal-Can Zellen: Im Gegensatz zu Pouch-Zellen, besteht das Gehäuse von Metal-Can Zellen aus Metall (derzeit Stahl) welche beim Ausgasen nicht zerstört wird. Das Gehäuse weist eine Berstscheibe auf, welches eine gerichtete Ausgasung durch eine definierte Öffnung ermöglicht. Dadurch wird eine gerichtete Ausgasung ermöglicht.

- 2) Eine weitere Erkenntnis aus diesem Arbeitspaket ist, dass sich das Verhalten der Ausgasung bei einer Überladen und das Verhalten einer Ausgasung bei einem internen Zellkurzschluss wesentlich unterscheiden. Es konnte damit bestätigt werden, dass die Ausgasung durch Überladen den Worst-Case darstellt. Dies Begründet sich dadurch, dass die gespeicherte Energie bei einer Überladung etwa 100 % über der normalen Vollladung liegt.
- 3) Die bereits durchgeführten Ausgasversuche führten zur Erkenntnis, dass das Verhalten der Ausgasung wesentlich durch die in der Umgebung zur Verfügung stehende Luft beeinflusst wird. Bei der Charakterisierung des Ausgasverhaltens ist also zu berücksichtigen, dass nur eine dem Batteriesystem entsprechende Luftmenge zur Verfügung steht. Dies ist mit dem in diesem Arbeitspaket entwickelten Druckbehälter-Testsystem nun möglich.
- 4) Die Erkenntnisse aus dem Überhitzungstest zeigten, dass erst jenseits einer Zelltemperatur von 200 °C eine Gefährdung durch das Ausgasen der Zelle auftritt. Das Ergebnis zeigt, dass die Lithiumeisenphosphat-Technologie überraschend temperaturstabil ist. Diese wichtige Erkenntnis wirkte sich positiv auf die Gefahrenanalyse und der anschließender FMEA aus.
- 5) Die durch das Druckbehälter-Testsystem ermöglichte Entnahme von Gasproben mit anschließender Gasanalyse bildete eine wichtige Grundlage für die Bestimmung des Gefährdungspotentials im Rahmen der durchgeführten Gefahrenanalyse.

Weiterentwicklung der Pouch-Zellen Technologie bezüglich Ausgasverhalten

Ein weiteres Ziel dieses Arbeitspaketes war die Optimierung des Pouch-Zellen-Designs im Hinblick auf das Ausgasverhalten. Bei einer Ausgasung einer Pouch-Zelle mit aktuellem Design reißt die Zelle unkontrolliert auf und wird während dem Ausgasungsvorgang zerstört. Eine gerichtete Ausgasung und damit eine kontrollierte Ableitung der aus der Zelle entweichenden Abusegase sind daher auf Zelleebene nicht möglich. Nach intensiven Diskussionen mit Zellherstellern wurde klar, dass eine Verbesserung des Pouch-Zelle-Designs bezüglich dem Ausgasverhalten in absehbarer Zeit nicht möglich ist. Daher wurde entschieden das Ausgasverhalten mittels eines geeigneten Modulkonzeptes zu verbessern. Dabei soll ein Rahmen den Siegelrand der Zelle zusätzlich verpressen. Eine definierte Aussparung des Rahmens soll als Ausgasungskanal fungieren.

Das größte Risiko ist hierbei, dass die Pouch-Zelle der Belastung der Pressung des Siegelrandes unter automotiv üblichen Vibrations-Einfluss nicht standhält. Deshalb wurde das Konzept im AP 3500 in Form

eines Prototypen umgesetzt und einem mechanischen Belastungstest unterzogen welcher ein positives Ergebnis brachte. Das folgende Bild zeigt den Aufbau des entwickelten Rahmenkonzepts.



Abbildung 9 Testmodul – Rahmenkonzept für Pouch-Zellen

Ein weiteres Risiko ist, dass im Falle einer Ausgasung einer Zelle, die Nachbarzelle auch ausgast. Aus diesem Grund wurde ein Versuch durchgeführt (AP 3500), bei dem eine hitzebeständige Epoxidharzplatte zwischen zwei Pouch-Zellen positioniert wurde. Der Thermal Runaway der Nachbarzelle konnte mit dieser Konstruktion verhindert werden. Dennoch wurde die Nachbarzelle durch die Hitzeeinwirkung geöffnet. Basierend auf diesem Konzept wurde eine Erfindungsmeldung ausgearbeitet.

Als weiteres Ergebnis in diesem Arbeitspaket wurde eine FMEA für ein Batteriesystem durchgeführt. Die Erstellung dieser FMEA wurde in enger Abstimmung mit dem AP 2230 durchgeführt. Die Ergebnisse sind in AP 2230 dargestellt.

Ventgas-Ableitungssysteme auf Systemebene

Wie bereits erwähnt weisen die Metal-Can Zellen eine Berstscheibe auf, die eine gerichtete Ausgasung ermöglicht. Auf Modulebene ist darauf zu achten, dass die Berstscheibe nicht verbaut ist und damit eine Ausgasung ungehindert vor sich gehen kann. Auf Systemebene wird am Gehäuse ein Überdruckventil installiert. Dieses Überdruckventil ist so spezifiziert, dass alle Druckschwankungen die im Normalbetrieb auftreten (Temperaturschwankungen, Vibrationen, Stöße, etc.) keine Auslösung des Ventils verursachen. Im Falle einer ausgasenden Zelle öffnet das Überdruckventil und leitet die Gase gerichtet nach außen ab. Das Gehäuse muss in diesem Fall die auftretenden Drücke standhalten. Die für die Auslegung notwendigen Basisinformationen über den Vorgang einer Ausgasung wurden in diesem Arbeitspaket erarbeitet. Dieses Konzept wurde in dem im AP 3500 aufgebauten Prototypen umgesetzt.

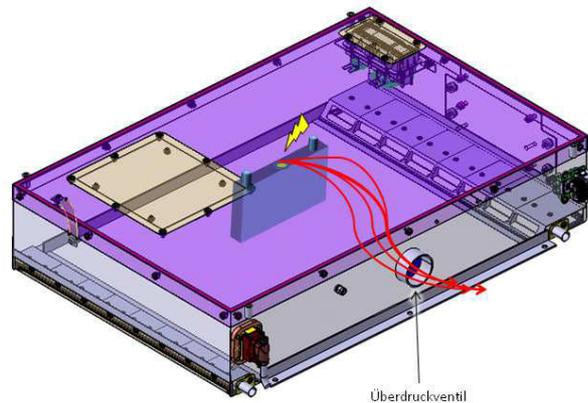


Abbildung 10 Ventgas-Ableitsystem auf Systemebene

5.6 Arbeitspaket 2210 Verbesserte Lebensdauerabschätzung mit Impulsverfahren

Die Abschätzung der Lebensdauer ist eine wesentliche Information um den Zeitpunkt eines Batterietausches korrekt zu prognostizieren. Die Alterung einer Zelle hängt von mehreren Parametern ab, die in komplexer Wechselwirkung zueinander stehen. Unter realen Bedingungen wird die Alterung von einzelnen Batteriezellen je nach Umgebungstemperatur, Energiedurchsatz, kalendarischer Alterung und dem Profil des Fahrzyklus sehr unterschiedlich ausfallen. Die derzeit verwendete Lebensdauerabschätzung unter Zuhilfenahme der auf eine Referenzalterung umgelegte tatsächliche Nutzung des Systems, kann die Alterung nur unzureichend abbilden und ist dadurch nur für eine grobe Abschätzung brauchbar.

Aufgabe in diesem Arbeitspaket war es, neuartige Algorithmen zu entwickeln, die zum einen im Fahrbetrieb Zustände finden, die sich für eine Abschätzung der Lebensdauer eignen, und zum anderen eine Lebensdauerbestimmung während des Betriebs durchführen. Durch die Anwendung dieser Methodik wird eine verbesserte Genauigkeit der Lebensdauerabschätzung erwartet.

Aus den vorhandenen Testdaten wurden Veränderungen der Kapazität (direkt verbunden mit dem Energieinhalt der Batterie) und des Innenwiderstandes (direkt verbunden mit der Leistungsfähigkeit der Batterie) analysiert und die Auswirkungen auf den Spannungsverlauf bei einem idealen Strompuls untersucht.

Der Innenwiderstand des Batteriesystems steht in direkter Relation mit dem Alterungszustand im Hinblick auf die Leistungsfähigkeit des Systems. Daher basiert die Bestimmung des Alterungszustandes auf der Bestimmung des Innenwiderstandes während des Fahrbetriebes. Der Innenwiderstand soll basierend auf der Sprungantwort eines Strompulses ermittelt werden. Folgendes Bild zeigt das Prinzip der Innenwiderstandsbestimmung basierend auf einem idealen Stromimpuls. Ein idealer Strompuls, im

Sinne dieses Arbeitspaketes, ändert seine Amplitude sprunghaft von Null auf einen Maximalwert und wieder auf Null (Prüfstands- oder Laborbedingungen).

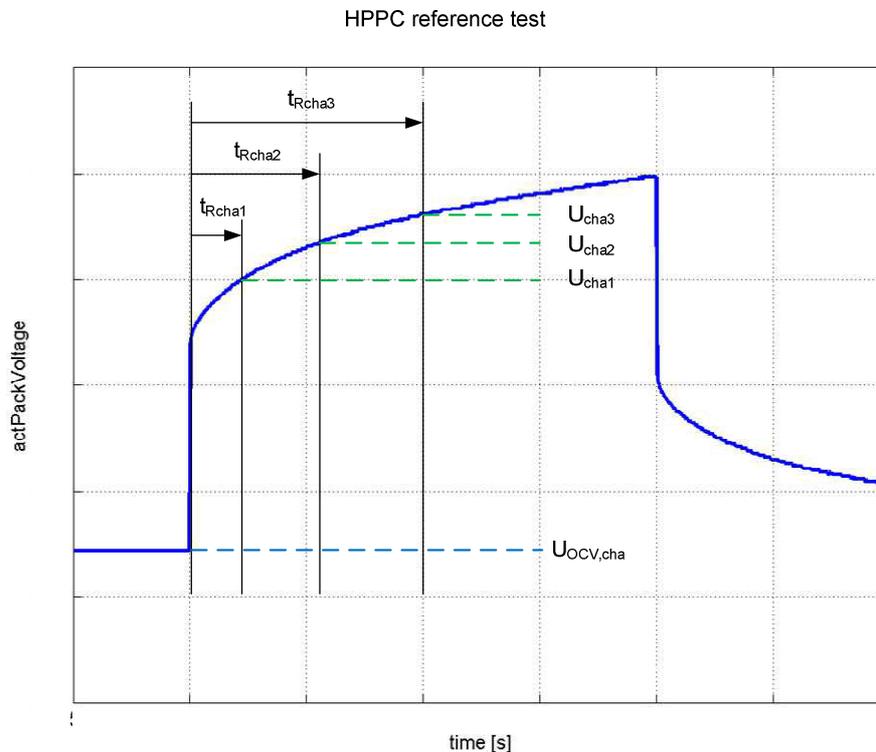


Abbildung 11 HPPC test pulse

Der Innenwiderstand berechnet sich durch folgende Formel:

$$R_{itcha1} = \frac{U_{cha1} - U_{OCV,cha}}{I_{cha}}$$

Der Innenwiderstand kann klarerweise für verschiedene Ladungszustände, Temperaturen, Pulszeiten und Stromhöhen ermittelt werden. Des weiteren wird hier ausschließlich die Ermittlung des Ladeinnenwiderstandes gezeigt, analoges gilt für die Ermittlung des Entladeinnenwiderstandes.

Als nächster Schritt wurden vorhandene Fahrzyklen nach wiederkehrenden Mustern analysiert, deren Auftreten eine Diagnose des Innenwiderstandes theoretisch ermöglicht. Aus diesen Mustern wurden Teilsignale ermittelt, mit welchen eine Testmatrix aufgebaut wurde, die einzelne Parameter eines realen Strompulses (Anstiegszeit, Amplitude, Vorimpuls, etc.) verändert. Diese Testmatrix wurde auf Modulbasis für 2 Temperaturen und verschiedene Ladungszustände am Prüfstand abgefahren.

Ziel der anschließenden Analyse der Testergebnisse war die Einsetzbarkeit der Lebensdauerbestimmung im realen Fahrbetrieb. Die Bestimmung sollte in regelmäßigen Abständen (ca. alle 200 Betriebsstunden) erfolgen, wobei nur der voraussichtliche Nutzungsbereich des Systems (25% bis 50% SOC) Berücksichtigung findet. Dadurch sind sehr niedrige (<20%) und sehr hohe SOC Bereiche (>60%) von den zulässigen Zuständen ausgeschlossen. Des weiteren waren durch die Testmatrix Einflussparameter auf die Qualität der Messung ersichtlich die im weiteren Verwendung fanden.

Die Analyse vorhandener Messdaten mit mehreren 1.000 Betriebsstunden eines Batteriesystems führte zu folgender Definition eines Pulskorridors, welcher eine hohe Wahrscheinlichkeit eines geeigneten Strompulses während eines normalen Betriebes erwarten lässt.

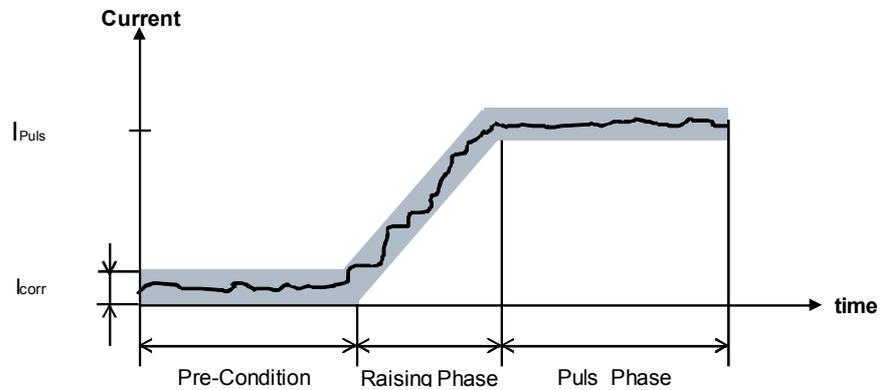


Abbildung 12 Pulskorridor für SOH Bestimmung

Ein Strompuls kann zur Bestimmung des Innenwiderstandes herangezogen werden wenn er folgende Kriterien erfüllt:

- Der Strom bleibt in einem definierten Korridor (I_{corr})
- Vorabbedingung: Rastperiode zumindest über eine Zeit
- Plusflanke: Stromanstieg auf eine Mindesthöhe (I_{Puls}) in einer definierten Mindestzeit
- Puls Phase: Strom bleibt auf einem Niveau für eine definierte Mindestzeit

Die modellbasierte Umsetzung des Algorithmus wurde erfolgreich durchgeführt. Die Implementierung und Validierung an realen Batteriesystemen erfolgt in einem Folgeprojekt.

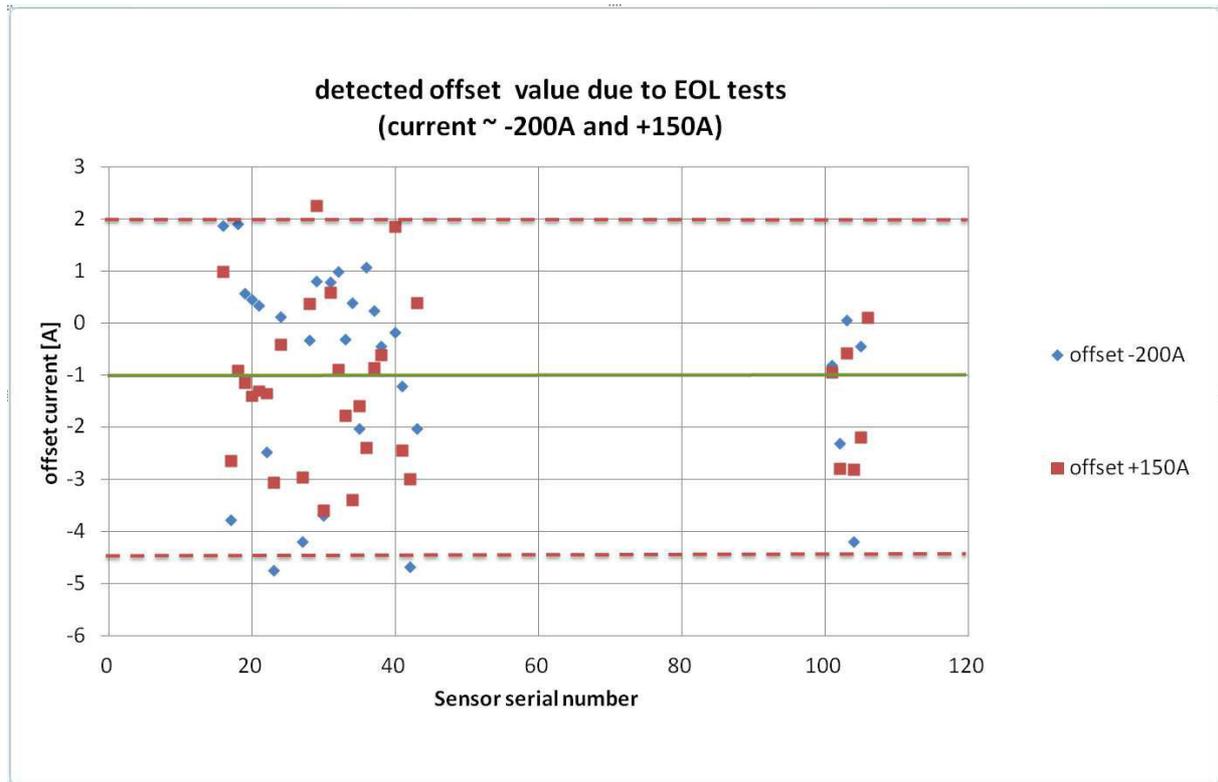
5.7 Arbeitspaket 2220 Verbesserte SOC-Bestimmung mit selbstadaptierendem Algorithmus

Die SOC (State-Of-Charge) Bestimmung ist ein komplexes Verfahren zur Ermittlung des aktuellen Ladezustandes der Batterie. Ein Fehler in der SOC Bestimmung kann einerseits zu einer nicht vollständigen Nutzung des Energie- bzw. des Leistungspotentiales oder andererseits zum Betrieb in einem nicht spezifizierten Bereich und damit zu einer vorzeitigen Alterung der Batteriezellen führen. Derzeit basiert die SOC-Bestimmung auf dem Verfahren des Coulomb-Counting welches bei gegebenem Start-SOC alle zu und abfließenden Ströme aufsummiert. Der Nachteil dieses Verfahrens ist, dass auch Messfehler aufsummiert werden die bei sehr langen Betriebszeiten zu erheblichen Fehlern führen können.

Die Genauigkeit der SOC-Bestimmung ist derzeit in bestimmten Betriebspunkten vor allem bei sehr langen durchgehenden Betriebszeiten unzureichend. Ein maßgeblicher Grund dafür ist der Offsetfehler des Stromsensors welcher abhängig von der Stromhöhe, der Vorgeschichte der Batterieaktivitäten und der Temperatur einen großen SOC Fehler verursachen kann. Ziel war die Entwicklung eines Offsetmodells, welches in die SOC-Berechnung aufgenommen wird und in Echtzeit eine Offsetkorrektur vornimmt.

Alle Messungen stellen hohe Ansprüche an das Testequipment sowie an die Auswertung, da die hierfür vermessenen Spannungskennlinien sehr flach sind. Aus diesem Grund war es notwendig, für Zellmessungen die Strommessung auf ein Shunt basiertes Messsystem umzubauen. Dennoch stellt die korrekte Interpretation der Messdaten eine große Herausforderung dar, weshalb einige Tests nochmals wiederholt werden mussten.

Der derzeit in Batteriesystemen eingesetzte Stromsensor mit zwei getrennten Messbereichen basiert auf dem Halleffekt und weist einige bekannte Nachteile auf, wie zum Beispiel einen Offset aufgrund vorhergehender Magnetisierung. In der folgenden Abbildung sind die Ergebnisse aus einigen Messreihen die mit verschiedenen Stromsensoren durchgeführt wurden dargestellt. Dabei wurden die Stromfehler für Entladepulse von -200A und Ladepulse von +150A bestimmt.



Das Ergebnis zeigt, dass die Sensorspezifikation eingehalten wird (strichlierte Linie), es aber zu großen Abweichungen in den Fehlern zwischen einem Ladepuls (roter Messpunkt) und einem Entladepuls (blauer Messpunkt) kommt.

Da in der aktuellen Applikation ein SOC Fenster von 25% bis 50% verwendet wird und im Bereich von 40% bis 65% die OCV-Kennlinie sehr flach ist, sind modellbasierte Korrekturen in diesem Bereich nicht in ausreichendem Maße möglich. Wird der Ladungszustand falsch ermittelt, und wird das Batteriesystem real bei einem höheren Ladungszustand betrieben als durch die Software ermittelt wird, findet eine beschleunigte Alterung des Systems statt (integrierter Strom-Offsetfehler). Da im Hybridbetrieb ein höherer Ladungszustand aus Betriebsstrategiegründen erwünscht ist, wird der Betrieb in diesem Bereich aufrecht erhalten. Dadurch kann es zu einer Langzeitdrift des realen Ladungszustandes in Richtung höherer SOC-Werte auftreten, welche die eingangs erwähnten negativen Folgen bezüglich Lebensdauer mit sich zieht.

Da der vorhin erwähnte Strom-Offset nicht direkt kompensiert werden kann, wurde eine weiterführende Methode (Stromoffsetkorrektur) entwickelt und erfolgreich implementiert um die Auswirkungen des Offset zu korrigieren. Sie verhindert im Fahrbetrieb eine Langzeitdrift des realen Ladungszustandes Richtung höherer SOC-Wert, indem Entladeströme für die Stromintegration mit einem Faktor < 1 gewichtet werden. Dadurch sinkt der reale Ladungszustand im Vergleich zum ermittelten Ladezustand beim Entladen der Batterie und die überlagerte Regelung reagiert im gewünschten Sinn. Der ermittelte, zu hohe, Ladezustand wird nach oben begrenzt. Der Faktor für die Integration wird aus der Historie des Systems ermittelt. Das heißt die Korrekturwertbestimmung erfolgt direkt auf Basis der realen aktuellen Nutzung des Systems und ist somit selbstadaptierend.

Um Korrekturingriffe für den Endkunden möglichst unbemerkt durchzuführen, darf sich der Korrekturwert im Betrieb nur langsam und in einem sehr eingeschränkten Parameterbereich ändern.

Die Funktion wurde mit einer Reihe von Messungen die zu einem Langzeittest bei verschiedenen Temperaturen zusammengefügt sind an mehreren Systemen getestet. Im Rahmen dieser Tests konnte gezeigt werden, dass nach einem hinreichend langen Betrieb des Systems, sowohl die Anzahl der notwendigen SOC-Korrekturen, als auch die Höhe der SOC Korrekturen wesentlich verringert werden konnten.

