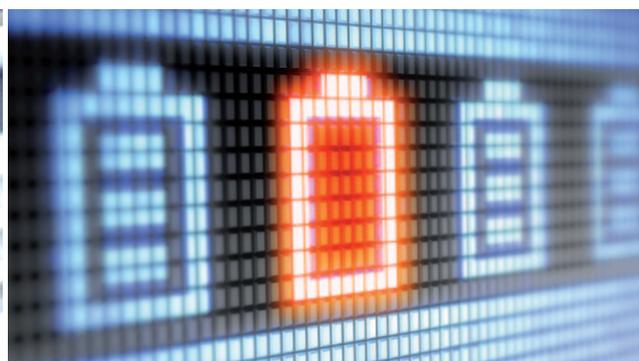


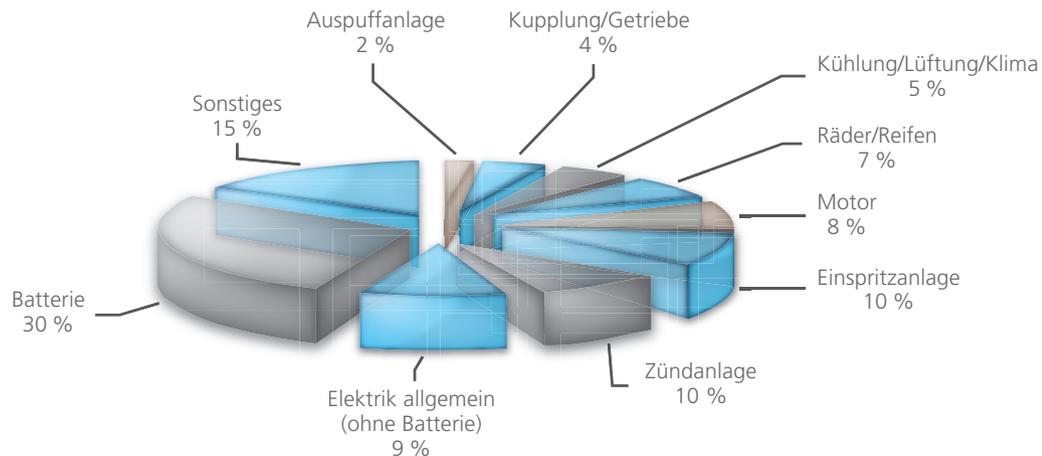
# Ionien am Start

Aufbau eines Demonstrators für eine 12-Volt-Lithium-Ionen-Starterbatterie



Die herkömmlichen in konventionellen Fahrzeugen eingesetzten 12-Volt-Blei-Säure-Starterbatterien gelangen zunehmend an ihre Leistungsgrenzen. Moderne Start-Stopp-Systeme, die steigende Anzahl elektrischer Verbraucher und die zunehmende Elektrifizierung von mechanisch angetriebenen Aggregaten erhöhen die Anforderungen an den Energiespeicher. Der Leichtbau setzt jedoch enge Grenzen. Die Entwicklung einer Lithium-Ionen-Starterbatterie erschließt einen vielversprechenden Weg.





2011 lagen die durch die 12-Volt-Starterbatterie verursachten Fahrzeugpannen bei 30 %. Quelle: ADAC, Baugruppenverteilung 2011

### Anforderungen an die Starterbatterie

Zu den aktuellen Themen der Automobilentwicklung gehören die stetige Verbesserung der gesamten Energieeffizienz und der CO<sub>2</sub>-Bilanz der Fahrzeuge. Während einerseits konsequenter Leichtbau gefordert wird, steigt andererseits der Bedarf an elektrischer Energie. Verantwortlich dafür sind u.a. Sicherheits- und Komfortfunktionen, die Elektrifizierung von Komponenten, die früher mechanisch angetrieben wurden, und neue Funktionen wie die Start-Stopp-Automatik. Zusammen führt das zu einer hohen Belastung der Batterie. Darüber hinaus muss diese sich den Anforderungen bezüglich der Gewichtsreduktion und der Zyklenfestigkeit (Ladung/Entladung im Start-Stopp-Betrieb) respektive Haltbarkeit stellen. In diesem Zusammenhang sind auch Betrachtungen der Ursachen von Fahrzeugpannen interessant. Eine Auswertung der ADAC-Pannenstatistik von 2009 zeigt, dass etwa 27 % aller Fahrzeugpannen auf die Batterie zurückzuführen sind. In 2011 ist die Batterie an etwa 30 % aller erfassten Pannen beteiligt. Dies zeigt: Die Batterie gelangt an ihre Leistungsgrenze.

