



LITHIUM-IONEN-BATTERIE HOCHINTEGRIERTES MODUL ALS SYSTEMGRUNDLAGE

Entwickler einer neuartigen Lithium-Ionen-Batterie für E-Fahrzeuge haben die Fertigung von großen Stückzahlen im Blick. Akasol entschied sich unter anderem deswegen für einen modularen Aufbau: Der Energiespeicher verfügt nur noch über einen Plus- und einen Minuspol, einen Datenstecker und Anschlüsse zur Verbindung mit Kühlschläuchen. Statt „Hunderte von Zellen“ erst in einem Gesamtsystemgehäuse mechanisch, elektrisch und thermisch zu verbinden, stehen dem Systemdesigner validierte und im Fertigungsprozess vorgetestete Module zur Verfügung, die mit wenigen Schritten zum System verbunden werden können. Jedes Modul wird mit Flüssigkeit gekühlt. Das spart Volumen, galt aber bisher als aufwändig. Auch hier hat Akasol fertigungsgerecht vereinfacht.

AUTOREN



FELIX VON BORCK

ist Geschäftsführer der Akasol Engineering GmbH in Darmstadt.



DR.-ING. BJOERN EBERLEH

ist Leiter Forschung bei der Akasol Engineering GmbH in Darmstadt.



STEPHEN RAISER

ist Entwicklungsleiter der Akasol Engineering GmbH in Darmstadt.

FERTIGUNG IM FOKUS

Gewicht, Leistung, Energie in Verbindung mit Sicherheit, Zuverlässigkeit und Kosten: das sind die entscheidenden Parameter, an denen sich Batteriesysteme messen lassen müssen. Der Nachweis der wirtschaftlichen Machbarkeit einer großen und sicheren Antriebsbatterie steht weiterhin aus, was die Marktreife von Elektrofahrzeugen heute noch entscheidend bremst [1]. Eine Herkulesaufgabe, der sich die Akasol Engineering GmbH stellt, mit dem Ziel eines kurzfristigen Einstiegs in die Fertigung von Batteriesystemen. Das Unternehmen baut auf der 20-jährigen Erfahrung im Bereich von Forschung und Elektrofahrzeugentwicklung auf, die anfangs im Akasol e.V. und im damaligen Forschungsverbund mit der TU Darmstadt erarbeitet wurde. Akasol Engineering gehört heute der Schulz Group, einem traditionellem Automobilzulieferer, und verfügt somit unter anderem über das erforderliche Fertigungs-Know-how und Expertisen in der Produktionsplanung.

DIE ZELLCHEMIE MUSS STIMMEN


Grundsätzlich werden heute in Neuentwicklungen von Traktionsbatterien Zellen auf Lithium-Ionen-Basis verwendet. Die Vorteile gegenüber anderen Zellchemien sind viel diskutiert und unbestritten. Dennoch gilt es strenge Regeln zu beachten, die vor allem die Sicherheit aber auch ein fertigungsgerechtes Design sowie flexible, kundenspezifische Lösungen gewährleisten. Entscheidet man sich beispielsweise im Laufe einer Entwicklung und Optimierung für eine neue Zellchemie, sollten die resultierenden Änderungen im bestehenden Gesamtkonzept der Batterie möglichst einfach umsetzbar sein.

Die Basis eines Batteriesystems stellt immer die Einzelzelle mit der zugrunde liegenden Elektrochemie und dem Zeldesign. Nur bei detaillierten Kenntnissen der Möglichkeiten und Grenzen auf Zellebene gelingt ein optimales übergeordnetes Design. Mit einer Vielzahl an Parametern kann gestaltet werden: die Zusammensetzung der Aktivmaterialien auf Anoden- und Kathodenseite, die Wahl des Elektrolyten und dessen Zusatzstoffe, der Separator-Typ oder die Stärke der metallischen Trägerfolien.