Die Entwicklung des Algorithmus wurde in diesem Arbeitspaket basierend auf Hochleistungssystemen (HEV) durchgeführt. Um eine generische Nutzung des Algorithmus auch für Hochenergieanwendungen (PHEV, EV) zu ermöglichen, wurde der entwickelte Algorithmus adaptiert und in die entsprechenden Softwareplattformen integriert.

Wissenschaftliche Arbeiten

Eine vielversprechende Möglichkeit der SOC Bestimmung stellt die Schätzung des Ladungszustandes mit Hilfe von Kalmanfiltern dar. Diese in der Literatur dargestellte Methode wurde im Rahmen einer Masterarbeit in Zusammenarbeit mit dem Institut für Signalverarbeitung und Sprachkommunikation der Technischen Universität Graz näher betrachtet und für ihre Anwendbarkeit auf verschiedene Zelltechnologien untersucht.

Battery modeling by means of statistical model, Masterarbeit Maria Schag

Der Schwerpunkt der Arbeit lag auf einer Bestimmung des Ladungszustandes basierend auf der Theorie der Kalman Filter. In Veröffentlichungen von Gregory L. Plett wurden diese vielversprechende Ansätze der Modellierung für Lithium-Polymer-Zellen dargestellt, die die Basis für die Untersuchungen an Lithium-Titanat und Lithium-Eisenphosphat-Zellen darstellten. Der Ansatz basiert auf einer Zustandsraumdarstellung um das Modellverhalten und die Dynamik des Systems (oder im Speziellen der Zelle) darzustellen. Dazu sind keine detaillierten Kenntnisse über die Zelle notwendig, Hystereseigenschaften und Relaxation sind einfach zu berücksichtigen. Wird der Ladungszustand als Zustandsgröße definiert und ist einmal das Modell mit seinen Parametern ermittelt, dann kann das Kalman-Filter zur Schätzung verwendet werden, wobei die aktuelle Messung zur Verbesserung des Schätzwertes herangezogen wird.

Die Qualität der Modellierung wurde anhand von Messungen bei unterschiedlichen Temperaturen und Ladungszuständen untersucht.

Die Arbeiten sind zum aktuellen Zeitpunkt abgeschlossen, die Dokumentation ist derzeit noch in der Fertigstellungsphase.

Als weitere Erkenntnis dieses Arbeitspaketes wurde ersichtlich, dass die unmittelbare Vorgeschichte der Batterieaktivitäten (Ladung bzw. Entladung) einen massiven Einfluss auf die Ermittlung des Ladezustandes hat (Hysterese-Effekt). Die Untersuchung dieses Effekts wurde als wichtig erkannt und als weiteres Thema in diesem Arbeitspaket aufgenommen. Die Grundlagen dieser Untersuchung wurden

im Rahmen einer Masterarbeit in Zusammenarbeit mit dem Institut für Regelungstechnik der Technischen Universität Graz durchgeführt:

Erstellung mathematischer Modelle für ein Energiespeichersystem, Masterarbeit Thomas Gallien

Die Arbeit verfolgte die Zielsetzung den Hystereseeffekt eines Energiespeichers bestehend aus Lithium-Eisenphosphat-Zellen zu untersuchen und nach Möglichkeit ein Hysteresemodell zu formulieren. Dabei wurden sowohl Ansätze der analytischen Modellierung durch Einführung entsprechender Diffusionsprozesse, als auch die empirisch motivierte Modellbildung verfolgt. Generell erwies sich die Modellierung der Hystereseeigenschaft als äußerst schwieriges Unterfangen, da seitens der Grundlagenforschung noch keine ausreichenden Erklärungen für das Zustandekommen der Hystereseeigenschaft vorliegen. Dies spiegelte sich auch in den Ergebnissen der Modellbildung wieder, sodass es sich als zweckmäßig erwies, die globale Sichtweise auf den Energiespeicher aufzugeben und stattdessen den Fokus auf ein lineares zeitinvariantes System mit langsam veränderlichen Parametern zu legen, dessen Dynamik sich hervorragend mit Hilfe simpler Identifikationsverfahren bestimmen lässt. Die gute Approximierbarkeit des Zellverhaltens mit Hilfe eines linearen Eingrößensystems lieferte Ergebnisse, die von der gängigen Festlegung einer RC-Ersatzschaltung wesentlich abwichen. Dieser Umstand sollte in weitergehenden Arbeiten eingehend betrachtet werden.

Es zeigte sich, dass die globale Beschreibung der Hystereseeigenschaft der untersuchten Lithium-Eisenphosphat-Zelle mit den angewandten Methoden sowohl der analytischen als auch der empirisch motivierten Modellbildung nicht hinreichend genau möglich war.

5.8 Arbeitspaket 2230 Weiterentwicklung BMU, CSC und Sensorik

Eine notwendige Voraussetzung für den Betrieb eines Batteriesystems, ist die exakte Bestimmung des Systemzustandes hinsichtlich Ladezustand, Leistungsfähigkeit und Sicherheit um daraus entsprechende Steuer- und Überwachungsaufgaben ableiten zu können. Diese Aufgaben wird von einem Steuergerät, der BMU (Batterie Management Unit) und einem umfangreichen Sensoriksystem mit dem zugehörigen Zell-Überwachungseinheiten (CSC-Cell Supervising Circuit) wahrgenommen. Dabei werden Zelltemperaturen, Zellspannungen, Systemspannung und Systemstrom kontinuierlich gemessen und dienen als Eingang für die verschiedenen Berechnungsalgorithmen (SOC, SOP, SOH) und dem Sicherheitskonzept. Nachfolgende Grafik stellt das funktionale Konzept des Steuer- und Überwachungssystem dar. Die Zellen werden von mehreren CSC's überwacht. Die Messdaten werden über eine serielle Kommunikation an die BMU gesendet. Basierend auf der von der BMU durchgeführten Auswertung der Messdaten werden Informationen bezüglich Systemzustand über die externe Kommunikationsschnittstelle kommuniziert und, falls notwendig, Steueraktionen eingeleitet.

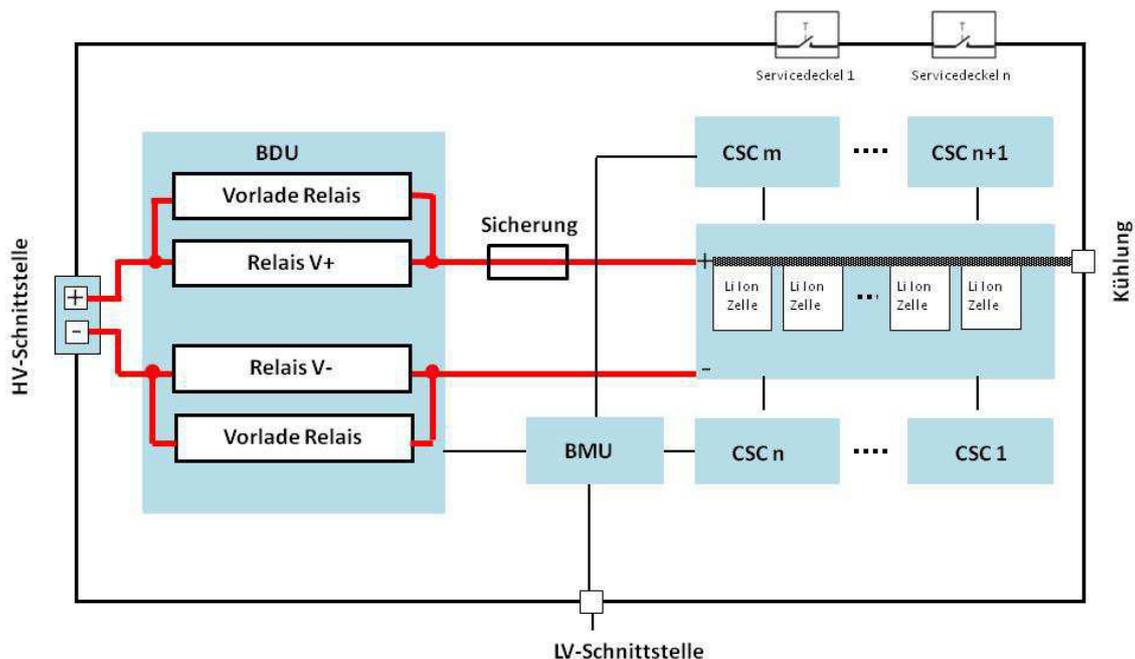


Abbildung 13 Funktionales Konzept des Steuer- und Überwachungssystems

Der ständig steigende Energieinhalt der Batteriesysteme und die wachsenden Anforderungen der Kunden hinsichtlich Kosten und Sicherheit führen zu den im Folgenden aufgelisteten Anforderungen an das Steuerungs- und Überwachungssystem. Das derzeit vorhandene Überwachungssystem ist nur für Hochleistungs- Batteriesysteme für den NFZ Bereich einer bestimmten Zellchemie (Lithium-Eisenphosphat) ausgelegt und eignet sich daher nicht für den Einsatz für Hochenergie-Batteriesysteme. Weiters basiert die derzeit vorhandene BMU auf einer redundanten Prozessorarchitektur mit gegenseitiger Überwachung und Synchronisierung. Der Nachteil ist neben der aufwendigen und teuren Architektur, die hohe Störanfälligkeit welche einen negativen Effekt auf die Verfügbarkeit des

Batteriesystems mit sich bringt. Auch die von Magna E-Car Systems in Zukunft geplanten Zellchemien (z.B. Lithium-Titanat, NMC) werden von der derzeit vorhandenen Elektronik nicht unterstützt.

Das Ziel dieses Arbeitspaket war es einen Funktionsprototypen eines elektronisches Überwachungs- und Steuerungssystem zu entwickeln, welcher folgende Anforderungen erfüllt:

- Allgemein
 - Erfüllung der Anforderungen des erforderlichen Sicherheitsintegritätslevel
 - Universelle Eignung für alle Batterietypen (HEV, PHEV, EV)
 - Unterstützung der in Zukunft geplanten Zellchemien
 - Verkleinerung der Baugröße
 - Kostensenkung

- CSC
 - Erhöhung der Messgenauigkeit für die Zellspannungsmessung
 - Erweiterung der Anschlussmöglichkeiten für Temperatursensoren
 - Hot-Plugfähigkeit: CSC-Steckmöglichkeit auch unter Spannung im Montage- /Wartungsfall
 - Erhöhung der Störfestigkeit der internen Kommunikationssysteme

- BMU
 - Zeitnahe Messung von Spannung Strom
 - Höhere Rechenleistung
 - Größerer Datenspeicher
 - Autosar-Fähigkeit

- Stromsensor
 - Erhöhung der Messgenauigkeit für die Strommessung

Im ersten Schritt wurde versucht, die detaillierte Spezifikation der Elektronikkomponenten aus aktuellen Kundenanforderungen abzuleiten. Es stellte sich jedoch heraus, dass die Kundenanforderungen sehr widersprüchlich und teilweise sehr überzogen waren. Ein Überwachungssystem, das alle Kundenansprüchen erfüllt, wäre um ein Vielfaches zu teuer. Daher war es notwendig im ersten Schritt übergeordnete Systemanforderungen zu erstellen welche spezifisch für die geplante Magna E-Car Systems Produktpalette die Basis für eine Ableitung von Komponenten-Spezifikationen darstellen. Dazu wurden alle derzeit bekannten Kundenanforderungen, Marktanalysen und alle Anforderungen aus dem Produktmanagement (basierend auf der Magna E-Car Technologieroadmap) zusammengeführt. In der anschließenden Bewertungs- und Analysephase wurde von Produktmanagern und Experten eine Filterung der vorhandenen Informationen durchgeführt. Als Ergebnis wurde ein Dokument generiert, in welchem die aus Sicht von Magna E-Car Systems realistische Systemanforderungen an Batteriesystemen abgestimmt auf den Magna E-Car Systems Technologie Roadmap definiert sind.

Sicherheitskonzept

Eine wesentliche Aufgabe der Elektronik ist die Überwachung und Steuerung der Sicherheit.

Als erster Schritt wurde in Zusammenarbeit mit einer externen Beratungsfirma eine Gefahrenanalyse für Energiespeicher durchgeführt.

Das nachfolgende Diagramm stellt das Ergebnis der Gefahrenanalyse dar. Die Gefahren, welche von einem Batteriesystem ausgehen können und deren Verknüpfung zu den möglichen Ursachen werden dargestellt. Anschließend wurde eine FMEA basierend auf der Norm ISO26262 „Road vehicles – Functional safety“ durchgeführt. Die Sicherheitseinstufung ergab für das PHEV Batteriesystem eine Sicherheitsstufe von ASIL B. Damit war der ursprünglich geplante Schritt von ASIL B auf ASIL C für das PHEV – Batteriesystem nicht notwendig. Das Steuer- und Überwachungssystem wurde entsprechend der Sicherheitsstufe ASIL B entwickelt. Jedoch wurde die Architektur bereits so ausgelegt, dass mit adäquatem Mehraufwand die Sicherheitsstufe ASIL C erreicht werden kann. Tritt der Fall ein, dass ein Steuer- und Überwachungssystem mit einer Sicherheitsstufe ASIL C benötigt wird (eventuell für große Batteriesystemen für reine Elektrofahrzeugen notwendig), so kann auf den entwickelnden Prototypen zurückgegriffen werden. Die Software, die Validierung und die Zertifizierung müssen in diesem Fall nach den von der Norm vorgegebenen strengeren Richtlinien überarbeitet werden. In Fachkreisen spricht man hier von „Fit for purpose ASIL C“.

ASIL Level	Random hardware failure target values
D	$< 10^{-8} h^{-1}$
C	$< 10^{-7} h^{-1}$
B	$< 10^{-7} h^{-1}$
A	$< 10^{-6} h^{-1}$

Abbildung 14 ASIL nach Norm ISO 26262

Die Methode der Minimierung des Risikos wurde als zugrundeliegender Ansatz für das zu entwickelnde Sicherheitssystem gewählt. Demnach wird das initial vorhandene Risiko durch risikominimierende Maßnahmen auf ein tolerierbares Risiko verringert. Die genauen Ausfallwahrscheinlichkeiten des Sicherheitssystems sind abhängig vom initial vorhandenen Risiko und werden von den Sicherheitsnormen wie, ISO 26262 vorgeben.

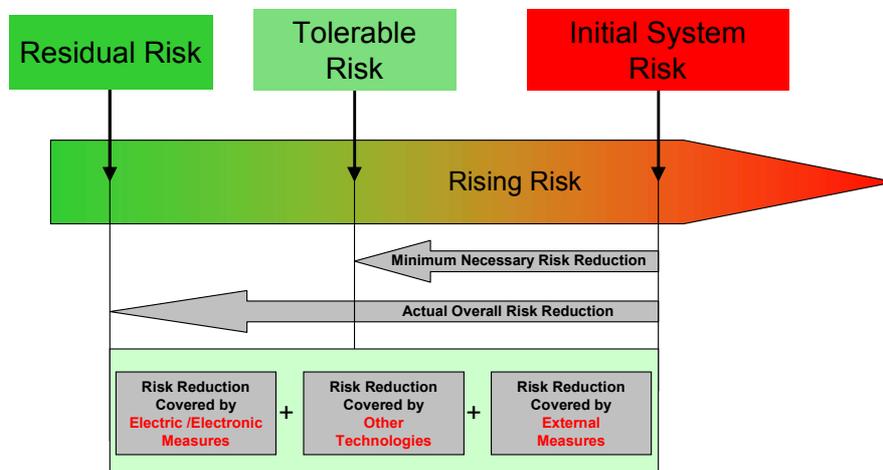


Abbildung 15 Ansatz zur Minimierung des Risikos

Basierend auf diesem Ansatz und dem Ergebnis der Gefahrenanalyse wurden die notwendigen risikominimierenden Maßnahmen für ein Batterie-Sicherheitskonzept definiert.

Die Kernkomponenten des Sicherheitssystems stellten der Prozessor für die BMU und der Chip für das CSC dar. Basierend auf der definierten Systemarchitektur und den abgeleiteten Systemanforderungen wurde in einer umfangreichen Marktrecherche geeignete Bauteile ermittelt. Es wurden sowohl die technischen Leistungsdaten als auch nicht technische Kriterien wie Verfügbarkeit, Preis, Support etc. mit in die Bewertung aufgenommen.

Auswahl BMU-Prozessor

Positiv zu vermerken ist, dass die Prozessorhersteller auf die Marktanforderungen bereits reagiert haben und die ersten sogenannten „Doppelkernprozessoren“ anbieten. Diese integrieren die Funktionalität von zwei redundanten Prozessoren auf einem Chip und bieten damit eine kostengünstige Basis für eine sicherheitsrelevante Entwicklung bis zu einem Sicherheitsintegritätslevel von ASIL-C (Lockstep Technologie). Drei Prozessoren wurden einer genaueren Analyse unterzogen. Das Ergebnis war, dass alle Prozessoren die technischen Anforderungen erfüllen konnten. Die Auswahl wurde daher anhand der Kosten durchgeführt.

Auswahl CSC-Chip

Sechs unterschiedliche CSC-Chips wurden untersucht. Weniger erfreulich ist die Erkenntnis, dass die Sicherheitsthematik bislang von keinem der Hersteller berücksichtigt wurde. Daher muss die Sicherheitsintegrität durch externe Test- und Überwachungsbeschaltung gewährleistet werden, was zusätzliche erhebliche Kosten und Entwicklungsaufwände mit sich bringt. Dazu ist die Kenntnis der detaillierten inneren Funktionsweise der Elektronikbauteile notwendig. Leider konnte aus konzernpolitischen Gründen der technisch präferierte Chip-Hersteller diese Informationen nicht offenlegen. Somit musste die Entwicklung dieser Funktionsprototypen gestoppt und die Entwicklung mit einem anderen Chip-Hersteller neu gestartet werden.

Weiters bietet lediglich ein Hersteller von CSC-Chips eine verbesserte Kommunikationsschnittstelle (differentielle Stromschnittstelle) an. Alle anderen verwenden eine SPI-Schnittstelle, welche sich nur für Kommunikationsstrecken ca. 10 cm eignet. Dies ist für Anwendungen in großen Batteriesystemen nicht ausreichend welche Kommunikationsstrecken bis zu 1 m benötigen.

Battery Management Unit (BMU)

Auf Basis des Sicherheitskonzeptes wurde der Schaltplan für die BMU entwickelt und anschließend Funktionsprototypen von einem Elektronik-Lieferanten aufgebaut. Die anschließende durchgeführte umfangreiche Validierung konnte erfolgreich abgeschlossen werden.

Cell Supervise Circuit (CSC)

Auf Basis des Sicherheitskonzeptes wurde der Schaltplan für das CSC entwickelt und anschließend Funktionsprototypen von einem Elektronik-Lieferanten aufgebaut. Die anschließend durchgeführte umfangreiche Validierung konnte erfolgreich abgeschlossen werden.

Stromsensor

Ergänzend zur Temperatur- und Spannungsmessung, welche von den CSCs durchgeführt wird, ist der Strom eine wesentliche Messgröße zur Bestimmung des Systemzustandes der Batterie. Die Strommessung wird von einem Stromsensor durchgeführt und liefert zum einen die wesentliche Eingangsgröße für die SOX-Algorithmen (Coulomb-Counting) und zum anderen die Grundlage für Sicherheitsfunktionen.

Der derzeit verwendete Stromsensor basiert auf der HALL-Technologie und weist eine Genauigkeit auf, die insbesondere für die SOX-Algorithmen nicht ausreichend ist. Auch bezüglich Stromsensoren wurde eine Marktrecherche durchgeführt. Die anschließende Bewertung der Recherchen zeigte, dass Shunt-Basierte Stromsensoren wesentlich höhere Genauigkeiten versprechen.

Im Zuge der Erstellung des Sicherheitskonzeptes wurde ersichtlich, dass die Strommessung teilweise für sicherheitsrelevante Funktionen verwendet werden muss (Relaischädigungsdiagnose). Daher ist es notwendig den Stromsensor sicherheitsrelevant auszulegen. Leider bietet derzeit kein Stromsensorhersteller einen sicherheitsrelevanten ausgelegten Stromsensor an. Eine Analyse führte zu der Erkenntnis, dass ein Stromsensor im Betrieb nur schwer mit der aus sicherheitstechnischen Vorgaben ausreichenden Genauigkeit und Geschwindigkeit testbar ist. Daher wurde entschieden, den Stromsensor redundant aufzubauen. Dabei muss ein Stromsensor die hohen Genauigkeiten für die Ermittlung der Systemzustände (SOX) aufweisen und wurde daher in der Shunt-basierte Technologie ausgeführt. Da der zweite Stromsensor nur eine Überwachungsfunktion hat kann er mit einer niedrigeren Genauigkeit ausgeführt sein. Um zusätzlich die Sicherheit zu erhöhen, wurde entschieden, die Stromsensoren in unterschiedlichen Technologien auszuführen (diversifizierte Technologien). Deshalb wurde der zweite Stromsensor in der HALL-Technologie ausgeführt.

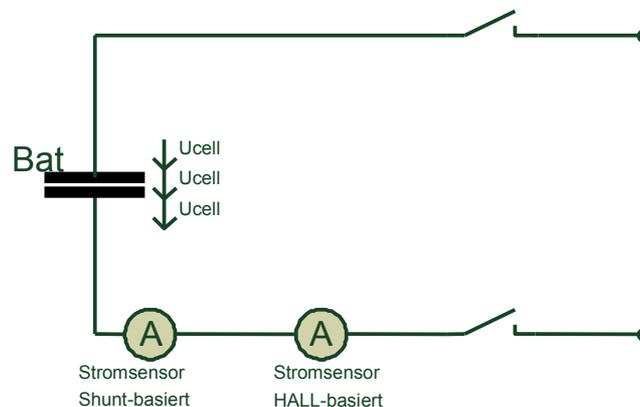


Abbildung 16 Redundante Stromsensorarchitektur

Ein Prototyp des Stromsensors wurde aufgebaut und konnte erfolgreich validiert werden.

Entwicklung Basissoftware

Um auf dem ausgewählten Prozessor Steuer- und Überwachungsfunktionen ausführen zu können, ist ein entsprechendes Betriebssystem und eine darauf aufbauende Basissoftware notwendig welche die Grundfunktionen wie z.B. Treiber für Kommunikation und Speicherzugriffe zur Verfügung stellt. Ziel war die Entwicklung AUTOSAR-konformer SW-Module und Beschreibungsdateien, um die Kompatibilität und den Datenaustausch zwischen Basis-SW und Funktionssoftware standardisiert basierend auf einem internationalen Standard sicherzustellen. Die Umsetzung erfolgte nach dem aktuellsten automotiven Software-Standard „Autosar Version 3“.