### Lösungsansätze für alternative Batteriekonzepte

Um eine hohe Verfügbarkeit des Fahrzeugs zu gewährleisten, kann beispielsweise der Einsatz von Zwei-Batterie-Bordnetzen, zusätzlichen Doppelschichtkondensatoren oder anderen Batterietechnologien sinnvoll sein. Insbesondere Lithium-Ionen (Li-Ion)-Batterien bieten attraktive Merkmale für den Einsatz als 12-Volt-Starterbatterie im Automobil. Li-Ion-Batterien besitzen derzeit eine der höchsten Energiedichten aller verfügbaren wiederaufladbaren Energiespeicher. Die maximal möglichen Lade-/Entladezyklen übertreffen Blei-Säure-Batterien um ein Vielfaches, so dass sie die Kriterien Leichtbau und Zyklenfestigkeit des Anforderungsprofils abdecken. Beispielsweise wiegt eine Blei-Säure-Batterie mit einer Kapazität von 92 Amperestunden etwa 26 kg und erreicht ca. 400 Lade-/Entladezyklen bei einer Entladetiefe von 20 %. Eine vergleichbare Li-Ion-Batterie wiegt lediglich 16 kg und kommt bei gleicher Entladetiefe auf ca. 15.000 Lade-/Entladezyklen. Die erzielbare Gewichtsreduktion von ca. 10 kg verbessert die CO<sub>2</sub>-Bilanz eines Fahrzeugs um etwa 0,85 g/km.

### Herausforderungen: Ladung und Temperatur

Nachteilig sind bei Li-Ion-Batterien die sehr starke Empfindlichkeit gegenüber Tiefentladung, Überladung und der beschränkte Arbeitstemperaturbereich. Des Weiteren ergeben sich abhängig von der Temperatur und dem Fahrverhalten unterschiedliche Anforderungen an die Ladung: Beispielsweise entstehen beim Kurzstreckenbetrieb im Winter die höchsten Anforderungen an den Energiespeicher bei gleichzeitig eingeschränkter Ladefähigkeit. Die Nachteile lassen sich jedoch durch geeignete Betriebsstrategien, Arbeitspunkte und weitere Maßnahmen kompensieren – eine Aufgabe für elektronische Batteriemanagementsysteme (BMS), die daneben auch eine Vielzahl von Überwachungs- und Regelaufgaben übernehmen. Zum Beispiel kann ein BMS die Aufgabe der ladezustands- und temperaturabhängigen Regelung der Lade- und Entladeströme übernehmen. Weiterhin führt ein BMS die sogenannte Zellsymmetrierung durch, um die Ladezustände aller Zellen aneinander anzugleichen. Da eine Batterie aus mehreren seriell geschalteten Zellgruppen besteht, müssen deren Ladezustände durch

### Lithium-Ionen-Batterie als Ersatz für Blei-Säure-Batterie

Blei-Säure	Li-Ion
	
<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Lebensdauer: ~ 4 Jahre</li> <li>■ Zyklen bei 20% Entladetiefe:               <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Blei-Säure-Batterie: ~ 400</li> <li>■ AGM (Absorbent Glass Mat): ~ 1000</li> </ul> </li> <li>■ Energiedichte: ~ 40 Wh/kg</li> <li>■ Preis: Niedrig</li> <li>■ Komplexität: Gering</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Lebensdauer: ~ 15 Jahre</li> <li>■ Zyklen bei 20% Entladetiefe: 15.000</li> <li>■ Energiedichte: 50 - 100 Wh/kg</li> <li>■ Preis: Derzeit fünfmal höher als der von Blei-Säure-Batterien</li> <li>■ Komplexität: Hoch Benötigt Batteriemanagementsystem</li> </ul>

Vergleich der Batteriesysteme Blei-Säure vs. Li-Ion für den Einsatz als Starterbatterie im Automobil.

die Zellsymmetrierung stets auf dem gleichen Niveau gehalten werden, um ein Überladen oder Tiefentladen einzelner Zellgruppen zu vermeiden.