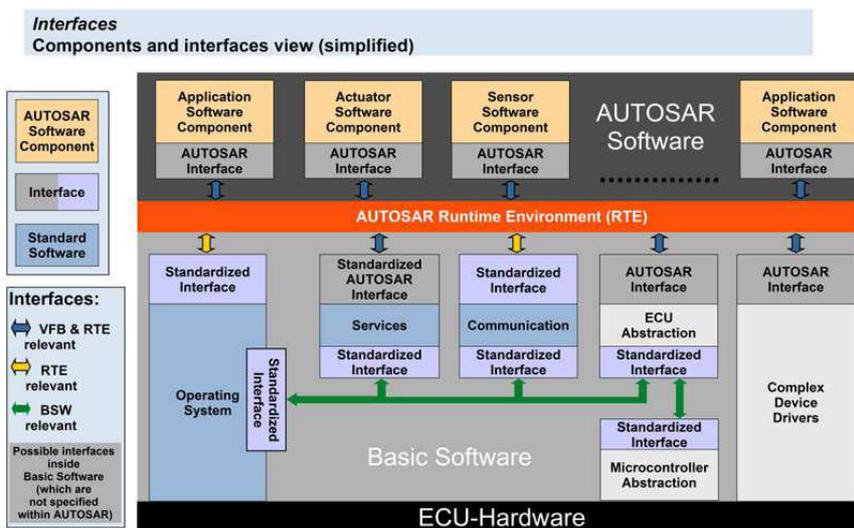


Abbildung 17 AUTOSAR Architektur

Die dazu notwendige Tool-Kette wurde entwickelt. Weiters musste berücksichtigt werden, dass das Betriebssystem und die Basissoftware den notwendige Sicherheitsintegritätslevel („Freedom from Interference“ zwischen Softwarekomponenten) aufweisen um dann eine sicherheitsrelevante Funktionssoftware ausführen zu können. Leider gibt es derzeit keinen Anbieter der ein AUTOSAR-fähiges Betriebssystem mit dem entsprechenden Sicherheitsintegritätslevel anbietet. Aus diesem Grund musste das Betriebssystem weiterentwickelt werden um die gewünschten Sicherheitsanforderungen zu erfüllen.

Die Basissoftware wurde in diesem Arbeitspaket erfolgreich nach den gewünschten Vorgaben erstellt. Die Inbetriebnahme einer BMU/CSC-Konfiguration und damit die Validierung der Funktionsprototypen wurde durchgeführt. Die Validierung konnte erfolgreich abgeschlossen werden.

Als nächster Schritte ist die Adaptierung der Funktionssoftware zum einen hinsichtlich AUTOSAR-Kompatibilität und zum anderen hinsichtlich der bestmöglichen Nutzung der durch die neu entwickelte HW-Plattform dargestellten Vorteile und Innovationen.

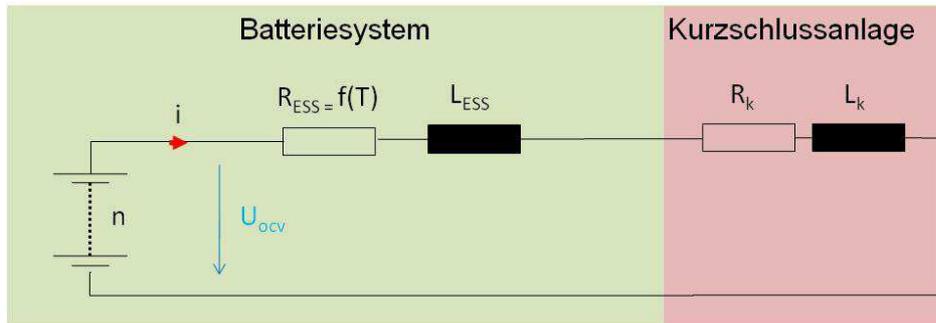
5.9 Arbeitspaket 2310 Abschaltstrategie bei hohen Strömen

Die Batteriezellen für automotiv Anwendungen werden kontinuierlich leistungsfähiger. Der Nachteil dieser Entwicklung liegt darin, dass auch die Kurzschlussströme und damit die Anforderungen an die Komponenten im Hochvolt-Kreis, insbesondere an die Stromtragfähigkeit der Trennrelais und der Stromunterbrechungsfähigkeit der Schmelzsicherung im gleichen Maße steigen. Mit den bisherigen Konzepten für NFZ-Leistungs-Batterien können Kurzschluss-Ströme im Störfall bis etwa 4000A sicher getrennt werden. Das Risiko beim Thema Abschaltstrategie ist im Wesentlichen durch die Verfügbarkeit geeigneter Komponenten am Markt bestimmt, welche insbesondere die hohen Stromanforderungen aber auch die Anforderungen an die Isolationsfestigkeit erfüllen sollen. Ziel dieses Arbeitspaketes war es, eine technisch und wirtschaftlich umsetzbare Lösung für eine möglichst universell einsetzbare Abschaltvorrichtung darzustellen.

Ausgehend von einer umfangreichen Ist-Analyse wurden gesetzliche Regelungen, Normen, Kundenlastenhefte, Wettbewerbsinformationen und Patente bezüglich der Anforderungen an ein Abschaltsystem für Batteriesysteme und deren Komponenten untersucht. Aus diesen Untersuchungen wurde ersichtlich, dass die Kombination aus Sicherung und Relais derzeit die einzig geeignete und erlaubte technische Lösung für das Abschalten bei Überstrom und Kurzschluss darstellt, da im sicheren Zustand (Ruhezustand) eine allseitige galvanische Trennung gefordert ist. In keinem der untersuchten Dokumente wurde eine von der Wirkungsweise gänzlich andere Technologie verwendet. Weiters zeigten Voruntersuchungen, dass alternative Abschalttechnologien wie die Pyrotechnik oder Halbleitertechnik sich mittelfristig nicht technisch umsetzen lassen.

Die Komponenten im Abschaltsystem werden auf Basis der maximal auftretenden Ströme dimensioniert. Um ein generisches Abschaltkonzept zu entwickeln ist es notwendig, die maximal auftretenden Kurzschlussströme zu kennen welche grundsätzlich von folgenden Faktoren beeinflusst werden:

- Zellaufbau und Zellchemie
Zellaufbau und Zellchemie bestimmen den Innenwiderstand der Zelle, welcher das maßgeblich Kriterium des Kurzschlussstromes auf Zellebene darstellt. Dabei muss berücksichtigt werden, dass der Innenwiderstand von Li-Ionen Zellen stark temperaturabhängig ist.
- Systemarchitektur: Anzahl der Zellen, Parallelschaltung von Zellen etc.
Im Allgemeinen werden aus Kostengründen die Kurzschlussströme auf Zellebene durchgeführt. Für die Auslegung der Abschalt-Komponenten sind jedoch Ströme auf Systemebene entscheidend. Aus diesem Grund wurde eine Berechnungsmethode entwickelt, welche eine Abschätzung des Systemkurzschlussstromes auf Basis von Zell-Kurzschlussströmen erlaubt. Das zugrundeliegende Ersatzschaltbild wird im folgenden Bild dargestellt:



U_{ocv}	...	Open Circuit Voltage
R_{ESS}	...	Gesamter ohmscher Widerstand des Batteriesystems –Innenwiderstand der Batteriezelle –Widerstand Zellverbinder –Widerstand Modulverbinder –Verbindungswiderstände pro Modul –Widerstände der Verkabelung, BDU, Sicherung, HV Stecker
L_{ESS}	...	Induktivität des Batteriesystems
R_k	...	Ohmscher Widerstand der Kurzschlussanlage
L_k	...	Induktivität der Kurzschlussanlage
I	...	(Kurzschluss) Strom

Abbildung 18 Ersatzschaltbild Berechnung Kurzschlussstrom

- Prüfverfahren

Der Kurzschlussstrom hängt wesentlich vom Abschlusswiderstand während des Prüfversuches ab. Bislang gibt es noch keine Norm die ein Prüfverfahren zur Auslegung der Sicherung eines automotiven Batteriesystems definiert. Bislang wurden die Kurzschluss tests nach der in der Automobilindustrie anerkannten Richtlinie „Freedom Car“ durchgeführt, welche einen Abschlusswiderstand von 5 mOhm auf Systemebene festlegt. Damit würden sich jedoch für große Batteriesysteme Kurzschlussströme von über 10.000 A ergeben. Derzeit ist seitens Magna E-Car kein Hersteller bekannt welcher automotiv taugliche HV-Komponenten mit Stromtrag- bzw. Abschaltfähigkeiten in diesem Bereich anbietet. Basierend auf die im AP 2120 durchgeführten Recherchen bzgl. Charakterisierung des Kurzschlussverhaltens wurde der interne Magna E-Car Standard des Kurzschluss-Abschlusswiderstand mit $\leq 100 \text{ m}\Omega$ festgelegt (näheres in der Beschreibung des AP 2120). Damit wird der Kurzschlussstrom wesentlich gesenkt. Folgendes Bild verdeutlicht den signifikanten Unterschied im Kurzschlussstrom bei Verwendung verschiedener Abschlusswiderstände. Das Bild zeigt das Ergebnis der Berechnung für ein System basierend auf der in diesem Projekt entwickelten 50 Ah Zelle. Das Risiko keine Komponenten am Markt zu erhalten ist somit obsolet.

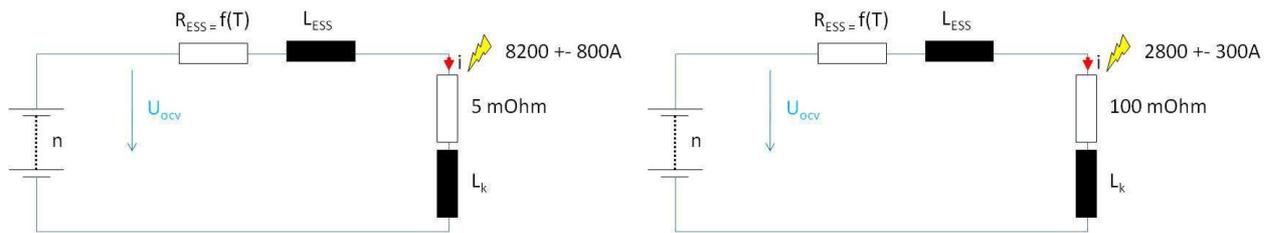


Abbildung 19 links: 5 mOhm Abschlusswiderstand; rechts: 100 mOhm Abschlusswiderstand

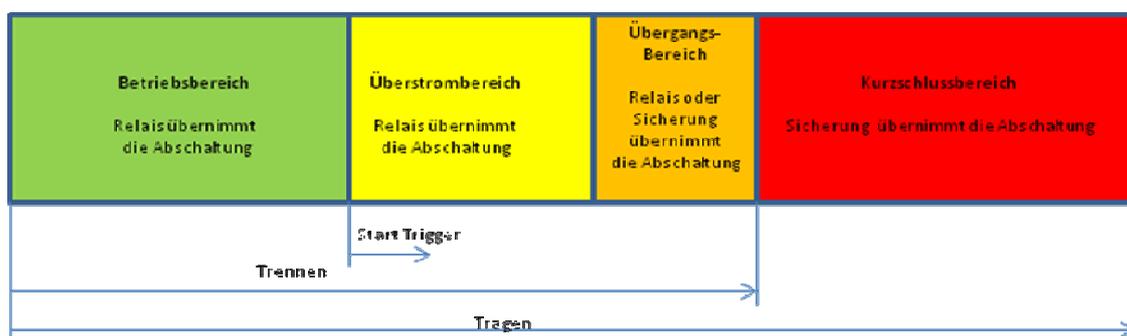
Abschaltestrategie

Grundsätzlich wird bei Batteriesystemen zwischen zwei unterschiedlichen Arten von Abschaltung unterschieden:

- Abschaltung im normalen Betriebsfall
 - o Hohe Anforderungen an Schaltzyklenanzahl über Lebensdauer
 - o Geringe Anforderungen an den Schaltstrom

- Abschaltung im Missbrauchsfall (Kurzschluss)
 - o Hohe Anforderungen an den Schaltstrom
 - o Keine Anforderungen an die Schaltzyklenanzahl. Strom braucht nur zerstörungsfrei getragen werden können.

Je nach Abschaltedefall sind verschiedene Komponenten an der Abschaltung beteiligt. Aus diesem Grund war es notwendig, eine Strategie zu entwickeln, die das Zusammenspiel von den Komponenten Relais und Sicherung definiert. Im ersten Schritt wurden für das gesamte Abschaltensystem folgende Betriebsbereiche festgelegt:



- Betriebsbereich
In diesem Bereich übernehmen die Relais die Abschaltung. In diesem Bereich muss die geforderte Lebensdauer (Schaltzyklenanzahl laut Lastenheft) erreicht werden.
- Überstrombereich
Dieser Bereich liegt über dem normalen Betriebsbereich der Relais aber unterhalb der Auslösegrenze der Sicherung. Dieser Bereich ist nicht laut Betriebsstrategie nicht dauerhaft erlaubt darf aber, abhängig von der eingesetzten Zellchemie, kurzzeitig eingenommen werden (Overshoot). In diesem Bereich übernehmen die Relais die Abschaltung. Die Abschaltung muss zerstörungsfrei funktionieren, jedoch muss die geforderte Schaltzyklenanzahl laut Lastenheft nicht erreicht werden. Je nach Anwendung dürfen Abschaltungen in diesem Bereich je nach Stromhöhe nur mehr 1-10 Mal durchgeführt werden.
- Übergangsbereich
Aus Sicherheitsgründen wird das Zusammenspiel von Relais und Sicherung so ausgelegt, dass sich die Betriebsbereiche von der Sicherung (Sicherung übernimmt die Abschaltung) und von den Relais (Relais übernimmt die Abschaltung) überlappen. Dieser Bereich stellt den Grenzbereich dar. Welche der beiden Komponenten die Abschaltung vornimmt, kann nicht vorausgesagt werden. Daher wurde für diesen Bereich folgende Strategie definiert: Bei Übersteigen der Betriebsbereich-Überstrombereich-Grenze wird ein Timer gestartet (Start Trigger). Ist der Strom nach einer bestimmten Zeit (abhängig von der Systemauslegung) noch immer vorhanden, so wird angenommen, dass sich der Strom im Übergangsbereich befindet, jedoch noch zu klein ist, um ein Auslösen der Sicherung zu verursachen. Somit werden nach Ablauf dieser definierten Zeit die Relais geöffnet. Die Abschaltung in diesem Betriebsbereich muss zerstörungsfrei funktionieren, jedoch darf das Batteriesystem nach einer Abschaltung im Übergangsbereich nicht mehr in Betrieb genommen werden.
- Kurzschlussbereich
In diesem Bereich erfolgt die Abschaltung ausschließlich durch die Sicherung. Alle Komponenten müssen den Kurzschlussstrom bis zur Abschaltung durch die Sicherung zerstörungsfrei tragen können. Der Relais-Grenzparameter für diesen Betriebsbereich wurde als „Stromtragfähigkeit“ definiert.

Die Grenzparameter der Relais sind abhängig von Zellgröße, Systemgröße und eingesetzter Zellchemie und sind somit für jedes System unterschiedlich. Die ermittelten Grenzparameter der ausgewählten Abschaltkomponenten bilden dann die Grundlage für das Relaisschädigungsmodell, welches die Relaisschädigung in Abhängigkeit der Schaltvorgänge und des Schaltstromes ermittelt und den Austausch der Relais nach Überschreiten der Lebensdauergerade vorgibt.

Abweichend zum Förderantrag wird der Aufbau eines Batteriemodul-Prototyps für die Überprüfung auf Modulebene nicht durchgeführt. Die Erkenntnisse aus diesem Arbeitspaket ergaben, dass dieser Test nicht repräsentativ für das Systemverhalten wäre. Die in diesem Arbeitspaket entwickelte Berechnungsmethode erlaubt eine hinreichend genaue Abschätzung des Systemkurzschlussstromes auf

Basis von Zell-Kurzschlussströmen. Da die Hersteller die Grenzparameter im benötigten Detaillierungsgrad nicht zur Verfügung stellen konnten wurde anstatt der Überprüfung des Abschaltkonzeptes auf Modulebene ein Schwerpunkt in diesem Arbeitspaket auf die Ermittlung der Relais-Grenzparameter gelegt. Als Basis dienten dabei die Ergebnisse aus dem Berechnungsteil dieses Arbeitspaketes.

Ermittlung der Grenzparameter von Relais

Basierend auf der entwickelten Abschaltstrategie wurde eine Marktrecherche durchgeführt. Für eine Auswahl an in Frage kommenden Relais wurden nachfolgend die Grenzparameter ermittelt. Folgende Tabelle stellt die Ergebnisse dar. Nur zwei Relais konnten alle Anforderungen an die Grenzparameter erfüllen.

Tabelle 3 Ermittlung Relais-Grenzparameter

Kenndaten \ MC Hersteller	Relais 1	Relais 2	Relais 3	Relais 4	Relais 5
Spannungsbereich	✓	✓	✓	✓	✓
Stromtragfähigkeit Betriebsbereich	✓	✓	✓	✗	✓
Stromtragefähigkeit Kurzschluss	✓	✓	✓	✗	✓
Schaltzyklen bei Betriebsstrom	✓	✓	✗	✓	✗
Schalten bei maximaler Abschaltstrom	✓	✓	✓	✗	✗
Übergangswidersand	✓	✓	✓	✓	✓
Entwicklungsstand Automotive tauglich	✓	✓	✓	✓	✓
Kosten	119 %	195 %	100 %	108 %	270 %

5.10 Arbeitspaket 2320 Elektrisches Verbindungskonzept für prismatische Zellbauform

Ein elektrisches Verbindungskonzept hat die Aufgabe, die einzelnen Zellen elektrisch möglichst verlustarm miteinander zu verbinden. Dabei ist darauf zu achten, dass die Verteilung der einzelnen Ströme symmetrisch ist um die Belastung der Zellen im gesamten System gleich zu verteilen. Ein weiteres Kriterium sind die Kosten. Pro Zelle werden zwei Verbindungseinheiten benötigt. In einem aus 200 Zellen bestehenden Batteriesystem sind somit 400 Verbindungseinheiten zu verbauen. Somit stellt das Verbindungskonzept einem wesentlichen Kostenfaktor sowohl in Bezug auf die Materialkosten als auch in Bezug auf die Produktionskosten (Taktzeiten) dar.

Die Anforderungen an ein Verbindungskonzept sind im Wesentlichen von der Zell-Bauform und von der Zellchemie abhängig. Das bisherige Konzept für NFZ-Leistungs-Batterien ist für kleine zylindrische Leistungs-Zellen ausgelegt. Aufgrund der Entscheidung prismatische Metal-Can-Zellen einzusetzen welche zu Beginn nur mit schaubaren Terminals erhältlich waren, war das Ziel dieses Arbeitspaketes ein neues Verbindungskonzept basierend auf Schraubverbindungen zu entwickeln.

Weiterführen wird in Fachkreisen bereits eine stoffschlüssige Zellverbindung auch bei prismatischen Zellen intensiv diskutiert. Nach internen Diskussionen mit Magna E-Car Systems Experten wurde diese Thema als wichtiges zukunftsweisendes Thema erkannt und zusätzlich in dieses Arbeitspaket aufgenommen.

Eine in diesem Arbeitspaket durchgeführte Marktrecherche ergab, dass es drei potentiell geeignete Verfahren für stoffschlüssige Verbindungen gibt (Laser-Schweißen, Schweißen mit Nanotechnologie, elektrisch leitfähiges Kleben), die im Rahmen dieses Arbeitspaketes evaluiert wurden. Das Ergebnis einer eingehenden Analyse dieser Technologien war, dass sowohl das elektrisch leitfähige Kleben als auch das Schweißen mittels Nanotechnologie den Anforderungen bzgl. Übergangswiderstand und Lebensdauer für automotiv taugliche Batteriesystemen nicht genügen. Somit konnten zwei technisch umsetzbare Verbindungstechnologien definiert werden:

- Schraubtechnologie
Die Zelle weist Terminals mit Gewindebolzen auf welche mit den Zellverbindern durch eine Schraubenmutter befestigt wird.
- Laserschweißtechnologie
Die Zellen weisen Schweißterminals auf welche mit den Zelleverbindern mittels Laserschweißung stoffschlüssig verbunden werden. Durch die exakte Steuerung der Laserschweißanlage ist es möglich den Wärmeeintrag auf die Terminals exakt zu bestimmen und zu steuern. Dadurch kann eine Überhitzung der Zelle aufgrund des schweißbedingten Wärmeeintrags ausgeschlossen werden.

Für beide Technologien wurde ein Prototyp aufgebaut und evaluiert. Folgende Tätigkeiten wurden durchgeführt:

- Schraubtechnologie
 - o Ermittlung des Anzugsmomentes
 - o Aufbau eines Zellverbundes mit 12 Zellen (geschraubt)
 - o Messungen Übergangswiderstand Schraubtechnologie
 - o Analyse und Bewertung der Messergebnisse

- Laserschweißtechnologie
 - o Laserschweißversuche
 - o Erstellung Schlibfbilder
 - o Eruiieren und Adaption der Laserschweißparameter
 - o Aufbau eines Zellverbundes mit 12 Zellen (geschweißt)
 - o Messungen Übergangswiderstand Laserschweißtechnologie
 - o Analyse und Bewertung der Messergebnisse
 - o

Die nachfolgende Analyse brachten folgende Ergebnisse:

Übergangswiderstand

Der durchschnittliche Übergangswiderstand beträgt

- 10 μOhm für einer Schraubverbindung und
- 13 μOhm für eine Laserschweißverbindung.

Für einen Zellverbund von 12 Zellen (zwei Verbinder pro Zelle) beträgt der Übergangswiderstand der Zellverbindungen somit

- 240 μOhm für einer Schraubverbindung und
- 312 μOhm für eine Laserschweißverbindung.

Der Innenwiderstand eines Moduls bedingt durch den Innenwiderstand einer Zelle beträgt je nach Zellchemie und Zelldesign durchschnittlich 25 mOhm. Der Innenwider des Zellverbundes wird somit durch die Zellverbindungen um 0,96 % bei einer Schraubverbindung und um 1,25 % bei einer Laserschweißtechnologie erhöht. Weiterführende Analysen ergaben, dass der Unterschied des Innenwiderstands von < 0,3 % tolerierbar ist und damit beide Verbindungstechnologien als gleichwertig bezüglich Übergangswiderstand angenommen werden können.

Der höhere Übergangswiderstand bei der Schweißvariante lässt sich dadurch erklären, dass die Schweißversuche auf Zellen mit Terminals für Schraubverbindungen durchgeführt wurden. Dadurch ist die Auflagefläche bei der Schweißvariante geringer als bei der Schraubverbindung. Bei entsprechend optimierten Terminaldesign (AP2130) wird, basierend auf den vorhandenen Messergebnissen, ein gleichwertiger bis besserer Übergangswiderstand der Verbindung Terminal zu Verbindungselement mit Schweißtechnologie erwartet.

Prozesssicherheit

Bezüglich Prozesssicherheit birgt die Schraubtechnologie ein erhebliches Risiko. Um eine exakt gleichwertige Verbindung mehrere Verbindungsstellen zu gewährleisten müssen eine abgestimmte Materialpaarung der Basismaterialien und deren Oberflächen, der Schraube, der Mutter sowie des Verbindungselementes gegeben sein. Weiters ist der resultierende Übergangswiderstand abhängig von der Vorgeschichte der Verbindungselemente und den Umgebungsbedingungen (Temperatur, Luftfeuchte, etc.) die bei der Verbindung herrschen. Zusätzlich muss die Verschraubung immer mit dem gleichen Anzugsmoment durchgeführt werden. Da alle diese oben genannten Parameter Toleranzen unterliegen, wird auch die Qualität der Schraubverbindung schwanken. Die Laserschweißtechnologie erzeugt eine stoffschlüssige Verbindung mit einer genau definierten Länge, Breite und Tiefe der Schweißnaht und ist somit prozesssicherer als die Schraubverbindung.

Lebensdauer

Ein Batteriesystem muss im automotiven Einsatz bis zu 10 Jahre funktionstüchtig bleiben. Dabei ist es unterschiedlichen oft sehr extremen Umweltbedingungen ausgesetzt (-40 bis + 65 °C, unterschiedliche Luftfeuchten, Vibration, etc.). Schraubverbindungen unterliegen bei diesen Realbedingungen einer gewissen Korrosion welche sich negativ auf den Übergangswiderstand auswirkt. Die Gewährleistung eines hinreichend niedrigen Übergangswiderstand über die gesamte Lebensdauer (10 Jahre) ist daher kritisch. In Bezug auf die Lebensdauer ist somit die stoffschlüssige Verbindung klar im Vorteil und ist zu bevorzugen.

Kosten

Die Initialkosten sind bei der Laserschweißtechnologie signifikant höher (Laserschweißanlage). Dem gegenüber stehen die höheren Taktzeiten (=Kosten) welche auf manuell durchgeführte Verschraubungen zurückzuführen sind. Der Vergleich der Wirtschaftlichkeit ist somit abhängig von der Stückzahl, insbesondere von der Anzahl der Zellverbindungen.

Symmetrische Stromverteilung bei Parallelschaltung

Bei Batteriesystemen >10 kWh wird es notwendig Batteriezellen parallel zu schalten. In diesem Fall führen unterschiedliche Übergangswiderstände zu einer nicht symmetrischen Belastung der Zellen und damit zu einer beschleunigten Alterung. Durch die signifikant bessere Prozesssicherheit einer stoffschlüssigen Schweißverbindung kann die Symmetrie der Übergangswiderstände wesentlich exakter eingehalten werden.

Fazit

Die Erkenntnisse im Rahmen dieses Arbeitspakets zeigten, dass sich Prototypen und Kleinserien (geringe Stückzahlen) mit einer reinen Serienschaltung von Zellen und einer geforderten Lebensdauer ≤ 5 Jahren mit einem geschraubten Verbindungskonzept darstellen lassen. Jedoch für endkundentaugliche Batteriesysteme (Lebensdauer bis zu 10 Jahren) welche mit hohen Stückzahlen produziert werden ist eine stoffschlüssige Verbindungstechnologie zu bevorzugen.

Diese wichtige Erkenntnis hat Auswirkungen auf das entwickelte 2130 Zelldesign. Die entwickelte Zelle wird im nächsten Schritt Schweißterminals erhalten, welche dann eine stoffschlüssige Verbindung ermöglichen.

5.11 Arbeitspaket 3100 Performance-Steigerung von EV-Batterien durch Parallelschaltung der Zellen/Module

Speziell für Anwendungen für reine Elektrofahrzeuge (EV) sind hohe Energieinhalte von Batteriesystemen notwendig. Der Energieinhalt eines Batteriesystems wird durch die Spannung des Systems und die Kapazität der einzelnen Zellen festgelegt. Durch reine Serienschaltung von derzeit am Markt verfügbaren Zellen sind Energieinhalte bis etwa 15 kWh realisierbar, die für EV Anwendungen nicht ausreichen.

Bei gleichbleibender Systemspannung kann der Energieinhalt eines Batteriesystems nur durch eine Parallelschaltung erhöht werden. Die Kundenvorgaben und –wünsche erfordern modulare Parallelschaltungskonzepte um die Energiespeichersysteme verschiedenen Bauraumsituationen anpassen zu können und gleichzeitig die geforderten Kapazitäten bereitstellen zu können. Die Zell-Hersteller stehen der Parallelschaltung aus sicherheitsrelevanter Sicht ablehnend gegenüber.

Ausgehend von dieser Situation wurden in diesem Arbeitspaket folgende Parallelschaltungskonzepte analysiert und Vor- und Nachteile dargestellt:

- Parallelschaltung von Zellen innerhalb eines Zellstranges
- Parallelschaltung von Zellsträngen innerhalb des Batteriesystems
- Parallelschaltung zweier Batteriesysteme

Parallelschaltung von Zellen innerhalb eines Zellstranges

Eine Kapazitätserhöhung auf Basis der Parallelschaltung von Zellen ist die kostengünstigste Variante aller Parallelschaltungen, da sich die parallelen Zellen funktional wie einzelne große Zelle verhalten und somit keine zusätzlichen Überwachungs- und Steuerkomponenten benötigt werden. Es ergeben sich keine Änderungen bei der SOX Berechnung. Der Vorteil, dass sich mehrere parallele Zellen wie eine Zelle verhalten birgt auch Nachteile. Im Kurzschlussfall besteht die Wahrscheinlichkeit, dass als Sekundärreaktion auch die parallelen Zellen ebenso zerstört werden. Die Detektion von defekten Zellen innerhalb einer Parallelschaltung kann nur indirekt über Messungen anderer Größen realisiert werden und ist ab einer Parallelschaltung von 4 bis 5 Zellen technisch nicht mehr realisierbar.

Ein weiterer Nachteil dieser Variante ist die fehlende Modularisierungsmöglichkeit. Jede Änderung der Kapazität, auch auf Basis derselben Zellen bedeutet erneuten Entwicklungsaufwand für Gehäuse, interne Verkabelung, Zellmontage und Parametrierung.

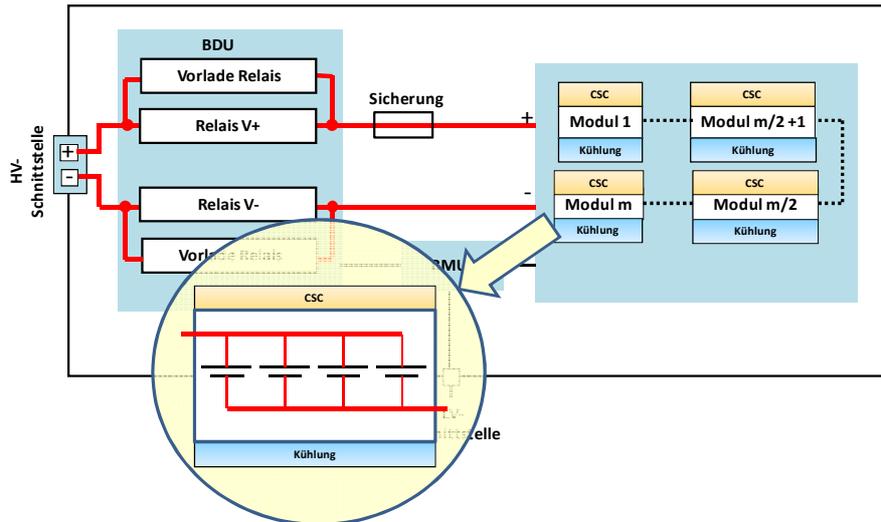


Abbildung 20 Parallelschaltung von Zellen innerhalb eines Zellstrangs

Parallelschaltung von Zellsträngen innerhalb des Batteriesystems

Die Variante mit parallelen Zellsträngen erlaubt gegenüber der Variante von parallel geschalteten Zellen eine Modularisierung der Kapazität auf Basis der Kapazität eines Zellstranges. Somit sind Kapazitätserhöhungen möglich, ohne markante Änderungen an Gehäuse, Verkabelung des Zellstranges und Zellmontage durchzuführen. Nachteil ist ein höherer Hardwareaufwand durch eine erhöhte Anzahl von nötigen CSCs.

Ein Zelldefekt im Kurzschlussfall birgt bei entsprechender Ableitung des Ventgases weniger Risiko zu weiteren Zellzerstörungen als bei Variante von parallel geschalteten Zellen.

Durch die Parallelschaltung wird der Innenwiderstand des Gesamtsystems erniedrigt was zum Anstieg des Kurzschlussstromes bei einem externen Kurzschluss führt. Übersteigt dieser Kurzschlussstrom den Betriebsbereich der Sicherung müssen beide Zellstränge getrennt abgesichert werden.

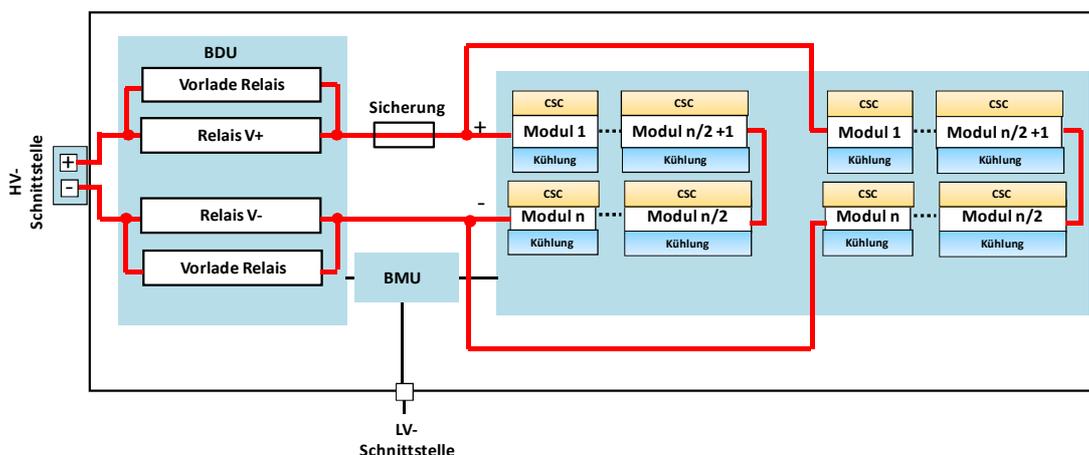


Abbildung 21 Parallelschaltung von Zellsträngen innerhalb eines Batteriesystems mit gemeinsamer Sicherung

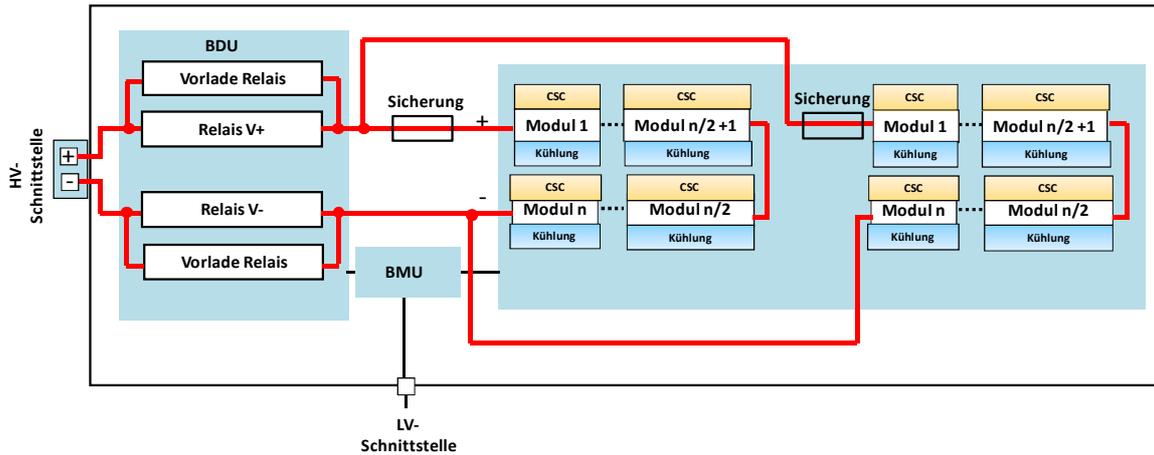


Abbildung 22 Parallelschaltung von Zellsträngen innerhalb eines Batteriesystems mit separater Sicherung

Parallelschaltung von Batteriesystemen

Die Parallelschaltung zweier oder mehrerer Batteriesystemen ist aus technischer Sicht einfach. Abgesehen von den notwendigen Softwareanpassungen sind die wesentlichen Änderungen außerhalb des Batteriesystems. Diese Variante ist eine sehr schnelle Methode zu Kapazitätserhöhung, aber auch eine sehr teure da alle Komponenten wie BDU, Gehäuse doppelt verwendet werden.

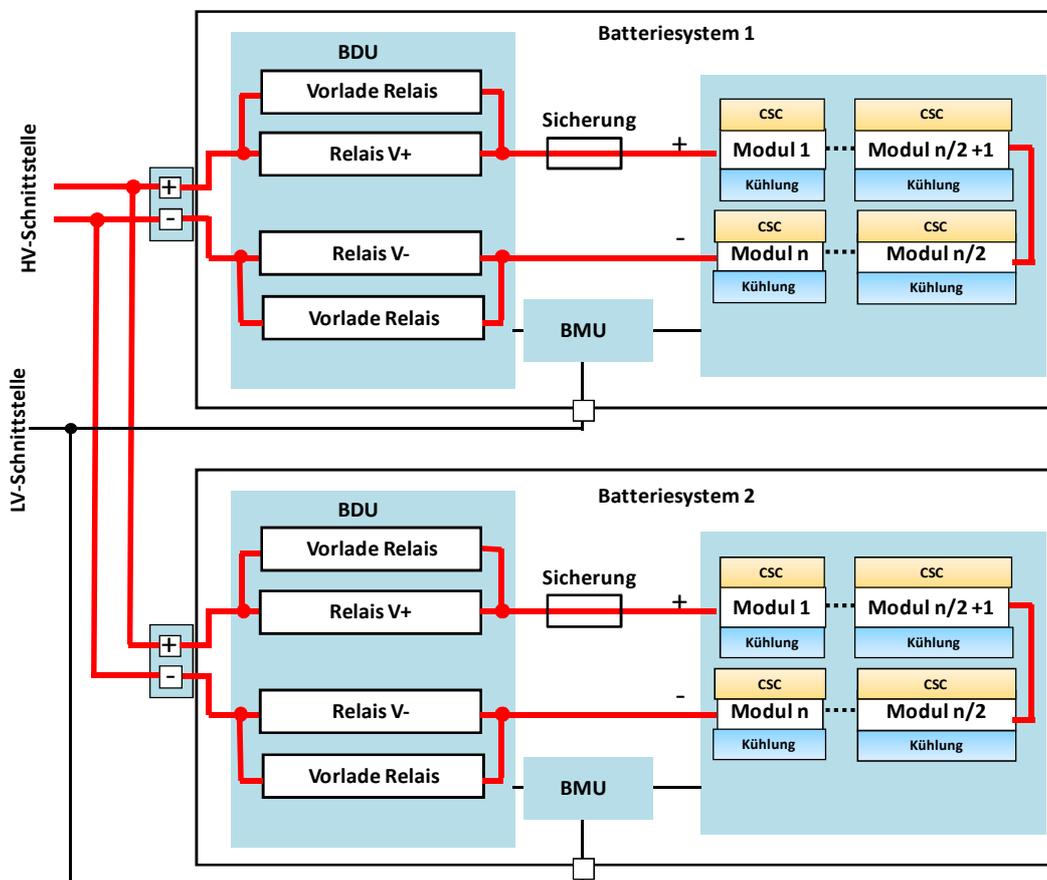


Abbildung 23 Parallelschaltung von Batteriesystemen

5.12 Arbeitspaket 3200 Mechanische Systemkonstruktion auf Basis prismatischer Metal-Can-Zellen

Aufgrund der Entscheidung anstatt Pouch-Zellen die prismatische Metal-Can-Zellen zu präferieren war es notwendig, eine völlig neue Konstruktion einer mechanischen Batteriesystemkonstruktion (Zell-Haltekonzept) zu entwickeln. Das Ziel war dabei die nachfolgend angeführten automotiven Anforderungen zu erfüllen:

- Minimaler Bauraum und Gewicht
- Mechanische Anforderungen (Festigkeit, Vibration, Feuchtigkeit, Ausdehnung, Schock, usw.)
- Thermische Anforderungen (Ausdehnung, Kühlung, Heizung, Alterung)
- Sicherheitsanforderungen (Ausgasung, Verhalten im Crashfall)
- Minimierung der Produkt-Kosten

Basis Modul-Konzept für Elektrofahrzeuganwendungen

In der ersten Projektphase lag der Fokus auf reinen Elektrofahrzeugen. In dieser Phase wurde ein Grundkonzept eines Modulkonzeptes entwickelt welche auf der in AP 2130 entwickelten 50 Ah Zelle basiert. Aufgrund dessen, dass ein CSC die Messung von 12 Zellen erlaubt, wurde als Ziel festgelegt, ein Modulkonzept bestehend aus 12 Zellen zu entwickeln.

Das entwickelte Konzept nutzt die Vorteile der stabilen Metall-Can Technologie. Dabei werden die Zellen selbst als tragende Teile verwendet. Es gibt lediglich Verbindungsglieder zwischen den Zellen, die mehrere Zellen zu einem stabilen Balken verbinden. Dadurch kann eine maximale Gewichtseinsparung bei größtmöglicher Ausnutzung des Bauraums erreicht werden. Eine Erfindungsmeldung bezüglich dieses Konzeptes wurde bereits erstellt.

Erste thermische Berechnungen ergaben, dass für bestimmte Anwendungen, insbesondere für reine Elektrofahrzeuganwendungen, eine Flüssigkeitskühlung nicht notwendig ist und eine Luftkühlung ausreichend sein wird. Dies würde zu einer beträchtlichen Gewichts- und Kostenersparnis führen. Aus diesem Grund soll das Metal-Can Konzept sowohl für Flüssigkeits- als auch für Luftkühlung ausgeführt werden. Das entwickelte Basiskonzept weist noch keine explizite Kühlungseinrichtung auf und eignet sich daher grundsätzlich für eine Luftkühlung. Reicht die Kühlungsfläche des Moduls nicht aus so kann die Integration von zusätzlichen Kühlungseinrichtungen in einem nächsten Schritt separat durchgeführt werden.

Alle bisherigen Batteriesysteme waren flüssigkeitsgekühlt. Daher ist derzeit auch kein Prüfsystem zur Verfügung, welches für eine Validierung einer Luftkühlung geeignet ist. Aus diesem Grund wurde in AP 3500 ein Testsystem zur Validierung eines luftgekühlten Moduls entwickelt und aufgebaut.

Ein Luftkühlungstest wurde durchgeführt und bestätigte die Annahme, dass für große Elektrofahrzeuge eine Luftkühlung ausreichend ist. Weiters wurde bestätigt, dass die Kühlungsfläche des entwickelten Basis Modul-Konzeptes ausreichend ist. Jedoch war es beim Modul-Testsystem notwendig, die Luft kanalisiert am Modul vorbei zu führen. Diese notwendigen Luftkanäle müssen im fertigen Batteriesystem entweder auf Modul-Ebene oder auf Systemebene realisiert werden.

Das Risiko bei diesem Modulkonzept ist die Klebe-Verbindung zwischen Verbindungsglieder und den Zellen. Diese Verbindungen müssen die gesamte Belastung zerstörungsfrei über die gesamte Lebensdauer überstehen. Das Risiko liegt in der geringen Prozesssicherheit einer Klebeverbindung und auf dem nicht bekannten Alterungsverhalten des Klebers.

Weiterführend wurden im AP 3500 auf Basis dieses Konzeptes Modul-Prototypen aufgebaut. Eine erste mechanische Überprüfung wurde im AP 3500 bereits durchgeführt und liefert das Ergebnis, dass die angedachte Konstruktion mechanisch nicht ausreichend stabil ist. Aus diesem Grund muss das Konzept weiter verbessert werden.

Modul-Konzept für PHEV-Fahrzeuge

In der zweiten Projektphase wurde der Projektfokus von Batteriesystemen für reine Elektrofahrzeuganwendungen auf Batteriesysteme für PHEV-Fahrzeuge gelegt. Diese Entscheidung hatte auch Auswirkungen auf das Modulkonzept. Zum einen änderte sich die Dimension und das Gewicht der eingesetzten Zelle (siehe AP 2130) und zum anderen ist für PHEV-Anwendungen eine Flüssigkeitskühlung notwendig da eine Luftkühlung nicht ausreicht. Daher wurde, basierend auf den Erkenntnissen aus der Entwicklung des Basismodules, ein neues Modulkonzept entwickelt, welches nun den Kühlkörper als tragendes Element benutzt.

System-Konzept für PHEV-Fahrzeuge

Basierend auf dem Modulkonzept für PHEV-Anwendungen wurde ein Systemkonzept entwickelt. Ziel war die Entwicklung eines Batteriesystems mit > 8 kWh um die notwendige Reichweite im reinen Elektrobetrieb zu gewährleisten. Dazu war es notwendig 96 Stück 27 Ah Zellen in einer Serienschaltung zu verbinden. Das Systemkonzept besteht daher aus 8 Modulen. Zusätzlich zu den Modulen wurde die gesamte Elektrik (Zellverbinder, Modulverbinder, Stecker, Verkabelung) Elektronik (BMU, CSC, Sensorik, Verkabelung), die Kühlung sowie die Sicherheitseinrichtungen in das Systemkonzept integriert. Die dazu notwendigen Tätigkeiten umfassten sowohl die Konstruktion als auch thermische und mechanische Simulationen.

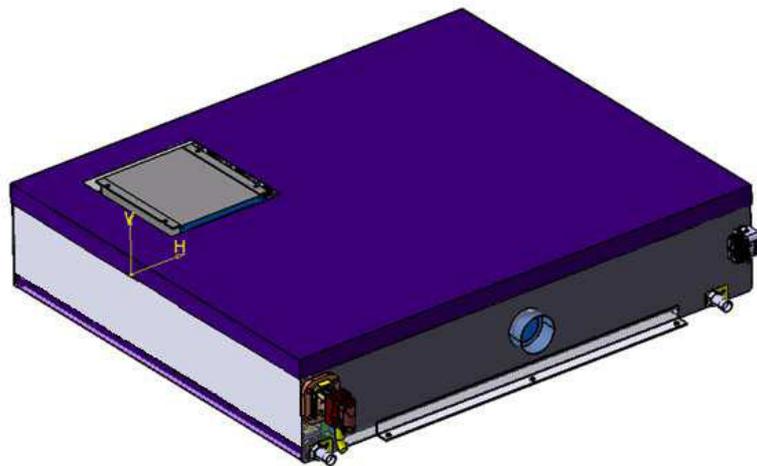


Abbildung 24 System-Konzept für PHEV-Fahrzeuge

Ein wichtiges Kriterium für automotives Batteriesystem ist das Gewicht. Der aufgebaute Prototyp weist Zellgehäuse, Kühlkörper und Systemgehäuse aus Stahl auf. Daher ist bezgl. Gewichtsreduzierung ein erhebliches Potential vorhanden. Im nächsten Schritt wird eine Substitution möglichst vieler Stahlteile durch Aluminiumteile durchgeführt. Dies hat den Vorteil, dass die Teilegeometrien nicht wesentlich geändert werden müssen. Langfristiges Ziel ist jedoch vermehrt Kunststofftechnologien einzusetzen um sowohl Gewichts- als auch Kostenreduzierungen zu erreichen. Aus diesem Grund wurde im Rahmen dieses Projektes ein Kontakt zum Polymer Kompetenzzentrum Leoben (PCCL) aufgebaut und eine umfangreiche Studie bezgl. Kunststoffe in automotiven Batteriesystemen durchgeführt. Das Ergebnis war eine Bewertung der Eignung verschiedenster Kunststoffe für automotives Batteriesysteme insbesondere nach folgenden Kriterien:

- Dichte
- Einsatztemperatur
- Elastizitätsmodul (E-Modul)
- chem. Verträglichkeit
- Kosten
- Erfahrungen im automotiven Umfeld

Weiterführend wurden folgende Themen vertieft:

- Hitze- bzw. Brandbeständigkeit von Kunststoffen
- EMV-Schirmung von Kunststoffen
- Verschraubung von Kunststoffen

Basierend auf diesen Ergebnissen wurde ein Folgeprojekt gemeinsam mit dem PCCL mit Beginn 2012 gestartet.