#### Starterbatterie vs. Traktionsbatterie

An eine 12-Volt-Starterbatterie werden andere Anforderungen gestellt als an die Hochvoltbatterie eines Elektro- oder Hybridfahrzeuges (Traktionsbatterie). Zwar muss auch die Starterbatterie das Rekuperieren unterstützen, jedoch muss sie normalerweise keine hohen Ströme über längere Zeiträume abgeben, abgesehen vom Startvorgang des Verbrennungsmotors. Darüber hinaus speist sie das Bordnetz mit vergleichsweise niedrigen Strömen. Eine Starterbatterie wird beim Normalbetrieb in der Regel nie vollständig entladen. Typischerweise bewegt sich ihr Ladezustand in einem Bereich um 95 %.

#### Vorentwicklungen für ein Li-Ion-Starter-Batteriesystem

Um eine effiziente Entwicklung verschiedener Komponenten eines Batteriesystems auf Li-Ion-Basis durchzuführen, wurden mehrere parallele Teilprojekte gestartet. Dazu gehörten ein Batterie-Demonstrator inklusive

Batterie-Elektronik, thermische und elektrische Simulationsmodelle der Batterie, ein Regelalgorithmus für den Ladestrom, der in das BMS integriert wird, und eine Werkzeugkette für das Rapid Control Prototyping (RCP) im Fahrzeug.

Dieses der Serienentwicklung vorgelegte Vorentwicklungsprojekt dient dazu, Möglichkeiten und Verfahren für einen eventuellen Serieneinsatz zu untersuchen und zu erproben. Der Versuchsaufbau hat das Ziel, möglichst viele Ideen auszuprobieren, um diese zu bewerten. Zu diesem Zweck wurde ein Batterie-Demonstrator samt Elektronikkomponenten aufgebaut und die gesamte Algorithmik auf ein RCP-System ausgelagert.

#### Konzept für Batterie und BMS-Algorithmik

Der Batterie-Demonstrator muss zunächst dem Formfaktor herkömmlicher Blei-Starterbatterien entsprechen, so dass er als Ersatz für diese Batterie in herkömmlichen Fahrzeugen eingebaut werden kann. Für einen zukünftigen Serieneinsatz sind individuellere Bauformen denkbar und umsetzbar. Zusätzlich zu den Polen für die Klemmenspannung verfügt der Demonstrator über eine Schnitt-

## Glossar

### Elektrochemische Impedanzspektroskopie

– Methode zur zerstörungsfreien Analyse und Charakterisierung von Materialien. Die Auswertung von Anregungssignalen unterschiedlicher Frequenz und der Systemantwort liefert das Impedanzspektrum des Systems.

### Finite-Elemente-Methode (FEM)

– Numerisches Verfahren zur Lösung von partiellen Differentialgleichungen, die beispielsweise zur mathematischen Beschreibung physikalischer Vorgänge genutzt werden.

### Serial Peripheral Interface (SPI)

– Bussystem für die synchrone, serielle Datenübertragung, mit dem digitale Schaltungen nach dem Master-Slave-Prinzip miteinander verbunden werden können.

### Inter-Integrated Circuit (I<sup>2</sup>C)

– Serieller Datenbus, der hauptsächlich geräteintern für die Kommunikation zwischen verschiedenen Schaltungsteilen genutzt wird, z. B. zwischen einem Controller und Peripherie-Schaltkreisen.



stelle für das RCP-System mit der BMS-Algorithmik. Dieses kann in der Nähe der Batterie untergebracht werden und ist mit ihr über ein Bus-system verbunden. Für den Serien-einsatz ist eine in der Batterie integrierte Lösung naheliegend.