5.13 Arbeitspaket 3300 Thermalmanagement für EV-Batterien mit prismatischer Zellenbauform

Die Lebensdauer einer Batteriezelle ist stark vom Verlauf der Zelltemperatur während der gesamten Betriebszeit abhängig. Die optimale Lebensdauer kann nur erreicht werden, wenn die Betriebstemperatur der Zelle in einem schmalen Band um die optimale Betriebstemperatur gehalten wird. Dabei ist die aktuelle Zelltemperatur im Wesentlichen abhängig von folgenden Einflussfaktoren:

- Der Fahrzyklus des Fahrzeugs (Verlustleistung der Zelle im Betrieb)
- Ladezyklus (Verlustleistung der Zelle beim Laden)
- Kühlauslegung (Kühlkörper)
- Wärmedämmung des Batteriesystems (Wärmetransport durch das Batteriegehäuse)
- Umgebungsbedingungen (Außentemperatur)

Das Ziel dieses Arbeitspaketes war die Entwicklung eines abgeschlossenen thermischen Simulationsmodells eines Batteriesystems, welches die Möglichkeit bietet, reale Betriebsszenarien unter realen Umgebungsbedingungen zu simulieren. Ein weiteres Ziel war es, mit Hilfe des erstellten thermischen Simulationsmodells, einen Algorithmus zur Steuerung der Heizung/Kühlung eines Batteriesystems für Elektrofahrzeuge zu entwickeln.

Transiente Thermalsimulation mittels elektrisch-thermisch gekoppelte Simulationen

Eine große Herausforderung bei einer thermischen Simulation von Li-Ionen Batteriesystemen ist die Tatsache, dass das elektrische Verhalten einer Li-Ionen Zelle stark temperaturabhängig ist. Zum anderen ist die entstehende Verlustwärme abhängig vom elektrischen Verhalten der Zelle. Das elektrische und das thermische Verhalten sind also gekoppelt. Dieses Verhalten kann durch herkömmliche Simulationsmethoden wie z.B. die CFD Methode nicht abgebildet werden.

Die in diesem Arbeitspaket entwickelte neuartige Simulationsmethode koppelt die numerisch berechneten Ergebnisse eines thermischen und eines elektrischen Modells. Dadurch ist es möglich, den Temperaturverlauf in Abhängigkeit der elektrischen Last und den Umgebungsbedingungen über einen längeren Zeitraum zu simulieren

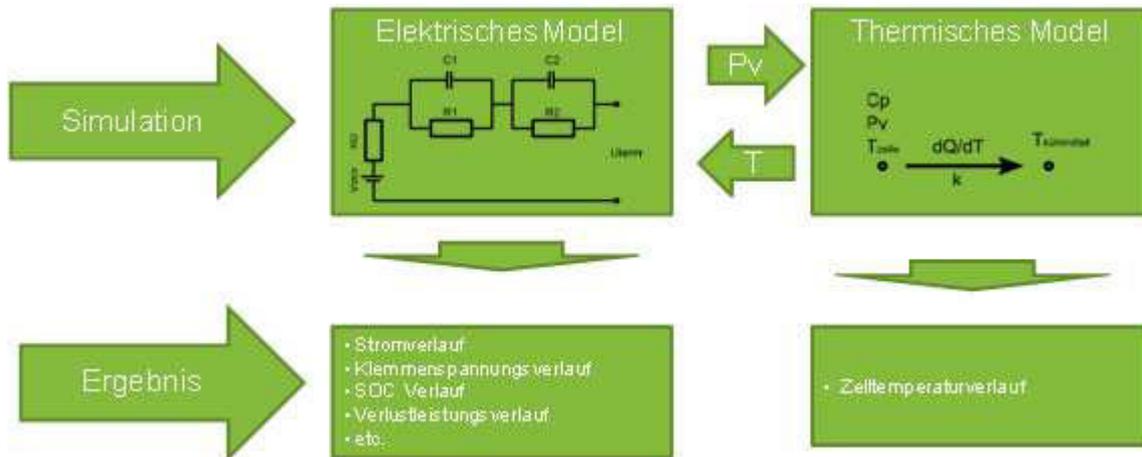


Abbildung 25 Prinzip der elektrisch-thermisch gekoppelte Simulation

Die Simulation deckt folgende Aspekte ab:

- Betriebszeiten des Fahrzeugs (Makro Zyklus)
Zu welcher Zeit wird gefahren, Standzeiten des Fahrzeugs, Pendler, etc.
- Der Fahrzyklus des Fahrzeugs (Mikro Zyklus)
Batterieleistung über die Zeit
- Ladestrategie
- Heizleistung (im Winter sehr relevant)
z.B. für Innenraumheizung oder Frontscheibenenteisung
- Zellcharakteristik
Innenwiderstand abhängig vom SOC und der Temperatur
- Kühlungsstrategie
Kühlsystem wird abhängig von den Temperaturwerten ein oder ausgeschaltet
- Umgebungsdaten
Außentemperaturverlauf mit einer halbstündigen Auflösung
- Das Thermalmodell des Batteriesystems
Wie wird die Wärme von der Zelle zur Umgebungsluft transportiert. Es wird sowohl das Kühlsystem als auch Wärmetransport durch das Batteriegehäuse berücksichtigt.

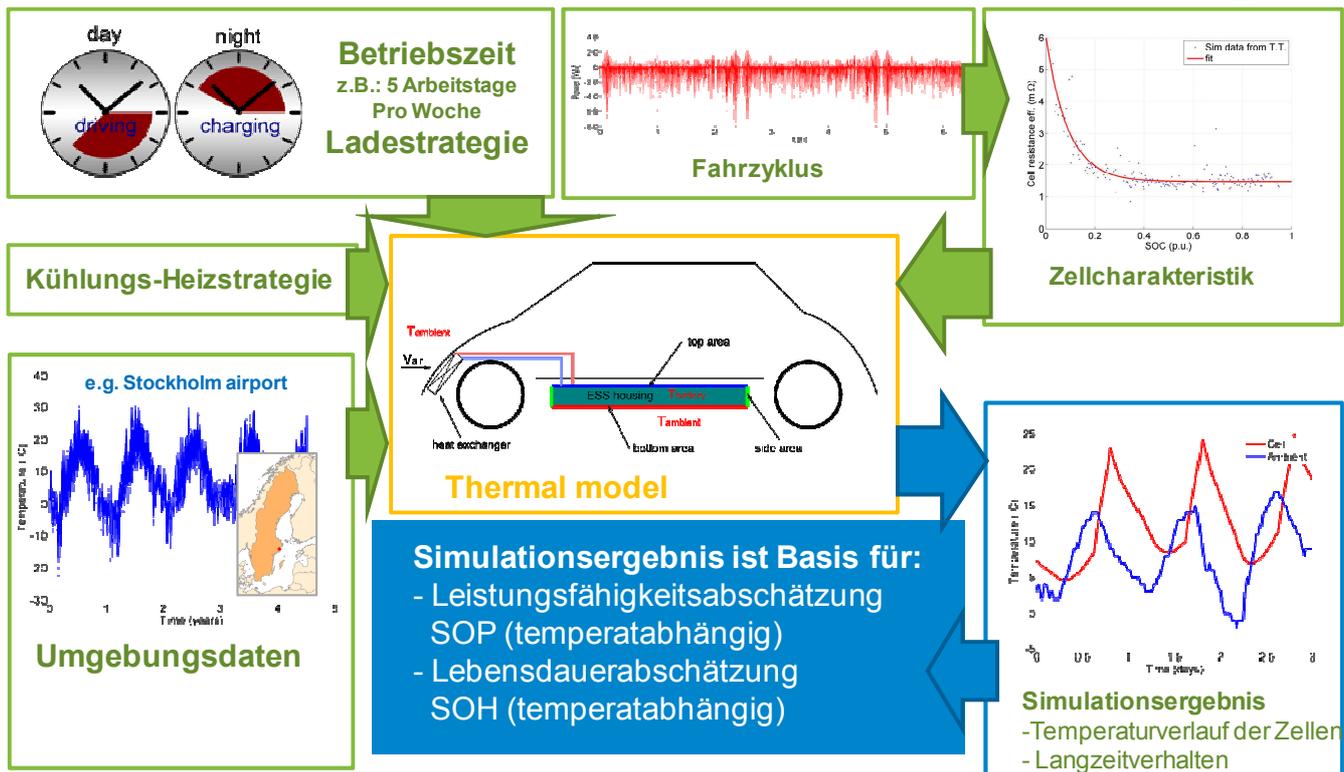


Abbildung 26 Aspekte der elektrisch-thermisch gekoppelte Simulationen

Mit dieser Simulationsmethode ist es somit möglich das Temperaturverhalten der Zellen eines Batteriesystems über einen längeren Zeitraum an einem bestimmten Ort (weltweit) zu simulieren.

Ein Highlight der entwickelten Simulationsumgebung ist die Benutzung tatsächlich gemessener Lufttemperaturdaten mit einer Auflösung von 30 min. Stand der Technik war bisher die Verwendung monatlicher Temperaturstatistiken. Die Simulation rechnet mit einer zeitlichen Auflösung von 150 Sekunden und ermöglichte eine Simulationsdauer bis zu 10 Jahren.

Basierend auf den Simulationsergebnissen kann eine Lebensdauerabschätzung für das gesamte Batteriesystem durchgeführt werden. Weiters wird eine Abschätzung der Leistungsfähigkeit für bestimmte Situationen ermöglicht (bei tiefen Temperaturen sinkt die Leistungsfähigkeit des Batteriesystems).

Entwicklung eines Algorithmus zur Steuerung der Heizung/Kühlung

Die Leistungsfähigkeit eines Batteriesystems ist stark von der Zelltemperatur abhängig. Bei tiefen Temperaturen sinkt sowohl die erlaubte Lade- als auch die Entladeleistung. Daher ist es notwendig, die Zelltemperatur während des Betriebes möglichst nahe an der Idealtemperatur von ca. 35 °C zu halten. Besonders bei reinen Elektrofahrzeugen ist eine Kühlung des Batteriesystems nicht ausreichend. Für Länder in denen klimatisch bedingt über längeren Zeitraum Temperaturen unter 10 °C herrschen, ist zusätzlich eine Heizung des Batteriesystems notwendig. Da während des Betriebs die Heizungsenergie aus der Batterie entnommen wird, wird die Reichweite des Elektrofahrzeuges dadurch verringert.

Daher wurden folgende Heizungsstrategien gewählt:

Unter der Annahme, dass die Abfahrtszeit des Fahrzeugs bekannt ist, wird ab einem in Echtzeit berechneten Zeitpunkt die Batterieheizung eingeschaltet. So wird gewährleistet, dass zu Fahrtbeginn eine Minimaltemperatur nicht unterschritten wird. Die Vorheizung hat den Vorteil, dass Heizenergie nicht aus der Batterie entnommen werden muss.

Neben der Heizstrategie wurden auch eine Reihe an Kühlstrategien und Varianten der Kühlerhardware eines Batteriesystems untersucht. Die betrachteten Kühlstrategien unterscheiden sich in den Temperaturschwellen für verschiedene Fahrzeugzustände (Fahrt, Laden, Ausgeschaltet) ab denen die Kühlung aktiv wird. Die untersuchte Hardware umfasst Varianten mit und ohne Temperaturaußensensor, Zellhalter/Kühler aus Kunststoff und Aluminium, Batterieladegerät im und außerhalb des Batteriekühlkreislaufes sowie eine Version des Batteriesystems ohne Kühlkreislauf.

Folgendes Bild zeigt ein Beispiel für eine Kühlungsstrategie:

- Fahrbetrieb
 - Kühlung ein wenn wärmste Zelle 25°C übersteigt
 - Kühlung aus wenn kälteste Zelle 10 °C unterschreitet
- Ladebetrieb
 - Kühlung ein wenn wärmste Zelle 10 °C übersteigt
 - Kühlung aus wenn kälteste Zelle 10 °C unterschreitet

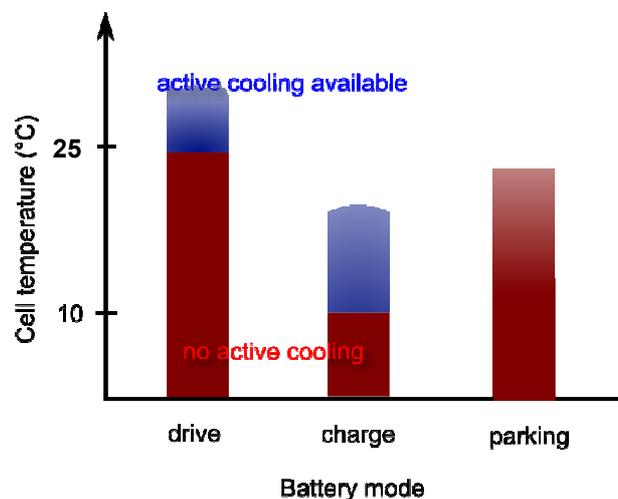


Abbildung 27: Kühlungsstrategie

5.14 Arbeitspaket 3400 Systemarchitektur für verschiedene Ladestrategien

Um das übergeordnete Ziel Elektromobilität realisierbar zu machen, sind fahrzeugseitig Ladekonzepte bereitzustellen. Aus der Vielzahl von Ladekonzepten scheinen sich jene zu etablieren, die eine Schnellladung an Tankstellen ermöglichen. Daraus abgeleitet ergeben sich hohe Ströme, die in netzseitigen stationären Ladestationen geregelt werden. Weiters werden bidirektionale Energieflüsse ermöglicht. Durch Rückladung in das Stromnetz mutiert die Fahrzeug-Batterie zu einem virtuellen Energiespeicher, der wiederum als Pufferspeicher für das Stromversorgungssystem fungieren kann. Die Aufgabe in diesem Arbeitspaket war die Überarbeitung der Systemarchitektur in Hinblick auf die elektrische Sicherheit, sowie die Kommunikation bzw. elektrische Anbindung (Hochvolt-Schnittstelle) vom Fahrzeug zur Ladeeinheit einer stationären Infrastruktur. Das Paket stellt somit die Basis für weiterführende zukünftige Entwicklungen in Richtung Elektromobilität dar.

Folgende Tätigkeiten wurden in diesem Arbeitspaket durch

- 1) Recherche bestehender Normen und Standards
- 2) Analyse On-Board und externe DC Ladegeräte
- 3) Analyse und Bewertung verschiedener Ladekonzepte

Recherche bestehender Normen und Standards

Im Laufe der Analysephase wurde deutlich, dass Ladekonzepte insbesondere das Interface zum externen Ladegerät derzeit nicht ausreichend detailliert beschrieben ist. Sämtliche Gremien, die sich mit diesem Thema beschäftigen, sind aktuell in einer „Findungsphase“. Von einer baldigen internationalen Harmonisierung dieser Schnittstelle kann nicht gesprochen werden. Es fehlt vor allem die Spezifikation des seriellen Datenaustausches zwischen Fahrzeug und externem Ladegerät.

Analyse On-Board und externe DC Ladegeräte

Grundsätzlich wird bei elektrifizierten Fahrzeugen zwischen On-Board und externen DC Ladegeräten unterschieden.

- On-Board Ladegeräte

Ein Ladegerät dieser Art kann hinsichtlich seines Funktionsumfanges sehr unterschiedlich ausgeprägt sein. Gemeinsam ist jedoch allen eine CAN Kommunikationsschnittstelle, über die sie gesteuert und überwacht werden sowie (meistens) eine Strom- Spannungssollwertvorgabe entgegen nehmen können. Weiteres ist die typische Ladeleistung, bedingt durch den Anschluss an das Haushalts-Wechselstromnetz („Hausanschluss“), mit 3,3kW gegeben (Anmerkung: bei entsprechender Stromversorgung z.B. Dreiphasen-Netz, abgesichert mit 16A/32A, sind auch höhere Leistungen möglich).

Höhere Ausbaustufen des On-Board Ladegerätes sollen in Zukunft auch einen eigenen AC/DC oder DC/DC integrieren, sodass während den Ladephasen und/oder im Fahrbetrieb das LV-Bordnetz des Fahrzeuges gestützt werden kann. Die Schnittstelle vom Fahrzeug zum Hausanschluss liegt im

Verantwortungsbereich des Ladegerätes und/oder des Fahrzeuges selbst. In Abhängigkeit des Ladegerätes müsste vom Batteriesystem im Wesentlichen nur eine entsprechende Kommunikation umgesetzt werden.

Bei Elektro- und Plug-In Hybridfahrzeugen sind On-Board Ladegeräte weit verbreitet. Durch ihre geringe Ladeleistung muss bei einem Elektrofahrzeug, welches angenommen 10 Jahre betrieben wird, mit einer typischen Ladedauer von rund 20.000 bis 30.000h in Summe gerechnet werden. Dies entspricht in etwa zwei Drittel der gesamten Betriebsdauer. Um HV-Komponenten nicht auf diese gesamte Betriebsdauer, auch wenn die Ladephase nur eine passive Belastung bedeutet, auslegen zu müssen, ist fahrzeugseitig eine eigene Schnittstelle am Batteriesystem zum On-Board Ladegerät erwünscht.

- Externes DC Ladegeräte

Die Norm EN 61851-1 „Konduktive Ladesysteme für Elektrofahrzeuge“ beschreibt drei Arten von Ladegeräten.

- Externes Ladegerät: Ladegerät, das an die Hausverkabelung des Wechselstromnetzes angeschlossen und dafür ausgelegt ist, vollständig außerhalb des Fahrzeuges betrieben zu werden. In diesem Fall wird die Elektroenergie als Gleichstrom zum Fahrzeug geliefert.
- Typgebundenes externes Ladegerät: Externes Ladegerät, das zur Nutzung für einen speziellen Elektrofahrzeug Typ ausgelegt ist und Ladekontroll- oder Meldefunktion besitzen kann
- Bordladegerät: Auf dem Fahrzeug montiertes Ladegerät, das nur für den Betrieb an Bord des Fahrzeuges ausgelegt ist

Desweiteren definiert die Norm EN 61851-1 vier Ladebetriebsarten für Elektrofahrzeuge:

- Ladebetriebsart 1: Anschluss des Elektrofahrzeuges an das ein- oder dreiphasige Wechselstromnetz unter Verwendung genormter Steckdosen für einen Bemessungsstrom bis zu 16A auf der Netzseite und Verwendung von Phasen-, Neutral- und Schutzleiter. Die Anwendung der Ladebetriebsart 1 hängt von Vorhandensein eines FI-Schalters auf Netzseite ab.
- Ladebetriebsart 2: Anschluss des Elektrofahrzeuges an das ein- oder dreiphasige Wechselstromnetz unter Verwendung genormter Steckdosen und Verwendung von Phasen-, Neutral- und Schutzleiter gemeinsam mit einem Steuerungs-Hilfsleiter (Pilotleiter) zwischen dem Elektrofahrzeug und dem Stecker oder Steuergerät im Kabel.
- Ladebetriebsart 3: Direkter Anschluss des Elektrofahrzeuges an das Wechselstromnetz unter Verwendung einer typgebundenen Stromversorgungseinrichtung für das Elektrofahrzeug (EFSV), bei der ein Steuerungs-Hilfsleiter (Pilotleiter) bis zur ständig mit dem Wechselstromnetz verbundenen Einrichtung mitgeführt wird.
- Ladebetriebsart 4: Indirekter Anschluss des Elektrofahrzeuges an das Wechselstromnetz unter Nutzung eines externen Ladegerätes, bei der ein Steuerungs-Hilfsleiter (Pilotleiter) bis zur ständig mit dem Wechselstromnetz verbundenen Einrichtung mitgeführt wird.

Auch die Anschlussarten sind in der Norm EN 61851-1 definiert:

- Anschluss-Fall „A“: Anschluss eines Elektrofahrzeuges an das Wechselstromnetz unter Verwendung eines Stromversorgungskabels und eines Steckers, die dauerhaft am Elektrofahrzeug angebracht sind.

- Anschluss-Fall „B“: Anschluss eines Elektrofahrzeuges an das Wechselstromnetz unter Verwendung einer lösbaren Kabelgarnitur mit Leitungsverbindern am Fahrzeug und an der Wechselstromversorgungseinrichtung.
- Anschluss-Fall „C“: Anschluss eines Elektrofahrzeuges an das Wechselstromnetz unter Verwendung eines Stromversorgungskabels und eines Fahrzeug-Leitungsverbinders, die dauerhaft an der Stromversorgungseinrichtung angeschlossen sind. Für die Ladebetriebsart 4 ist nur der Fall „C“ erlaubt.

Innerhalb dieses Projektes wird das externe DC Ladegerät nach EN 61851-1 als externes Ladegerät der Betriebsart 4 definiert. Anmerkung: Das On-Board Ladegerät fällt unter die Kategorie Betriebsart 1. Somit handelt es sich beim externen DC Ladegerät um ein externes Ladegerät („Stromtankstelle“), welches mit Ladeleistungen von rund 25-30kW das Schnellladen eines Elektrofahrzeuges ermöglichen soll. In Zukunft sind Ladeleistungen mit bis zu 50kW geplant. Der neben der Leistung bedeutendste Unterschied zu einem On-Board Ladegerät ist die direkte Verbindung einer fahrzeugexternen Hochspannungs-Energiequelle mit dem fahrzeuginternen HV-Netz respektive Batteriesystem. Das effektive und vor allem sichere Aufladen eines Elektrofahrzeuges über diese Ladeschnittstelle erfordert zusätzliche Maßnahmen und Funktionalitäten. Für die Ladebetriebsart 4 müssen folgende Funktionen zusätzlich aufgenommen werden:

- Überprüfung, dass das Fahrzeug vorschriftsmäßig angeschlossen ist
- Ständige Überwachung des Schutzleiterdurchgangs
- Einschalten des Systems
- Ausschalten des Systems
- Auswahl des Ladestromes

Ein serieller Daten-Informationsaustausch ist zwingend vorgeschrieben, um dem Fahrzeug die Steuerung des externen Ladegerätes zu gestatten.

Analyse und Bewertung verschiedener Ladekonzepte

- Architektur geringer Komplexität

Diese aktuelle eingesetzte Architektur zeichnet sich durch ihre geringe Komplexität aus, da sie mit einer Hochvolt (HV)- und einer Niedervolt (LV)-Schnittstelle ihr Auslangen findet. Sie ist abgeleitet von der Nutzfahrzeug-Hybrid Systemarchitektur. Die HV-Schnittstelle (= Leistungsschnittstelle) ist direkt an das fahrzeugseitige HV-Netz angekoppelt. Mit Hilfe der LV-Schnittstelle wird einerseits das Batteriesystem gesteuert, z.B. Zuschalten des Systems zum HV-Netz, und andererseits vom Batteriesystem ausgehende Regelgrößen an übergeordnete Steuergeräte im Fahrzeug übergeben. Diese Regelgrößen, wie z.B. der Ladezustand, dienen den übergeordneten Steuergeräten zum Betrieb des Batteriesystems innerhalb seiner Spezifikation.

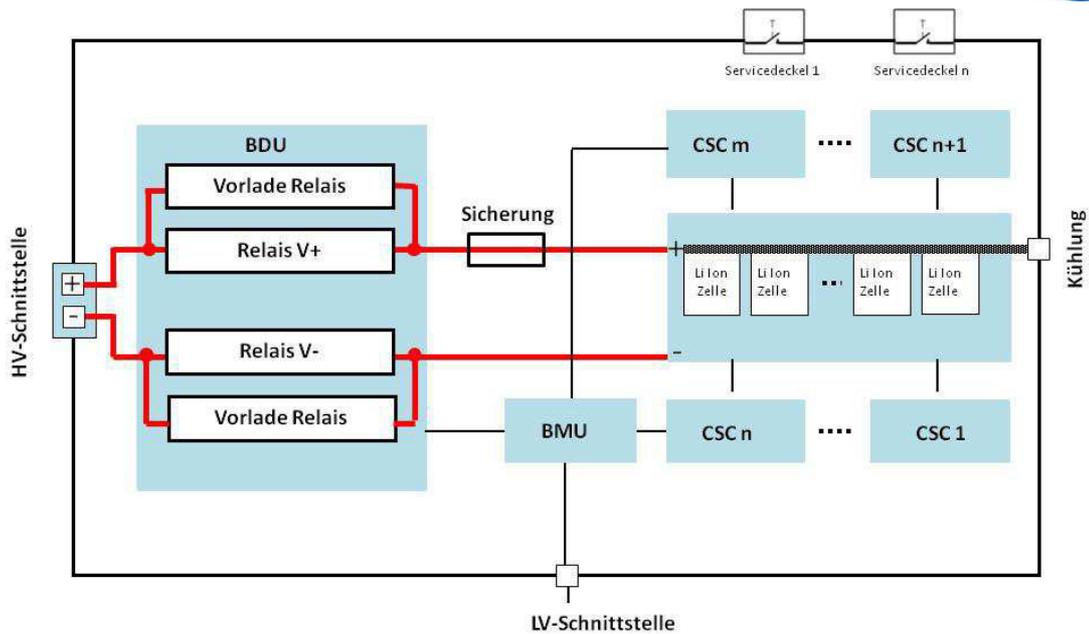


Abbildung 28 Architektur geringer Komplexität

Für das Batteriesystem ergibt sich kein Unterschied, ob es nun in einer Rekuperationsphase, von einer eventuell vorhandenen Verbrennungskraftmaschine oder von einem Ladegerät geladen wird. Aus Fahrzeugsicht (Gesamtsystemsicht) ergeben sich jedoch zwei potentielle Nachteile. Einer liegt in der Kommunikation mit dem Batteriesystem, da das Ladegerät das gesamte Kommunikationsprotokoll des Batteriemanager-Steuergerätes (Battery Management Unit BMU) ebenso umsetzen muss oder das Fahrzeugsteuergerät zusätzlich mit dem Ladegerät kommunizieren muss. Von der Kommunikation abgeleitet bedeutet dies eine Partitionierung von Funktionalität auf Steuergeräte, die im Wesentlichen Teil der BMU sein könnte. Der zweite Nachteil liegt darin, dass das Batteriesystem unabhängig vom Verwendungszweck (Fahrbetrieb, Laden, etc.) immer auf das allen HV-Komponenten gemeinsame HV-Netz geschaltet werden muss. Dadurch steht das HV-Netz bei zugeschaltetem Batteriesystem mit all seinen Komponenten (Inverter, DC/DC, Ladegerät, etc.) unter Spannung. Aus aktuellen Projekten ist bekannt, dass hinsichtlich Lebensdauer einiger HV-Komponenten ein Konflikt entsteht.

Zusammengefasst eignet sich die bislang diskutierte Systemarchitektur besonders für Hybridfahrzeuge. In dieser Applikation werden keine Anforderungen an dezidierte Ladefunktionalitäten gestellt. Bereits bei Plug-In Hybridfahrzeugen wirkt sich die Architektur durch zusätzliche Betriebsstunden in den Ladephasen auf die Lebensdauer von HV-Komponenten nachteilig aus.

- **Architektur geringer Komplexität mit Lade-Relais**

Um den Nachteilen der zuvor beschriebenen Architektur mit geringer Komplexität in einem ersten Ansatz entgegen zu wirken, wird die Systemarchitektur nur minimal erweitert. Diese adaptierte Architektur integriert zusätzlich ein Lade-Relais am negativen Batteriepol und eine CAN Kommunikationsschnittstelle zu einem On-Board Ladegerät. Auf Grund der geringen Ladeleistung eines On-Board Ladegerätes kann das Lade-Relais kleiner und somit auch kostengünstiger als die Haupt-Relais dimensioniert werden. Der positive Batteriepol wird gemeinsam genutzt, um auch die

Vorladeschaltung gemeinsam nutzen zu können. Auch die Funktionalität des Batteriesystems wird um einen dezidierten Zustand „Laden“ erweitert.

Auf diese Art können die beiden vorhin genannten Nachteile

- das Fahrzeugsteuergerät muss zusätzlich mit dem Ladegerät kommunizieren
- die Batterie muss beim Laden immer auf das allen HV-Komponenten gemeinsame HV-Netz geschaltet werden.

aus Sicht des Fahrzeuges respektive aus Gesamtsystemsicht deutlich reduziert werden.

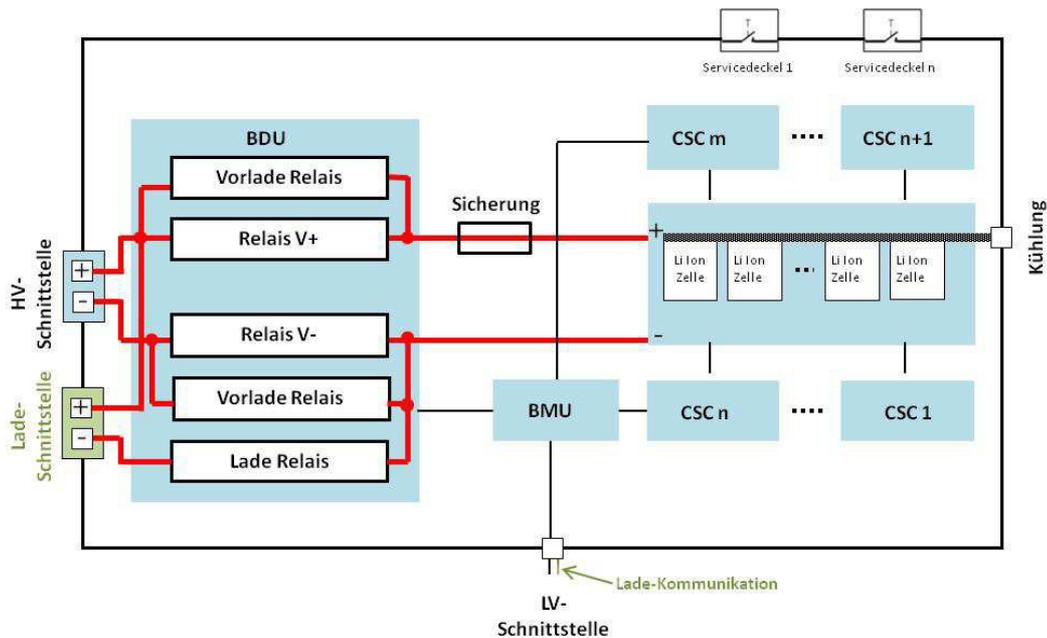


Abbildung 29 Architektur geringer Komplexität mit Lade-Relais

Eine Schnittstelle zu einem externen DC Ladegerät ist jedoch nicht enthalten. Daher bleibt der Einsatz dieser Architektur PHEV-Fahrzeugen bzw. Elektrofahrzeugen mit On-Board Ladegeräten vorbehalten.

Auch eine unabhängige Steuerung des Ladevorganges seitens BMU ist nicht vorgesehen. Das bedeutet, das Fahrzeugsteuergerät muss den Ladewunsch des Fahrers erkennen, BMU und On Board Ladegerät geeignet aktivieren, den Ladevorgang einleiten und schließlich auch beenden. Somit bleibt das Fahrzeugsteuergerät für den Ladevorgang als oberste Instanz bestehen und hat zusätzliche Monitoring Aufgaben wahrzunehmen.

- Universelle Architektur

In der nachfolgenden Architektur wurde die gemeinsame Menge aller Anforderungen, unabhängig von der Applikation des Batteriesystems, abgebildet. Sie stellt somit eine universelle Architektur, unabhängig von der Ladeart dar.

Im Vergleich zur Architektur geringer Komplexität wird zusätzlich benötigt:

- Je eine HV-Schnittstelle zum On Board und zum externen DC Ladegerät
- Ein eigener CAN Kommunikationsbus für die Ladegeräte
- 2 Hauptrelais für das externen DC Ladegerät
- 1 Laderelais für das On Board Ladegerät
- Eine weitere Spannungsmessung, um auch den externen HV-Kreis vorladen zu können
- Implementierung der erforderlichen HW-Signale für die externe DC Ladeschnittstelle nach EN 61851-1
- Ansteuerung einer RGB-LED, um dem Fahrer den Zustand des Ladevorgangs über das externe DC Ladegerät zu signalisieren.

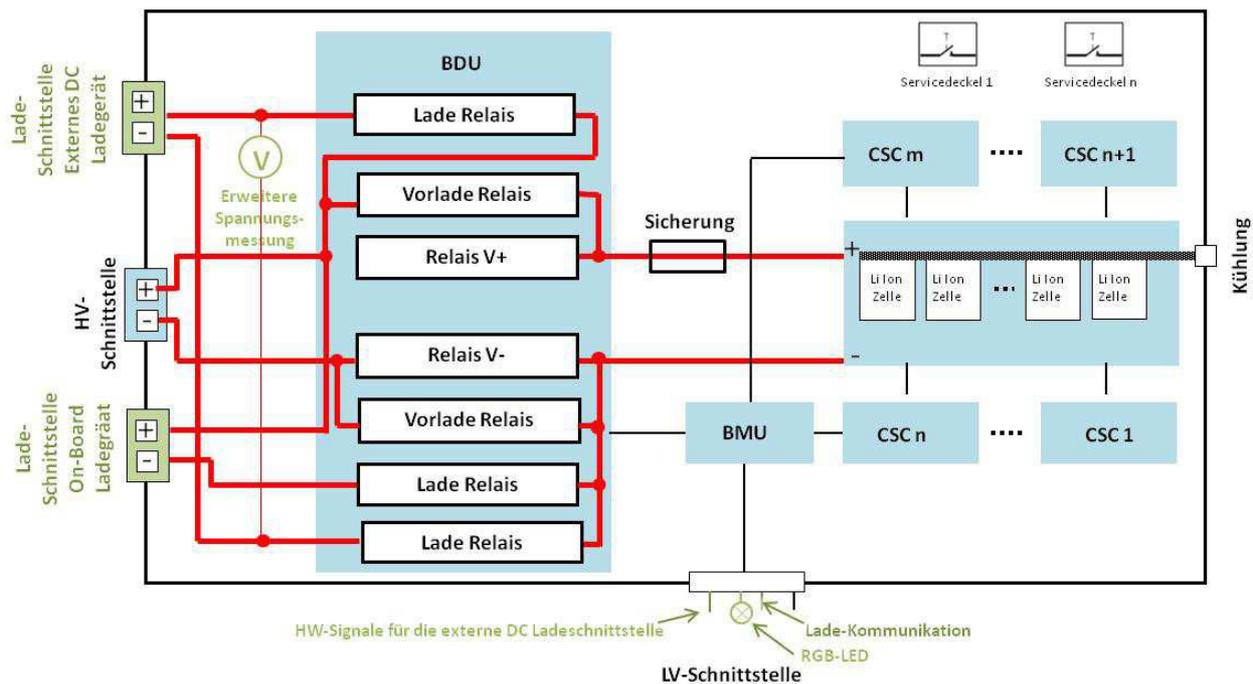


Abbildung 30 Universelle Architektur

Diese Ladearchitektur stellt mit den zusätzlichen Komponenten auch die kostenintensivste Architektur dar. Daher ist die Empfehlung, diese Architektur entsprechend den jeweiligen Kundenwünschen zu adaptieren.

Bewertung der Sicherheit

Nach einer Basisanalyse der Sicherheit kann folgendes festgehalten werden. Die zusätzlichen Hardwarekomponenten (Relais, zusätzliche Spannungsmessung) müssen in die Bewertung des Sicherheitskonzeptes aufgenommen werden. Ansonsten bleibt das Sicherheitssystem des Batteriesystems gleich.

Um das Gefährdungspotential der zusätzlichen Element exakt bestimmen zu können, ist es notwendig, die genauen Sicherheitsfunktionen seitens Lader bzw. Fahrzeug beurteilen zu können. Aufgrund der fehlenden normativen Vorgaben ist dies derzeit nicht möglich. Daher kann ein detailliertes Sicherheitskonzept derzeit nicht spezifizieren werden. Die geplante Durchführung einer FMEA wird daher zum gegebenen Zeitpunkt als nicht sinnvoll angesehen und wurde als Ziel in diesem Arbeitspaket nicht weiter verfolgt.

5.15 Arbeitspaket 3500 Aufbau, Inbetriebnahme und Testing von EV-Batterien

Dieses Arbeitspaket war im Wesentlichen in drei Teilbereiche untergliedert:

- 1) Aufbau von Modulprototypen sowie der Aufbau eines Batterieprototypen
- 2) Entwicklung und Aufbau von Testsystemen
- 3) Tests auf Zell-, Modul- und Systemebene (unterstützend zu den AP 2000 bis AP 3000)

Aufbau von Modulprototypen

- Realisierung des in AP 3200 entwickelten Modul-Konzeptes für Elektrofahrzeuganwendungen bestehend aus 12 Stück 50 Ah Zellen. Dieser Modulprototyp wurde die elektrische und thermische charakterisiert.
- Realisierung des in AP 3200 entwickelten Modul-Konzeptes für PHEV-Fahrzeuganwendungen bestehend aus 12 Stück 27 Ah Zellen. Dieser Modulprototyp wurde die elektrische und thermische charakterisiert.
- Realisierung des in AP 2140 entwickelten Modulprototypen mit prismatische Pouch-Folien Zelle für einen Vibrationstest (AP 2140)
- Realisierung eines Zellverbundes von 12 Zellen für die Erprobung der geschraubten Zell-Verbindung
- Realisierung eines Zellverbundes von 12 Zellen für die Erprobung der stoffschlüssigen Zell-Verbindung

Aufbau eines PHEV-Systemprototyps

Realisierung des in AP 3200 entwickelten System-Konzeptes für PHEV-Fahrzeuganwendungen bestehend aus 8 Modulen.



Abbildung 31 System-Prototyp für PHEV-Fahrzeuganwendungen

Entwicklung und Aufbau von Testsystemen

- Testsystem zur Charakterisierung eines luftgekühlten Moduls

Die ersten Zellcharakterisierungen brachten die Erkenntnis, dass bei Batteriesystemen für Energieanwendungen eine Luftkühlung ausreichend sein kann. Bislang wurde das Konzept der Luftkühlung bei Magna E-Car Systems nur am Rande verfolgt, da Aspekte der Fahrzeugintegration (Sicherheit) dagegen sprachen. Für weiterführende Untersuchungen war es also notwendig, einen Luftkühlungsprüfstand zu entwickeln. Die Herausforderung dabei ist, dass die Kühlleistung sehr stark von Luftfeuchtigkeit, Lufttemperatur, Luftdruck und Durchflussgeschwindigkeit ist. Dadurch wird das Messverfahren wesentlich komplexer als bei einer Flüssigkeitskühlung. Die Messung der Einflussparameter in einer ausreichenden Genauigkeit und Schnelligkeit muss dabei gewährleistet sein um mit einer nachstehenden Berechnung die exakte Kühlleistung bestimmen zu können. Die Entwicklung des Prüfverfahrens wurde in diesem Arbeitspaket abgeschlossen. Ein Luftkühlungstest mit dem im AP 3200 entwickelten Basis-Modul wurde durchgeführt. Das folgende Bild zeigt das Testsystem zur Charakterisierung eines luftgekühlten Moduls.

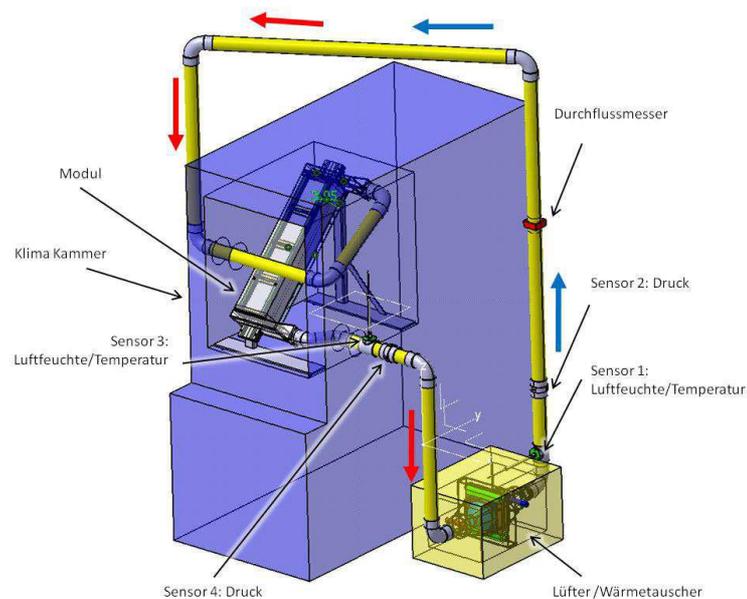


Abbildung 32 Testsystem zur Charakterisierung eines luftgekühlten Moduls

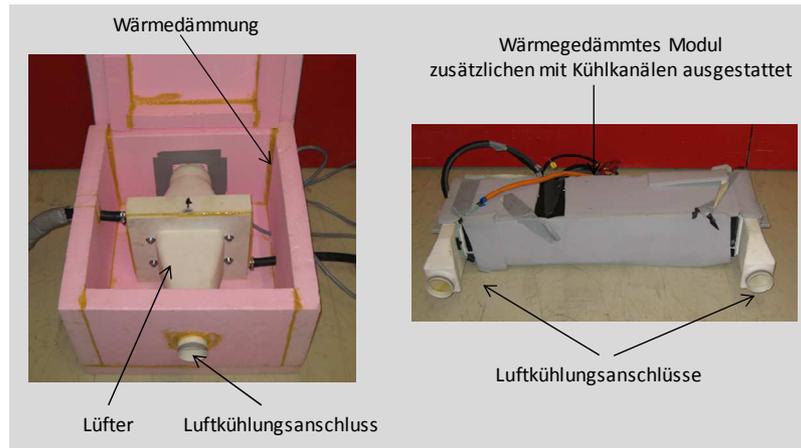


Abbildung 33 links: Lüfter/Wärmetauscher, rechts: luftgekühltes Modul

- Testsystem zur Charakterisierung des Ausgasungsverhalten von Li-Ionen Zellen mit quaderförmigen Druckbehälter.
Unterstützend zu AP 2140 wurde ein Testsystem zur Charakterisierung des Ausgasverhaltens einer Zelle unter realen Betriebsbedingungen (Zelle in einem geschlossenen Raum verbaut) entwickelt und aufgebaut. Der Druckbehälter wurde quaderförmig ausgelegt.



Abbildung 34 Testsystem mit quaderförmigen Druckbehälter

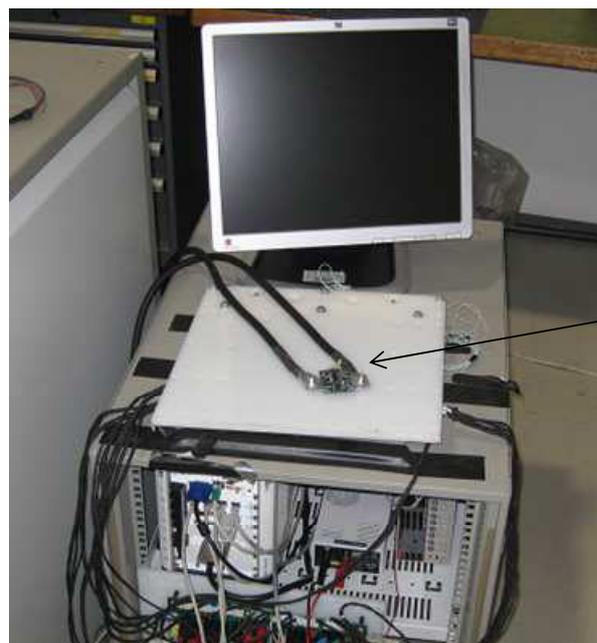
- Testsystem zur Charakterisierung des Ausgasungsverhalten von Li-Ionen Zellen mit zylindrischen Druckbehälter.
Unterstützend zu AP 2140 wurde ein Testsystem zur Charakterisierung des Ausgasverhaltens einer Zelle unter realen Betriebsbedingungen (Zelle in einem geschlossenen Raum verbaut) entwickelt und aufgebaut. Der Druckbehälter wurde zylindrisch ausgelegt.



Abbildung 35 Testsystem mit zylindrischem Druckbehälter

- **Testsystem zur Charakterisierung des Stromsensors**

Zur Validierung des im AP 2230 entwickelten Stromsensors wurde ein Testsystem aufgebaut. Der Fokus lag hierbei auf einer hohen Strom-Messgenauigkeit.



Stromsensor

Abbildung 36 Testsystem für Stromsensor

- **Testsystemen zur Charakterisierung einer Ausgasung durch einen internen Kurzschluss**

Zur Charakterisierung einer Ausgasung ausgelöst durch einen internen Kurzschluss, wurde ein Testsystem entwickelt, welches eine kontrollierte Penetration einer Zelle durch einen Bohrer oder durch eine Nadel erlaubt.