Im Batteriegehäuse wurde neben den Li-Ion-Zellen auch eine Elektronik vorgesehen, um in der Batterie die Spannungen und Ströme der Zellgruppen sowie die Temperaturen ausgewählter Zellen zu messen. Außerdem ermöglicht sie die Symmetrierung zwischen den Zellen und dient als Stellglied, um die Ladeströme zu regeln.

Für den internen Aufbau des Batterie-Demonstrators sind sowohl thermische als auch elektrische Aspekte zu berücksichtigen. Das betrifft die räumliche Anordnung der Zellen und der Elektronik sowie die elektrische Verschaltung von Zellgruppen mit Stromschienen. Per Simulation und im Rahmen verschiedener Versuchsmuster wurden der Aufbau und die Topologie der Verschaltung aller Zellen optimiert.

#### Modell einer Li-Ion-Starterbatterie

Für simulationsgestützte Untersuchungen des Verhaltens einer Li-Ion-Starter-

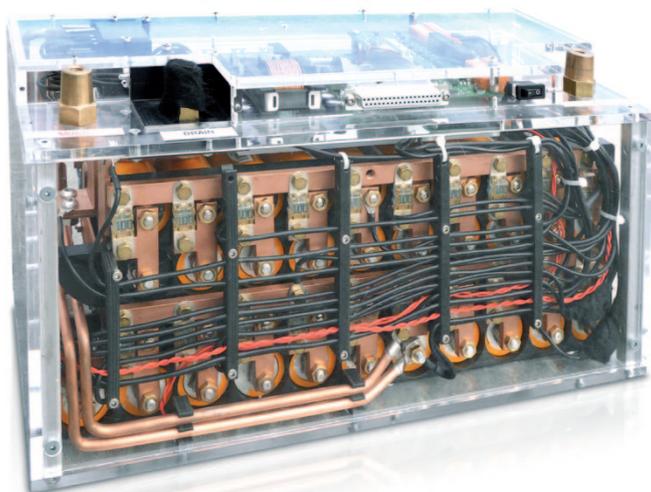
batterie und der BMS-Algorithmen wurde zunächst ein Batteriemodell entwickelt. Damit lassen sich in Voruntersuchungen wichtige Erkenntnisse über die elektrischen und thermischen Eigenschaften der Batterie sammeln. Um die charakteristischen Merkmale der Batterie in Echtzeit abzubilden, war es erforderlich, ein Klemmenspannungsmodell mit einem elektrothermischen FEM-Modell (Finite-Elemente-Methode) zu kombinieren. Eine besondere Herausforderung stellte die Parametrierung der Modelle dar. Für eine umfassende Charakterisierung der Batterie wurden sowohl Sprungantworten der Batteriezellen ausgewertet, als auch eine elektrochemische Impedanzspektroskopie durchgeführt. Die zu einem hybriden Modell fusionierten Ergebnisse führen zu einem Gesamtmodell hoher Güte und Dynamik. Das vollständig parametrisierte Modell bildet u.a. auch die Alterung der Batterie ab. Dabei werden die kalendarische und die durch Ladungszyklen verursachte Alterung berücksichtigt.

#### Entwicklung der BMS-Software

Die elementaren Komponenten einer BMS-Software sind Algorithmen, die den Ladestrom regeln, die Zellsym-

metrierung initiieren sowie Lade- und Alterungszustand ermitteln. Sie überwachen ebenfalls die Batterie redundant auf Überspannung, Übertemperatur und Überstrom. Für dieses Versuchssystem wurde der Algorithmus für den Ladezustand mit einem Kalmanfilter ausgelegt, um Messfehler und Störungen zu eliminieren. Neben dem Ladezustand (State of Charge, SOC) analysiert die Software ebenfalls den Alterungszustand der Batterie (State of Health, SOH). Die in dem hier betrachteten System messtechnisch, durch explizite Adressierung einzelner Zellen realisierte Eigendiagnose liefert eine Aussage über die verfügbare Kapazität bzw. den Alterungszustand.