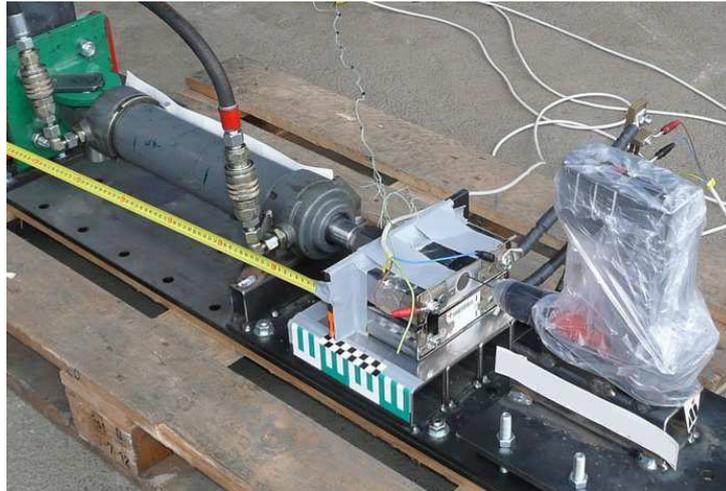


Abbildung 37 Testsystem für Stromsensor

Tests auf Zellebene

- Elektrische und thermische Zellcharakterisierung der in AP 2130 entwickelten 50 Ah Zelle (siehe AP 2110)
- Elektrische und thermische Zellcharakterisierung der in AP 2130 entwickelten 27 Ah Zelle (siehe AP 2110)
- Überladetests an der in AP 2130 entwickelten 27 Ah Zelle (siehe AP 2140)
- Überladetests an der in AP 2130 entwickelten 50 Ah Zelle (siehe AP 2140)
- Überladetest an einer Pouch-Zelle (siehe AP 2140)
- Provozierung von internen Zellkurzschlüssen der in AP 2130 entwickelten 50 Ah Zelle (siehe AP 2140)
- Kurzschlussstest an der in AP 2130 entwickelten 27 Ah Zelle (siehe AP 2120)
- Kurzschlussstest an der in AP 2130 entwickelten 50 Ah Zelle (siehe AP 2120)
- Lebensdauertest einer Lithium-Titanat Zelle (siehe AP 4200)
- Überhitzung der in AP 2130 entwickelten 27 Ah Zelle (Overheat Test - siehe AP 2140)

Tests auf Modulebene

- Vibrationstests des Pouch-Zellen Modul-Prototyp (siehe AP 2140).
- Vibrationstests des Modul-Prototyp für Elektrofahrzeuganwendungen (siehe AP 3200)
- Elektrische und thermische Charakterisierung des Modul-Prototyp für Elektrofahrzeuganwendungen – Luftkühlungstest (siehe AP 3200)
- Elektrische und thermische Charakterisierung des Modul-Prototyp für PHEV-Anwendungen (siehe AP 3200)

Tests auf Systemebene

Elektrische und thermische Charakterisierung des aufgebauten System-Prototyps für PHEV-Fahrzeuganwendungen (siehe AP 3200).

5.16 Arbeitspaket 4100 Optimierte Anforderungen an Lastzyklen für NFZ-Leistungsbatteriesysteme

Derzeit gibt es weder bei Batterieherstellern, noch bei Automobilherstellern ausreichende Felderfahrung bezüglich Anforderungen an Lastzyklen für NFZ-Batteriesysteme. Die Folge daraus sind am Papier definierte Lastzyklen, die möglicherweise nicht den wirklichen Anforderungen im Feld entsprechen. Um dem Risiko einer Unterdimensionierung zu entgehen, ist jeder Automobilhersteller bestrebt, generell die Anforderungen so festzulegen, dass überdimensionierte Systeme entstehen. Ein weiterer Aspekt ist jener, dass auch bei ähnlichen Anforderungen (z.B. Temperatur, Anzahl Zyklen) verschiedener Automobilhersteller de facto komplett verschiedene Lastzyklen resultieren, die untereinander schwer vergleichbar sind und damit die Qualität der validierten Systeme absolut gesehen schwer bewertbar ist. Die Folge sind suboptimale Systeme mit erhöhten Produktkosten sowie erhöhten Validierungskosten.

Das Ziel ist die Vereinheitlichung der Anforderungen für einen optimierten Lastzyklus (Referenzzyklus).

Die Inhalte sind folgende:

- Analyse und Vergleich verschiedener vorhandener Lastzyklen von verschiedenen Herstellern
- Definition der Kriterien für die Optimierung
- Spezifikation eines optimierten Lastzyklus
- Verifikation an einem Beispiel

Die Analysen wurden für mehrere Zyklen die verschiedenen Zielsystemen zugeordnet sind durchgeführt. Es wurden Lastzyklen von verschiedenen Herstellern analysiert und miteinander verglichen. Aus der Erfahrung der bisherigen Entwicklungen wurden dabei vor allem Einzelpulse sehr genau untersucht. Die Analyse lief in zwei Schritten ab, wobei im ersten Schritt der Gesamtzyklus untersucht wurde, und im zweiten Schritt die eingangs erwähnte Einzelpulsanalyse durchgeführt wurde.

Gesamtzyklusanalyse

In der Zyklenanalyse wurden die beschreibenden Hauptparameter wie

- Dauer
- Leistung
 - Max. Ladeleistung
 - Max. Entladeleistung
 - Durchschnittsleistung
- Energiedurchsatz
- Energiefenster

bestimmt.

Ein Beispiel einer Teil-Analyse ist in folgender Tabelle dargestellt.

Tabelle 4 Beispiel Zyklusanalyse

	max	min	mean	mean (abs)	max. delta energy	
	charge	discharge			charge	discharge
Battery drive cycle	kW	kW	kW	kW	kWh	kWh
cycle1	94,20	-126,35	0,809	22,61	0,248	-0,151
cycle2	81,00	-108,00	0,391	8,50	0,873	-0,744
cycle3	49,00	-11,60	0,099	6,10	1,211	-1,192
cycle4	90,70	-112,03	0,904	9,94	0,126	-0,101
cycle5	109,01	-75,73	1,627	26,08	2,567	-2,229
cycle6	107,49	-125,23	1,129	22,43	0,371	-0,313

Die Analyse ermöglicht die Entscheidung, ob das zugrundeliegende Batteriesystem prinzipiell für den Zyklus geeignet ist. Eine Skalierung auf ein System mit unterschiedlichen Anforderungen kann durchgeführt werden, wenn das System auf der gleichen Zelle basiert.

Simulation Spannungsfenster

Als nächster Schritt wurde eine Simulation durchgeführt, um neben dem Energiefenster auch die Einhaltung des Spannungsfensters zu überprüfen. Falls vorhanden konnte auch mit Anforderungen an das System im gealterten Zustand die Simulation wiederholt werden.

Pulsanalyse

In der Pulsanalyse wurden für jeden Einzelpuls die beschreibenden Hauptparameter wie

- Dauer
- Leistung
 - Max. Ladeleistung oder Entladeleistung
 - Durchschnittsleistung
- Energiefenster

ermittelt.

Um eine klare Abgrenzung von Pulsen voneinander zu erhalten mussten minimale Ladeleistungen und minimale Entladeleistungen definiert werden, die bei der Untersuchung dem Wert Null zugeordnet wurden. Die Pulsanalyse wurde für diese Zelle auch im Hinblick auf die C-Rate in einem Puls näher untersucht. Dabei wurden unterschiedliche Grenzen vorgegeben. Die Dauer der Belastung der Zelle in einem Puls mit konstanter C-Rate ist ein geeigneter Indikator für die Verwendung der Zelle und ein möglicher Parameter für die Abschätzung der Alterung. Je höher der Anteil hoher C-Raten bei länger dauernden Pulsen ist, umso höher ist der Schädigungseffekt für die Zelle.

Ein Beispiel einer Pulsanalyse für den in obiger Tabelle dargestellt cycle1 ist in folgender Abbildung zu sehen.

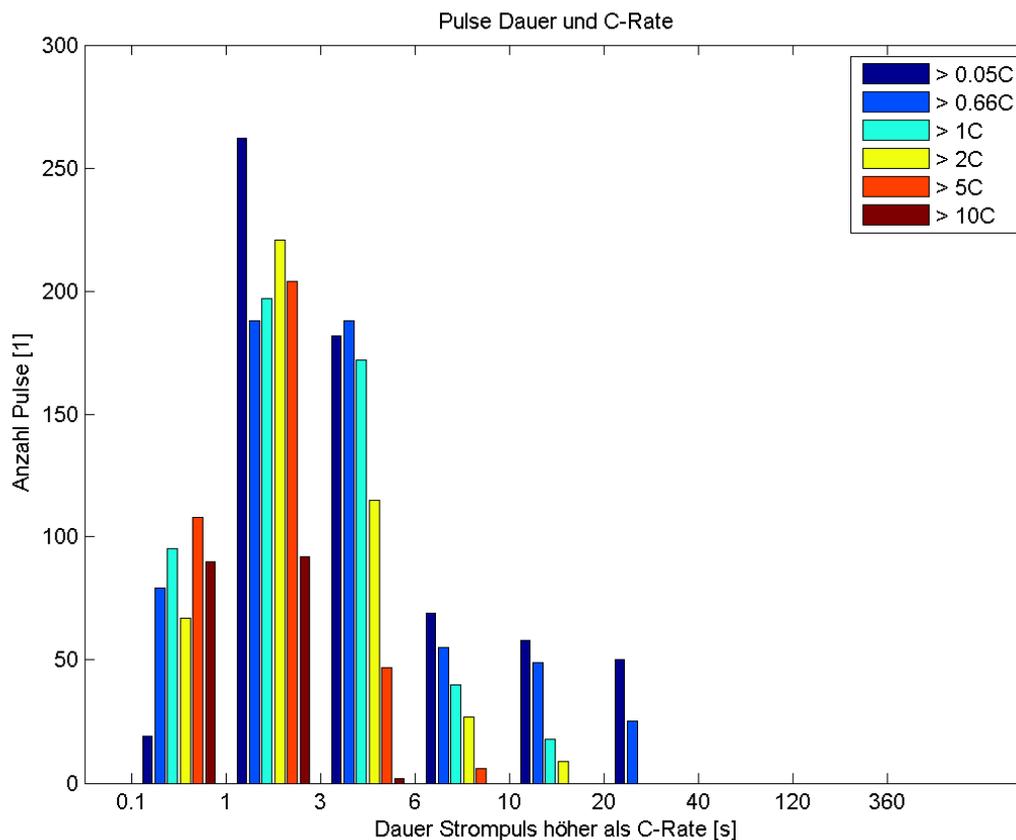


Abbildung 38 Beispiel Pulsanalyse

Das Ziel des Arbeitspaketes war es einen optimierten Lastzyklus zu definieren, mit dem eine möglichst hohe Anzahl verschiedener Zyklen abgedeckt werden kann.

Die Ergebnisse der durchgeführten Analysen zeigten, dass die Anforderungen der verschiedenen Hersteller zu stark differieren um die ursprünglich geplante Zielsetzung umzusetzen.

Die gewonnen Erkenntnisse zeigen, dass es möglich ist einzelne Zyklen zusammenzufassen und durch einen gemeinsamen Zyklus näherungsweise abzudecken. Diese Vorgehensweise lässt sich aber nicht verallgemeinern. Stark unterschiedliche Leistungsanforderungen (siehe obige Tabelle in diesem Kapitel) und unterschiedliche Energiefenster verhindern die Synthese eines allgemein gültigen Zyklus.

5.17 Arbeitspaket 4200 Steigerung der Lebensdauer von NFZ-Leistungsbatteriesystemen

Mit dem Vorgängerprojekt LIBS2008 konnte eine Lebensdauer des NFZ-Batteriesystems von etwa 15.000 Betriebsstunden erreicht werden. Das Ziel für dieses Arbeitspaket war eine signifikante Steigerung der Betriebsstunden über die Lebensdauer.

Überarbeitung des Zell-Designs

Die Grundidee der Steigerung der Lebensdauer basiert auf einer Erhöhung der Kapazität der eingesetzten Zelle und somit eine Erhöhung der Systemkapazität. Das End-of-Life Kriterium bei einem NFZ-Batteriesystem ist definiert durch eine Verringerung des Energiefensters bzw. der Kapazität um 50 %. Eine Erhöhung der Kapazität führt daher auch zu einer Erhöhung der Lebensdauer. Weiters bietet das erweiterte nutzbare Energiefenster die Möglichkeit die Betriebsstrategie (Betriebs-Algorithmen) insofern zu ändern, dass der durchschnittliche SOC-Wert im Betrieb erniedrigt wird. Der Durchschnittliche SOC-Wert ist einer der Hauptfaktoren der zyklischen Zellalterung. Je tiefer der durchschnittliche SOC-Wert desto besser ist die Lebensdauerperformance.

Die Kapazitätserhöhung auf Zellebene wurde erreicht indem der innere Zell-Aufbau der eingesetzten Zelle hinsichtlich folgender Kriterien überarbeitet wurde:

- Dünnere Folien für den zellinternen Stromsammler führten zu mehr verfügbarem Volumen für die Aktivmaterialien.
- Optimierung des Elektrodenaktivmaterials hinsichtlich Packungsdichte durch angepasste Partikelgrößenverteilung und reduzierte Elektrodenporosität.
- Optimierung der Elektrodenintegrationsdichte durch Weiterentwicklung der zellinternen Klebprozesse.
- Weder Preis noch Zellgeometrie wurden durch die Überarbeitung geändert.

Das Ergebnis der Überarbeitung war eine Kapazitätserhöhung auf Zellebene von 15,8 % (3,8 Ah → 4,4 Ah). Unter Berücksichtigung eines gewissen Maßes an Disbalancing auf der Systemebene kann eine Kapazitätserhöhung von auf 4,25 angenommen werden. Zur Absicherung des Ziels der Lebensdauererhöhung wurden mit Gen2 Zellen folgende Validierungstätigkeiten durchgeführt:

Zelltests DoE

Die Ergebnisse der Versuche mit der Gen1 Zelle (nicht in diesem Projekt durchgeführt) wurden analysiert und daraus ein neuer Versuchsplan entwickelt. Bei der Adaptierung des Versuchsplans von Gen1 wurde vor allem auf eine gute Reproduzierbarkeit der Tests Wert gelegt. Des weiteren wurde versucht mögliche Einflussmöglichkeiten auf Testergebnisse zu minimieren. Das betraf insbesondere eine Änderung der Strategie zum Durchlaufen eines bestimmten SOC-Fensters. Statt einer festgelegten Anzahl von Teilzyklen zum Durchlaufen des Fensters wird nun eine abhängig von der Breite des Fensters festzulegende Anzahl von Teilzyklen verwendet. Dies hat den entscheidenden Vorteil, dass die Basisstromhöhe im Zyklus nicht verändert werden muss und dadurch die Trennung der Auswirkung von maximalem Teststrom und Basisstrom gewährleistet ist. Die erste Serie von Tests mit Gen2 Zellen

startete Ende des Jahres 2009 bzw. Beginn des Jahres 2010. Die Abbruchkriterien für die Tests wurden mit zumindest 25% Kapazitätsverlust festgelegt. Für jeden Test wurde versucht drei Zellen zu verwenden, um zusätzliche Informationen über Streuungen während der Versuche zu erhalten.

Die Entwicklungsstufe DoE1 wurde abgeschlossen, die Entwicklungsstufe DoE2 wurde ebenso wie die Entwicklungsstufe DoE3 verglichen mit Gen1 mit einer geringeren Testtiefe durchgeführt um Testkosten einzusparen. Bei der Auswahl der Tests wurde nach einer Kombination der Haupteinflussparameter auf die Alterung vorgegangen. Alle Tests waren mit Ende 2011 abgeschlossen.

Zelltests Lebensdauer

Mit Gen2 Zellen wurden Tests auf Zellebene mit demselben Lastprofil und der gleichen Zelltemperatur, die auch mit Gen1 Zellen durchgeführt worden sind durchgeführt.

Aus den Ergebnissen ist ersichtlich, dass mit der Gen2 Zelle das angestrebte Kapazitätsziel am Lebensdauerende erreicht werden wird. Umgelegt auf ein System lässt dieser auf Einzelzellbasis durchgeführte Test den Schluss zu, dass auch für das System eine Lebensdauer von 20.000h erreicht werden kann, auch wenn Streuungen der Zellen im Produktionsprozess einen Einfluss auf das Ergebnis zeigen werden.

Zelltests Charakterisierung

Bezüglich Zellcharakterisierung wurde zur Parametrierung der Zellmodelle mit mehreren Gen2 Zellen Zellcharakterisierungsversuche bei unterschiedlichen Temperaturen durchgeführt um die Zellparameter zu ermitteln (z.B. HPPC, OCV, Hysterese, ...). Die Testdaten wurden ausgewertet und die Ergebnisse für die Parametrierung der Modelle verwendet.

Modultest Lebensdauer

Mit einem 4-Modul-Aufbau wurde ein Lebensdauertest bei erhöhter Kühlungseingangstemperatur (beschleunigt) durchgeführt, um die Absicherung des Lebensdauerziels zu verbessern und mit einem Testergebnis desselben 4-Modul-Aufbaus mit Gen1 Zellen zu vergleichen. Es wurde derselbe Zyklus wie für die Zelltests verwendet, hochskaliert auf die größere Anzahl von Zellen.

Durch die hohe Kühlungseingangstemperatur wird die zu erwartende Lebensdauer auf 50% reduziert. Das Ergebnis zeigt, dass für den 4-Modul-Aufbau das Erreichen des Lebensdauerziels realistisch ist.

Modultest maximale Leistung

Die Leistungstests am Modul zur Validierung der prognostizierten Leistungsfähigkeit waren mit erhöhtem Aufwand verbunden, da das Testsystem anfänglich für die geplante Testdurchführung nicht geeignet war. Erst eine Änderung der Software-Funktion des Testsystems (durch den Hersteller durchgeführt) konnte die ordnungsgemäße Durchführung dieser Testserie sicherstellen. Die Ergebnisse zeigten, dass die auf Basis der Charakterisierungstest der Zellen ermittelten Leistungswerte auch auf Modulebene erreicht werden, d.h. das Modul kann im vorgesehenen Spannungsfenster die entsprechende vorhergesagte Leistung zur Verfügung stellen.

Fazit

Die gewonnen Erkenntnisse zeigten, dass eine Erhöhung der Lebensdauer auf Systemebene durch die überarbeitete Zelle erreichbar ist. Damit kann die Zielsetzung des Arbeitspaketes auf Basis dieser Testergebnisse ebenfalls als erreicht angesehen werden.

Das aktuelle Feedback von potentiellen Kunden im Rahmen unserer Akquisetätigkeit zeigen, dass eine Lebensdauer von 20.000 h derzeit akzeptabel ist, jedoch eine Lebensdauer von 30.000 h als zukünftiger Zielwert definiert ist.

Aus Sicht von Magna E-Car System ist eine Lebensdauererhöhung auf 30.000h mit der aktuell eingesetzten Zelltechnologie (LFP), welche nur durch einer weiteren Kapazitätserhöhung und die damit verbundene Erhöhung der Kosten und Änderung der Zellgeometrie erreichbar wäre, nicht sinnvoll. Wesentlich vielversprechender ist der Einsatz einer neuen Technologie, Lithiumtitanoxid Anode / Lithiummanganoxid Kathode (LTO), welche basierend auf der Zellchemie eine signifikant höhere Lebensdauerperformance aufweist. Der Nachteil dieser Technologie ist die geringere nominale Spannung (LFP: 3,3 V; LTO: 2,4 V). Dadurch müssen mehr Zellen verbaut werden um die Systemspannung bzw. den Energieinhalt des Systems auf ein ähnliches Niveau verglichen mit der LFP-Technologie zu heben. Die LTO-Technologie wurde als zukunftsweisende Technologie erkannt da diese Technologie besondere Vorzüge gerade in den für den NFZ-Bereich wichtigen Anforderungen wie Lebensdauer und Leistungsfähigkeit bietet.

Daher wurde eine grundlegende Untersuchung dieser Technologie in das Arbeitspaket aufgenommen und ein Lebensdauertest eines Verbundes von 12 in Serie geschalteten LFP-Zellen durchgeführt.

Das Ergebnis zeigt, dass die Annahme einer signifikant besseren Lebensdauer der LTO-Technologie im Vergleich zur LFP-Technologie bestätigt werden konnten. Die weiterführende Analyse und Prognose ergab, dass auf Basis der in diesem Arbeitspaket gewonnen Erkenntnisse eine Lebensdauer von 30.000 h unter den im NFZ-Bereich üblichen Leistungsanforderungen mit der LTO-Technologie realistisch ist.

6 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Das Ziel im Bereich Nutzfahrzeug war die Steigerung der Lebensdauer von 15.000 Betriebsstunden um etwa 30%, welche durch Modifikation des inneren Zell-Aufbaus der bereits vorhandenen Hochleistungszelle und durch Konzeptionierung neuartiger Betriebs-Algorithmen erreicht wurde. Die Ergebnisse einer umfangreichen Validierung der Lebensdauer konnte zeigen, dass eine Lebensdauer von 20.000h erreicht werden kann. Aufgrund dessen, dass zukünftig Lebensdaueranforderungen im NFZ-Bereich von 30.000h erreicht werden sollen, wurde zusätzlich ein neue Technologie (LTO) untersucht. Die Ergebnisse bestätigten das signifikant bessere Lebensdauerverhalten der LTO-Technologie.

Ein weiteres Ziel war die Vereinheitlichung der Kundenanforderungen (basierend auf Lastzyklen) zu einem Referenzlastzyklus um die Validierungskosten auf Systemebene signifikant zu verringern. Die

gewonnen Erkenntnisse zeigen, dass es möglich ist einzelne Zyklen zusammenzufassen und durch einen gemeinsamen Zyklus näherungsweise abzudecken. Diese Vorgehensweise lässt sich aber nicht verallgemeinern. Stark unterschiedliche Leistungsanforderungen und unterschiedliche Energiefenster verhindern die Synthese eines allgemein gültigen Zyklus.

Das Ergebnis im Bereich Nutzfahrzeuge kann wie folgt dargestellt werden (Abbildung 39). Die Randpunkte des Diagrammes stellen die Hauptziele aus Kundensicht dar. Der Rand des Diagrammes stellt das mittelfristige Ziel im Bereich der NFZ-Batterien dar, das aus dem aktuellen Feedback von potentiellen Kunden im Rahmen unserer Akquisetätigkeit eruiert wurde. Die blaue Fläche entspricht der Projektausgangssituation. Die grüne Fläche entspricht den Projektergebnissen.