Für den Ladungsausgleich zwischen den einzelnen Zellen wurde eine passive Zellsymmetrierung gewählt. Bei dieser Methode werden selektiv einzelne Zellgruppen auf das Niveau der schwächsten Gruppe entladen, bis alle Zellen ein identisches Ladungsniveau haben. Erste Vorentwicklungen und die anschließende Wirtschaftlichkeitsbetrachtung eines aktiven Zellsymmetrierungskonzeptes, bei dem Ladungen einzelner Zellen umgeladen werden, machten deutlich, dass sich die Rentabilität der Investition für dieses System erst nach der angenommenen Fahrzeuglebensdauer positiv auswirkt. Daher wurde von einem möglichen Einsatz in einer Starterbatterie abgesehen.



*Der Li-Ion-Batterie-Demonstrator mit transparentem Plexiglasgehäuse. Zellen, Stromschienen, Kontaktierungen und Elektronik sind vollständig einsehbar. Aus Gründen des Leichtbaus wären in späteren serienreifen Systemen Aluminium-Verbinder statt der Kupferstromschienen denkbar.*

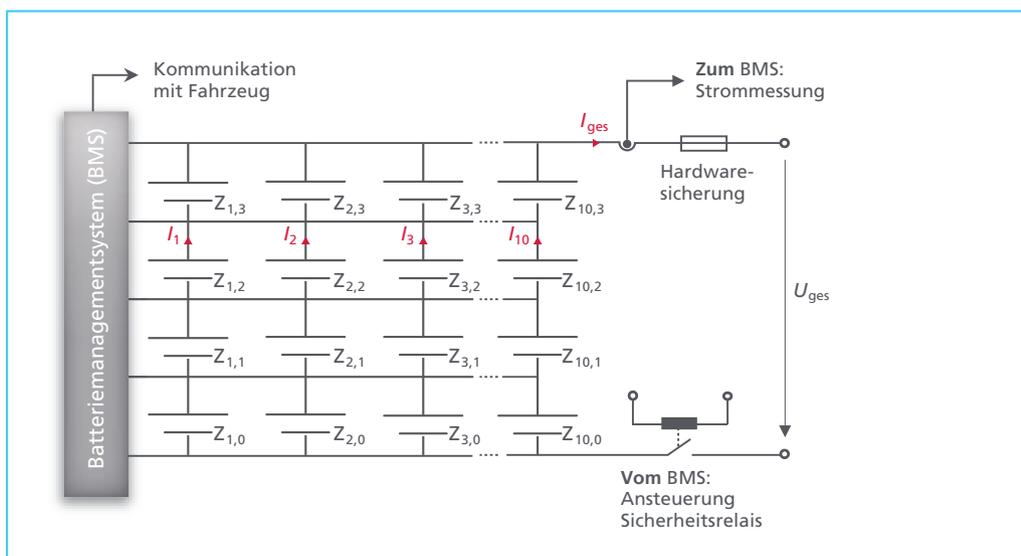
„Die MicroAutoBox macht genau das, was man von einem Prototyping-System erwartet. Einfach eine neue Reglersoftware aufspielen und sofort im Fahrzeug ausprobieren.“

Dipl.-Ing. (TU) David Vergossen, Audi Electronics Venture GmbH

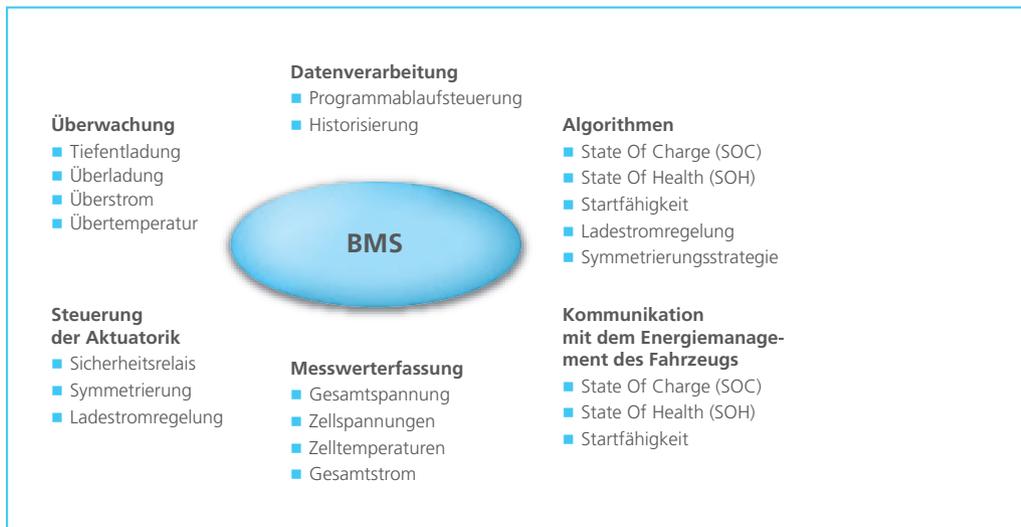
**Prototypischer Aufbau des BMS**

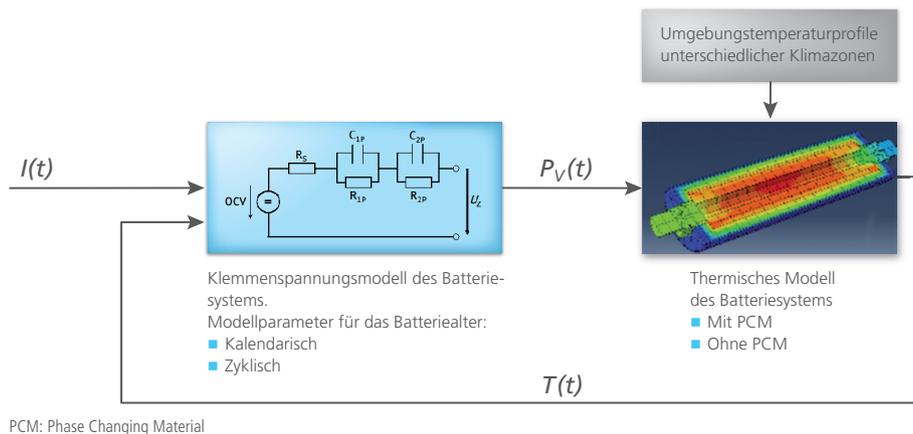
Im Zuge der Entwicklung war es erforderlich, das BMS frühzeitig im Fahrversuch zu testen, um insbesondere die Betriebsstrategie im Zusammenspiel mit dem Energiemanagement (EM)-System des Fahrzeugs zu überprüfen und anzupassen sowie Klimatests durchzuführen. Als BMS-Steuergerät kommt das Rapid-Control-Prototyping (RCP)-System dSPACE MicroAutoBox zum Einsatz. Der modellbasiert entwickelte Regelalgorithmus kann vom Entwicklungsrechner direkt auf die MicroAutoBox geladen und dort ausgeführt werden. Die MicroAutoBox ist mit dem EM-System verbunden. Für die Auswertungen auf Zellebene sorgt die in der Batterie verbaute Elektronik. Sie enthält ebenfalls eine Aktuatorik für die Zellsymmetrierung. Des Weiteren sind Leistungshalbleiter zur Ladestrombegrenzung und DC-DC-Wandler zur SOH-Bestimmung verbaut. Die Kommunikation erfolgt über ein Serial Peripheral Interface (SPI)/Inter-Integrated Circuit (I<sup>2</sup>C). Die MicroAutoBox ist hier über ein dSPACE Programmable Generic Interface (PGI) angebunden. Dieser Aufbau ist geeignet, die Li-Ion-Starterbatterie sowohl im Fahrzeug als auch im Labor zu betreiben. Zum Einbau in das Fahrzeug muss lediglich die serienmäßige Starterbatterie gegen den Li-Ion-Batterie-Demonstrator getauscht und die MicroAutoBox mit dem LIN-Fahrzeugbus und der Batterie verbunden werden. Der

Prinzipieller Aufbau eines 12-Volt-Lithium-Ionen-Multizellen-Batteriesystems.