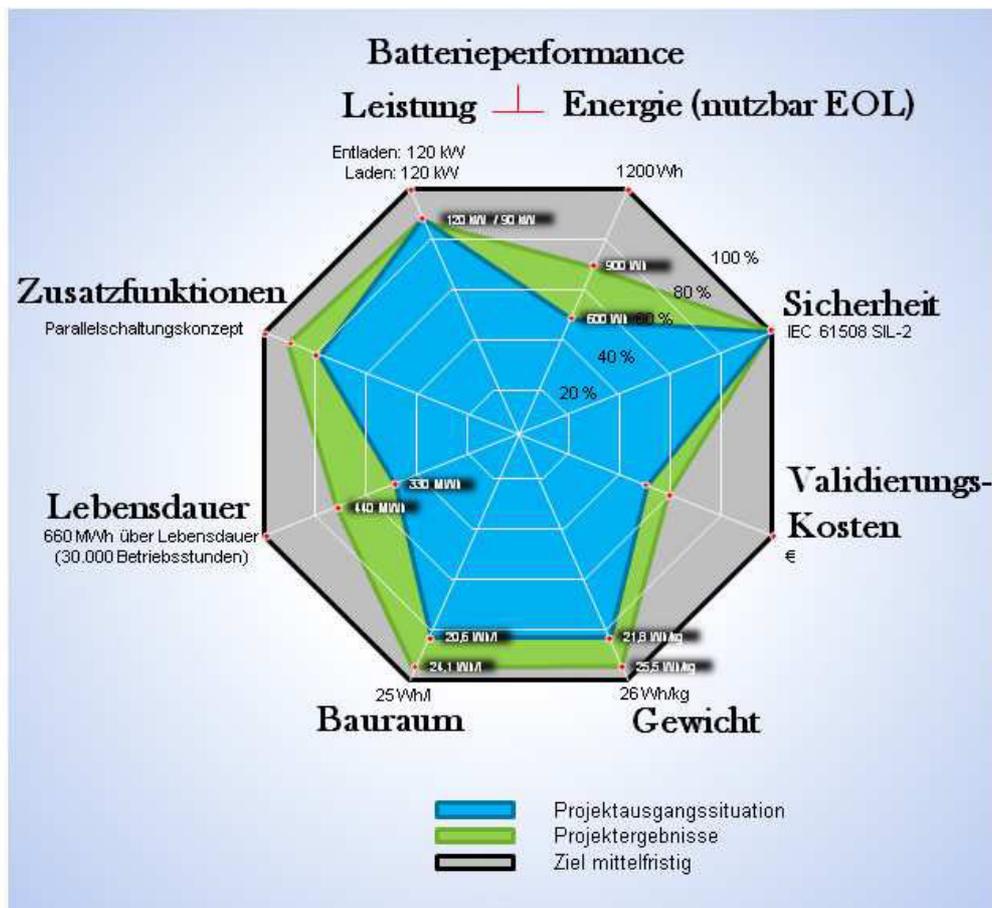


Abbildung 39 Projektergebnisse im Bereich Nutzfahrzeuge

Aus dem Diagramm in Abbildung 39 ist ersichtlich, dass die Projektergebnisse zu einer signifikanten Energie und somit Lebensdauererhöhung führten. Das Ergebnis ist derzeit akzeptabel, jedoch wird mittelfristig eine weitere signifikante Weiterentwicklung, insbesondere im Bereich Lebensdauer gefordert. Aus derzeitiger Sicht wird damit auch ein Technologiewechsel notwendig.

Das Ziel im Bereich Personenkräftfahrzeuge war die erstmalige Darstellung eines Batteriesystemprototyps auf Basis von Hochenergie-Zellen mit prismatischer Bauform. Der Aufbau eines PHEV-Systemprototypens wurde erfolgreich durchgeführt und fand bereits großes Interesse an potentiellen Kunden. Das Ergebnis kann wie folgt dargestellt werden (Abbildung 40). Die Randpunkte des Diagrammes stellen die Hauptziele aus Kundensicht dar. Der Rand des Diagrammes stellt das

mittelfristige Ziel im Bereich der PHEV-Batterien dar, das aus dem aktuellen Feedback von potentiellen Kunden im Rahmen unserer Akquisetätigkeit eruiert wurde. Die grüne Fläche entspricht den Projektergebnissen.

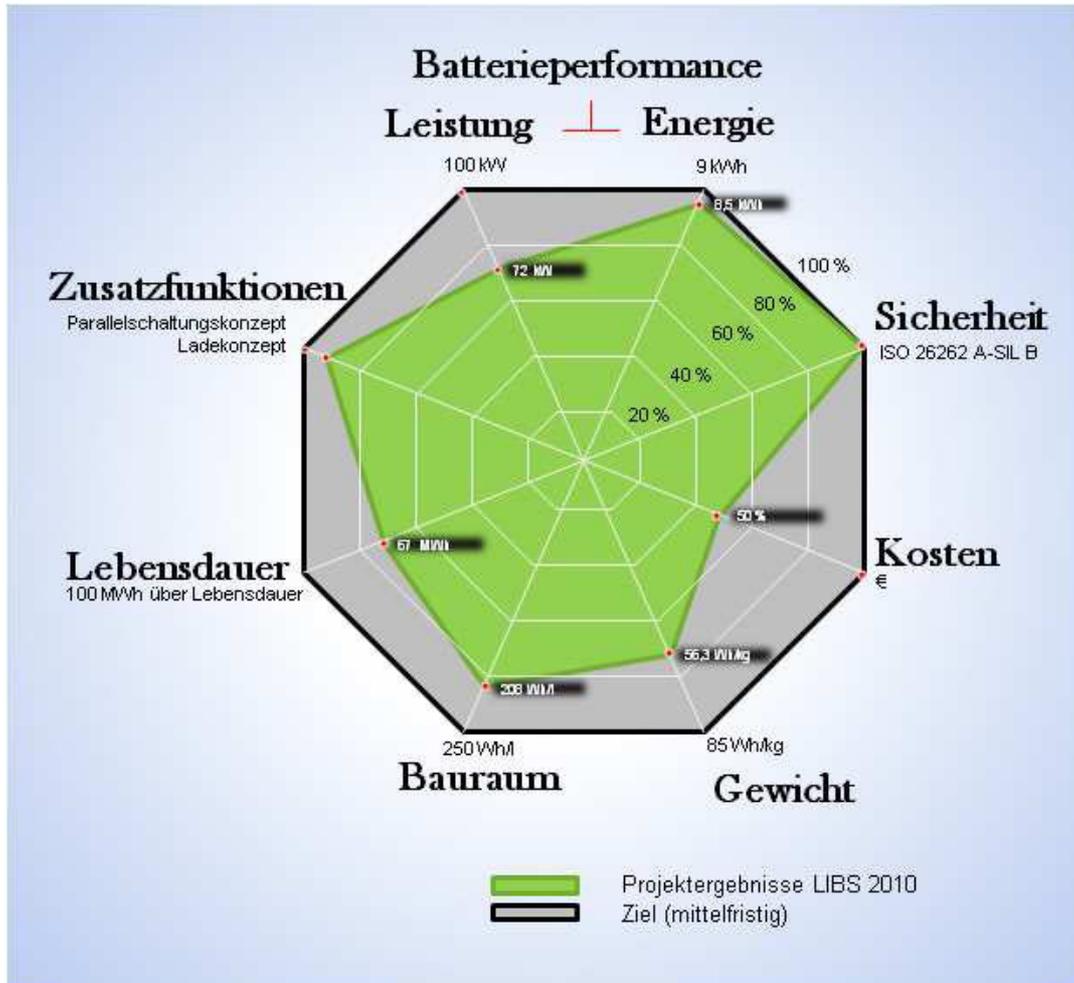


Abbildung 40 Projektergebnisse im Bereich Personenkraftfahrzeuge

Aus dem Diagramm in Abbildung 39 ist ersichtlich, dass Hinsichtlich Energieinhalt, Sicherheit und Zusatzfunktionen das Ziel nahezu erreicht wurde. Optimierungsbedarf gibt es in den Bereichen, Kosten, Leistung, Lebensdauer und Bauraum.

Die Weiterentwicklung der Bereiche Leistungsfähigkeit und Lebensdauer wird vor allem im Rahmen der im nächsten Schritt geplanten 3. Evolutionsstufe der Zelle durchgeführt werden. Dabei soll eine verbesserte Zellchemie sowie Schweißterminals die Leistungsfähigkeit und die Lebensdauer signifikant erhöhen. Weiters ist geplant, die 3. Evolutionsstufe der Zelle mit Aluminium-Gehäuse auszuführen um so auch einen Beitrag zur Gewichtsreduktion zu leisten.

Bezüglich Bauraum und Gewicht ist eine Optimierung des Modulkonzeptes geplant. Dabei soll die Integrationsdichte erhöht werden und durch Leichtbaumaterialien (z. B.: Kühlkörper aus Aluminium) das Gewicht reduziert werden.

Der größte Optimierungsbedarf liegt im Bereich der Kosten. Um hier das Ziel zu erreichen, müssen mehrere Maßnahmen parallel durchgeführt werden:

– „Design for Mass-Production“

Die Hauptfaktoren für die hohen Kosten sind die hohen Material- und Produktionskosten. Ein wesentliches Ziel vor dem Start einer Serienproduktion ist die Senkung der Material- und Produktkosten. Unabhängig von der Reduktion der Zellkosten, auf die Magna E-Car Systems keinen direkten Einfluss hat, sind folgende Maßnahmen geplant:

- Optimierung der Systemarchitektur hinsichtlich der Eignung für einen hohen Produktions-Automatisierungsgrad (Optimierung Taktzeiten, Toleranzen Verbindungstechnologien, etc.)
- Optimierung der Materialauswahl hinsichtlich Lebensdauer und Eignung im Produktionsprozess
- Entwicklung von massenproduktionstauglichen Fertigungsverfahren (Schrauben, Kleben, Schweißen, etc.)

– Kostensenkung durch Stückzahlerhöhung

Um ein optimale Marktdurchdringung (hohe Stückzahlen) zu erreichen ist es notwendig verschiedene Fahrzeugklassen bzw. Fahrzeugplattformen mit einer möglichst geringen Anzahl an Batteriederivaten abzudecken.

Weiters ist es geplant das entwickelte Konzept auch außerhalb des Bereiches der Personenkraftwagen anzubieten. Der Fokus richtet sich dabei auf den Bereich der leichten Nutzfahrzeuge.

– Flexibles Batteriemanagement

Die wesentliche funktionelle Herausforderung besteht in der effizienten Kombination von Elektroantrieb und Hybridantrieb. Da diese Betriebsarten zum Teil gegensätzliche Anforderungen aufweisen, ist eine Optimierung der Betriebsstrategien für PHEV Anwendung notwendig um technisch und wirtschaftlich den bestmöglichen Kompromiss zu finden.

7 Ausblick und Empfehlungen

Marktvision PHEV:

Bei der Evaluierung des entsprechenden Marktpotentials ist der Konsens festzuhalten, dass sich die Mobilität in den nächsten 3 Dekaden signifikant in Richtung alternativer Antriebskonzepte entwickeln wird, deren Verteilung aus Gründen der nicht klar bewertbaren technologischen Potentiale der Varianten allerdings weitgehend offen ist. Es wurde eine Befragung von Endkunden durchgeführt ob für sie bei Neukauf in den nächsten 10 Jahren ein elektrifiziertes Kraftfahrzeug eine Option wäre (siehe Abbildung 41).

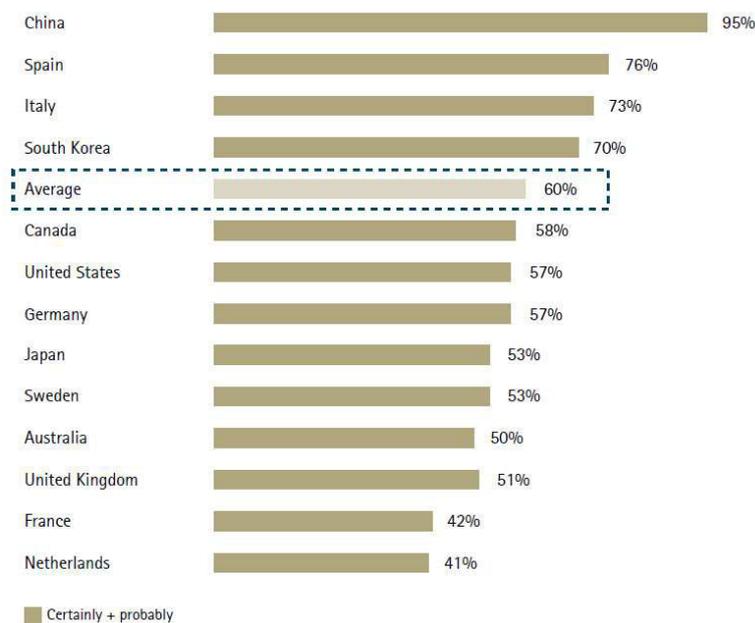


Abbildung 41 Umfrageergebnis ob beim Kauf eines neuen KFZ ein elektrifiziertes Antriebskonzept in Frage käme, Quelle: Accenture Research

Diese doch breite Zustimmung der Endnutzer spiegelt sich auch in den Marktprognosen wieder.

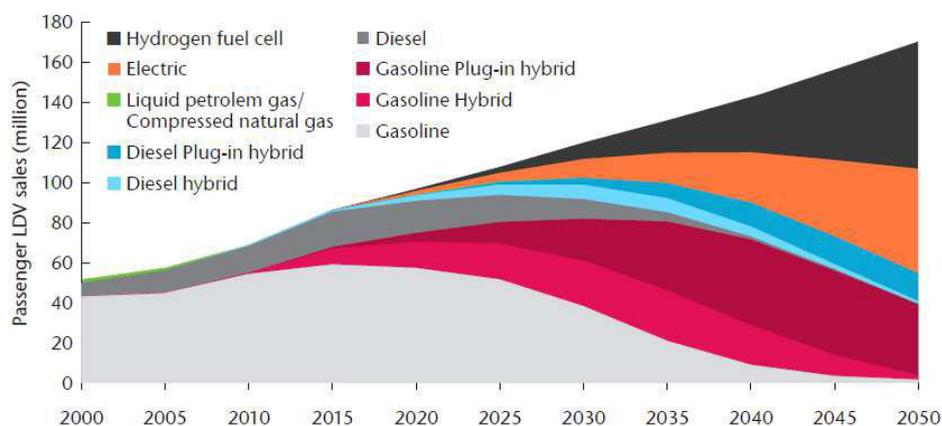


Abbildung 42 Verteilung kommerzieller und alternativer Antriebskonzepte in der Mobilität, Quelle: IEA 2009

Zahlreiche Studien und Vorhersagen zeichnen ein optimistisches Bild für das erwartete Marktpotential von PHEV Fahrzeugen. Mit zunehmendem Preisverfall der elektrochemischen Speicherzellen steigt der Grad der Elektrifizierung deutlich an was in einem globalen Szenario mit etwa 2/3 an EVs und PHEVs beziffert wird.



Abbildung 43 Entwicklung der weltweit produzierten Fahrzeuge mit elektrischem Antriebsanteil (grün dargestellt: Lithiumbedarf für Elektromobilität (ab 2016 in optimistischem und pessimistischem Szenario))

Quelle: Roskill; <http://www.smartinvestingdaily.com/articles/smart-investing-102810.html>

Ausgehend von diesen Betrachtungen zeichnen Marktanalysen ein sehr positives Bild für die zu erwartenden Volumina dieser Fahrzeuggruppen. Bis 2019 sollen 7% aller am Markt befindlichen Fahrzeuge elektrisch unterstützte Antriebe besitzen wobei gesamt 2% auf PHEV entfallen. Durch den signifikant größeren Energiespeicher resultiert auch ein für Batteriehersteller und -Integratoren wesentlich interessanterer Business Case.

Verwertung & Ausblick

Sowohl die theoretischen Forschungsergebnisse als auch die experimentellen Arbeiten bis hin zum verifizierten Funktionsprototypen bilden die Grundlage für die darauf aufbauende Serienentwicklung und Produktion bei MAGNA E-Car Systems. Ein weltweites Kontaktnetzwerk zu renommierten Zellherstellern bildet dabei ein zuverlässiges Rahmensystem zur geeigneten Festlegung der Forschungsschwerpunkte in den Arbeitspaketen.

Aus den Ergebnissen wurden bereits weiterführende Forschungsprojekte abgeleitet, mit dem Fernziel, marktfähige Batteriesysteme für den Massenmarkt liefern zu können, so rasch wie möglich näher zu kommen.

Der Geschäftsbereich Cells- and Battery Packs innerhalb der Magna E-Car Systems entwickelt seit mehreren Jahren Batteriesysteme für mobile Anwendungen und deckt dabei die gesamte Wertschöpfungskette von der Zell-Entwicklung bis zur Integration von Batteriesystemen in Fahrzeugen als Beitrag für eine zukünftige Elektromobilität ab.

8 Literaturverzeichnis

- [1] EN 61851-1 Konduktive Ladesysteme für Elektrofahrzeuge
- [2] Generic System Requirements Li-Ion Batteries
- [3] Moore, Schneider. A Review of Cell Equalization Methods for Lithium Ion and Lithium Polymer Battery Systems. Society of Automotive Engineers, Inc.. 2001
- [4] <http://www.mpoweruk.com/safety.htm>
- [5] FreedomCAR Battery Test Manual for Power-Assist Hybrid Electric Vehicles
- [6] G. Hunt, Ch. Motloch: Freedom CAR "Battery Test Manual For Power-Assist Hybrid Electric Vehicles", 2003.
- [7] Daniel H. Doughty: SAE J2464 "EV & HEV Rechargeable Energy Storage System (RESS) Safety and Abuse Testing Procedure", 2009
- [8] Beuth, DIN EN IEC 61508 (Teil 0 bis 7), Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer/programmierbarer elektronischer Systeme, 2002-2005
- [9] Beuth, DIN EN 60664-1 (VDE 0110-1), Isolationskoordination für elektrische Betriebsmittel in Niederspannungsanlagen – Teil 1: Grundsätze, Anforderungen und Prüfungen, 2008
- [10] Beuth, DIN EN 60664-1 (VDE 0110-3), Isolationskoordination für elektrische Betriebsmittel in Niederspannungsanlagen – Teil 3: Anwendung von Beschichtungen, Eingießen oder Vergießen zum Schutz gegen Verschmutzung, 2010

9 Anhang

9.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Projekt-Hauptziele	4
Abbildung 2	Verknüpfung Projekthauptziele - Arbeitspakete	6
Abbildung 3	Sicherheitsrelevante Temperaturklassen.....	16
Abbildung 4	Lebensdauer relevante Temperaturklassen	16
Abbildung 5	Hazard Level nach USABC Freedom Car.....	20
Abbildung 6	Testsystem mit quaderförmigen Druckbehälter	21
Abbildung 7	Testsystem mit zylindrischem Druckbehälter	21
Abbildung 8	Testsystem zur Provozierung von internen Zellkurzschlüssen	22
Abbildung 9	Testmodul – Rahmenkonzept für Pouch-Zellen	24
Abbildung 10	Ventgas-Ableitsystem auf Systemebene	25
Abbildung 11	HPPC test pulse.....	26
Abbildung 12	Pulskorridor für SOH Bestimmung	27
Abbildung 13	Funktionales Konzept des Steuer- und Überwachungssystems	32
Abbildung 14	ASIL nach Norm ISO 26262.....	34
Abbildung 15	Ansatz zur Minimierung des Risikos	34
Abbildung 16	Redundante Stromsensorarchitektur	36

Abbildung 17 AUTOSAR Architektur	37
Abbildung 18 Ersatzschaltbild Berechnung Kurzschlussstrom	39
Abbildung 19 links: 5 mOhm Abschlusswiderstand; rechts: 100 mOhm Abschlusswiderstand	40
Abbildung 20 Parallelschaltung von Zellen innerhalb eines Zellstrangs	48
Abbildung 21 Parallelschaltung von Zellsträngen innerhalb eines Batteriesystems mit gemeinsamer Sicherung .	48
Abbildung 22 Parallelschaltung von Zellsträngen innerhalb eines Batteriesystems mit separater Sicherung	49
Abbildung 23 Parallelschaltung von Batteriesystemen	49
Abbildung 24 System-Konzept für PHEV-Fahrzeugen	52
Abbildung 25 Prinzip der elektrisch-thermisch gekoppelte Simulation	54
Abbildung 26 Aspekte der elektrisch-thermisch gekoppelte Simulationen	55
Abbildung 27: Kühlungsstrategie	56
Abbildung 28 Architektur geringer Komplexität	60
Abbildung 29 Architektur geringer Komplexität mit Lade-Relais	61
Abbildung 30 Universelle Architektur	62
Abbildung 31 System-Prototyp für PHEV-Fahrzeugenanwendungen	64
Abbildung 32 Testsystem zur Charakterisierung eines luftgekühlten Moduls	65
Abbildung 33 links: Lüfter/Wärmetauscher, rechts: luftgekühltes Modul.....	66
Abbildung 34 Testsystem mit quaderförmigen Druckbehälter	66
Abbildung 35 Testsystem mit zylindrischem Druckbehälter	67
Abbildung 36 Testsystem für Stromsensor	67
Abbildung 37 Testsystem für Stromsensor	68
Abbildung 38 Beispiel Pulsanalyse	71
Abbildung 39 Projektergebnisse im Bereich Nutzfahrzeuge	75
Abbildung 40 Projektergebnisse im Bereich Personenkraftfahrzeuge	76
Abbildung 41 Umfrageergebnis ob beim Kauf eines neuen KFZ ein elektrifiziertes Antriebskonzept in Frage käme, Quelle: Accenture Research	78
Abbildung 42 Verteilung kommerzieller und alternativer Antriebskonzepte in der Mobilität, Quelle: IEA 2009.....	78
Abbildung 43 Entwicklung der weltweit produzierten Fahrzeuge mit elektrischem Antriebsanteil (grün dargestellt: Lithiumbedarf für Elektromobilität (ab 2016 in optimistischem und pessimistischem Szenario)	79

9.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Evaluierung von Zellchemie Optionen.....	13
Tabelle 2: Bewertungsmatrix Zellgehäuse: metal can versus pouch.....	15
Tabelle 3 Ermittlung Relais-Grenzparameter	42
Tabelle 4 Beispiel Zyklenanalyse	70

IMPRESSUM

Verfasser

MAGNA STEYR Fahrzeugtechnik AG & Co KG

Peter Dämon

Liebenauer Hauptstrasse 317, 8041 Graz

Tel: +43/(0)664-8840-5154

Fax: +43/316/404-89899025

E-Mail: peter.daemon@magnaecar.com

Web: www.magnaecar.com

Autoren

Peter Dämon

Stefan Doczy

Wofgang Toppler

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber

Klima- und Energiefonds

Gumpendorfer Straße 5/22

1060 Wien

office@klimafonds.gv.at

www.klimafonds.gv.at

Disclaimer

Die Autoren tragen die alleinige Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts. Er spiegelt nicht notwendigerweise die Meinung des Klima- und Energiefonds wider.

Der Klima- und Energiefonds ist nicht für die Weiternutzung der hier enthaltenen Informationen verantwortlich.

Gestaltung des Deckblattes

ZS communication + art GmbH