Das BMS für die 12-Volt-Li-Ion-Starterbatterie führt sehr vielfältige Aufgaben aus.





Kopplung eines Klemmspannungsmodells mit einem elektrothermischen FEM-Modell zur Lebensdauervorhersage des Batteriesystems.

„Das Kompetenzthema Batterie erhält durch die Li-Ion-Starterbatterie eine neue Ausprägung. Und dank der dSPACE MicroAutoBox ist sie schon auf der Straße erfahrbar.“

Dipl.-Ing. (TU) David Vergossen, Audi Electronics Venture GmbH

Laborbetrieb ist auch ohne Anschluss an den Fahrzeugbus möglich.

### Spezielle Funktionen des BMS und der Batterie

Für den optimalen Betrieb der Li-Ion-Starterbatterie und zur Vermeidung vorschneller Alterung wird eine Ladestrombegrenzung durchgeführt. Dazu regeln Leistungstransistoren den Strom linear. Im Versuchsaufbau wird die parasitäre Wärme der Leistungshalbleiter zur Erwärmung der Batterie genutzt, damit sie bei tiefen

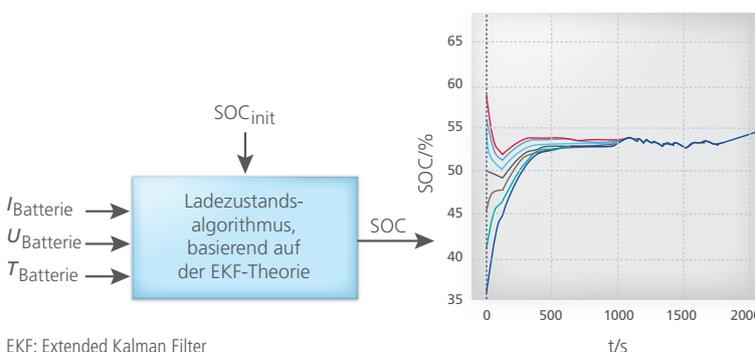
Temperaturen besser Ladung aufnehmen kann. Die Transistoren sind daher an verschiedenen wärmetechnisch günstigen Stellen in der Batterie verbaut. Über die integrierte Elektronik wird kontinuierlich die Temperatur der Batterie gemessen. Der hohe technische Aufwand ist nur im Rahmen der Vorentwicklung vertretbar.

### Das BMS in der Praxiserprobung

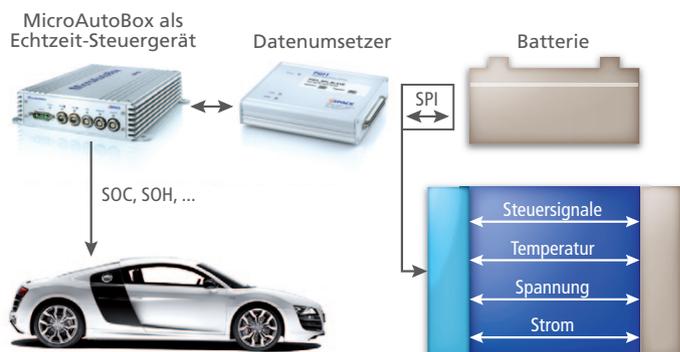
Der Batterie-Demonstrator samt MicroAutoBox befindet sich in der

Erprobungsphase. Neben Fahrversuchen werden auch Tests auf einem klimatisierten Rollenprüfstand durchgeführt. Die Batterie kann sowohl mit Regler und somit Wärmezufuhr als auch ohne Regler betrieben werden. Aus diesen Tests ergeben sich wichtige Erkenntnisse, die zur weiteren Optimierung der Regelalgorithmen beitragen.

Die erzielten Ergebnisse zeigen, dass eine Li-Ion-Starterbatterie inkl. BMS einen adäquaten Ersatz für eine Blei-Säure-Batterie darstellen kann. Ihre



Entwicklung eines Ladezustandsalgorithmus. Die Signalverläufe zeigen die SOC-Adaptierung bei unterschiedlich großen Fehlinitialisierungen.



Die Praxiserprobung der Simulationsergebnisse im Fahrversuch mit der MicroAutoBox. Durch die sofortige Echtzeit-Fahrzeugerprobung werden kurze Software-Entwicklungszyklen erreicht.

deutlich höhere Zyklenfestigkeit erfüllt die Anforderungen des Start-Stopp-Betriebs bei niedrigerem Gewicht, jedoch derzeit noch wesentlich höheren Kosten. Auf die mit dem RCP-System gewonnenen

Erfahrungen kann bei einer möglichen Serienentwicklung zurückgegriffen werden. ■

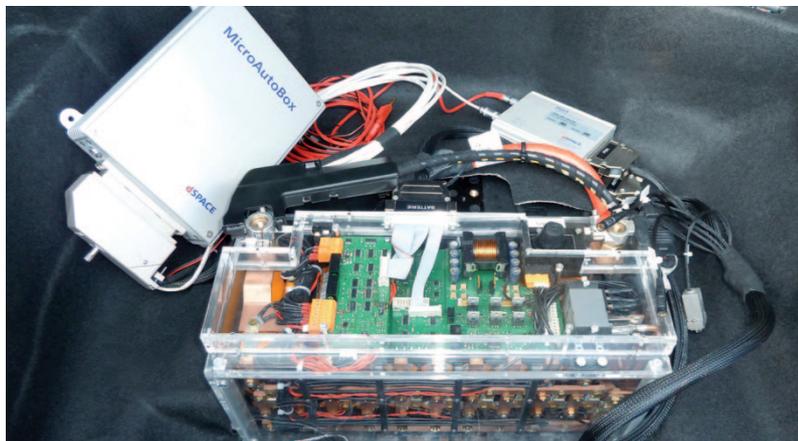
*Dipl.-Ing. (TU) David Vergossen  
Audi Electronics Venture GmbH, AEV*

### Danksagung

Das diesem Beitrag zugrunde liegende Vorhaben E<sup>3</sup>Car (Nanoelectronics for an Energy Efficient Electrical Car – AEV-Teilvorhaben: Erforschung eines neuartigen Algorithmus zur Zustandserkennung bei Lithium-Ionen-Batterien) wird mit Mitteln des Bundes-

ministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) und der EU (ENIAC JU Project) unter den Kennzeichen 13N10395 (BMBF) bzw. 120001 (ENIAC) gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt allein bei den Autoren.

Im Fahrzeug ersetzt die Li-Ion-Batterie die herkömmliche Starterbatterie, hier in der Ersatzradmulde.



## Zusammenfassung

Im Rahmen eines BMBF/ENIAC-Forschungsvorhabens wurde der Einsatz einer Lithium-Ionen-Starterbatterie untersucht. Ziel des Projektes war es, einen zyklenfesteren, leichteren Ersatz für die Blei-Säure-Starterbatterie zu erforschen. Im Rahmen der Entwicklungen entstanden ein Batterie-Demonstrator und eine BMS-Algorithmik. Zur Sicherstellung der zuverlässigen Funktion wurden grundlegende Untersuchungen durchgeführt:

- Modellierung der verwendeten Zellen
- Modellierung der gesamten Batterie
- Entwicklung der Batterieelektronik
- Betriebsstrategie der Batterie
- Auslegung der Kapazität bezüglich Alterung, Startfähigkeit, Ruhestrom, Zyklierung
- SOC-Bestimmung mit Alterungsadaption (SOH)
- Thermische Simulation
- Auslegung der Stromschienen und Kontaktierungstechnik

Die prototypische Umsetzung erfolgte mit der dSPACE MicroAutoBox. Sie dient sowohl im Laborversuch als auch im Fahrversuch als Steuergerät und unterstützt so die schnelle Funktionsentwicklung. Erste Tests der neuen Batterie und der BMS-Software liefern überzeugende Ergebnisse.

*David Vergossen  
Dipl.-Ing. (TU) David Vergossen ist Projektleiter für die Li-Ion-Starterbatterie bei der Audi Electronics Venture GmbH in Ingolstadt, Deutschland.*