Wichtige grundsätzliche Entscheidungen sind hier zu treffen. So lässt sich zum

Beispiel über die Wahl des Kathodenmaterials unter anderem die Energiedichte und Temperaturbeständigkeit der Zelle beeinflussen. Hier gilt es jeweils, eine optimal auf die Fahrzeuganforderungen zugeschnittene Balance zu wählen. Beispielsweise: Eine Zellauslegung auf hohe Temperaturen erfüllt möglicherweise die Leistungsanforderungen bei tiefen Temperaturen nicht mehr, eine für tiefe Temperaturen optimierte Zelle hingegen altert bei hohen Temperaturen zu schnell. Manche Defizite in der Zellchemie können bei der Systemauslegung mit wenig Aufwand kompensiert werden. Zum Beispiel erlaubt eine effiziente Batteriekühlung den Einsatz von Zellen, die bei hohen Temperaturen zu schnell altern würden. Nur in der Zusammenarbeit zwischen Zellspezialisten und Spezialisten in den Bereichen Modul-, System- und Fahrzeugdesign lassen sich hier optimale Lösungen finden.

VON DER ZELLE ZUM MODUL

Eine einzelne Zelle ist zur Verwendung im Fahrzeug beziehungsweise beim Systemaufbau nicht besonders hilfreich. Vorteilhaft ist es, die Zellen in Module zu integrieren, die noch einfach handhabbar sind und eine niedrige Spannung aufweisen (< 60 V DC). Solche Module sollten dabei bereits einen möglichst hohen Funktionsanteil des Systems abdecken und gleichzeitig die Leistungsdaten der Zelle möglichst wenig verschlechtern. Das heißt, der volumetrische und gravimetrische Mehraufwand muss möglichst gering sein. Bei der Zellauswahl lässt sich eine bevorzugte Chemie in den verschiedensten Formen verpacken: von der bekannten kleinen Rundzelle über großformatige runde oder prismatische Zellen bis hin zu den Pouch-Zellen ist alles möglich und wird für den Fahrzeugeinsatz untersucht [2].  zeigt eine Pouchzelle, auch Coffee-Bag oder Beutelzellen genannt. Dieses Zellen-Design zeichnet sich durch das einfachste Gehäuse aus. Die Aktivteile der Zelle werden lediglich in eine spezielle Folie eingeschweißt und evakuiert. Das bringt Vorteile beim Gewicht und bei der Kühlung, erfordert aber eine robuste übergeordnete Konstruktion, um diese Zellen mit ihrem relativ empfindlichen Äußeren zu schützen, mechanisch zu halten und elektrisch zu kontaktieren.

Das von Akasol Engineering entwickelte Modulkonzept integriert typischer-

weise zwölf Einzelzellen in variabler interner elektrischer Verschaltung (seriell/parallel). Die relativ empfindlichen Pouch-Zellen werden mechanisch geschützt und vibrationssicher gehalten, die Zellen werden thermisch an ein Kühlfluid angebunden und gleichzeitig elektrisch isoliert. Ein im Modul integrierter Batteriemangement-Slave (BMS) überwacht die Zellspannungen und Temperaturen an den kritischen Stellen. Diese Daten werden über einen CAN-Bus (oder alternativ über LIN) an einen übergeordneten Batteriemangement-Master (BMM) weitergegeben. Auf Anforderung von diesem Master werden Ladungsunterschiede der Zellen innerhalb eines Systems ausgeglichen.

Nach außen hat ein derartig integriertes Modul, ②, nur noch den elektrischen Leistungsanschluss (Pluspol und Minuspol), einen Datenstecker (CAN/LIN) und Anschlüsse zur Verbindung mit Kühlschläuchen. Damit wird der Systemaufbau extrem vereinfacht: Statt „Hunderte von Zellen“ erst in einem Gesamtsystemgehäuse mechanisch, elektrisch und thermisch zu verbinden, stehen dem Systemdesigner validierte und im Fertigungsprozess vorgetestete Module zur Verfügung, die mit wenigen Schritten in der Systemherstellung verbunden werden können.

Beim Vergleich von heute bekannten Modulkonzepten ist genau zu unterscheiden, welche Funktionstiefe im Modul integriert ist. Bei Akasol setzt man zum Beispiel konsequent auf die integrierte Flüssigkeitskühlung (Wasser/Glykol, wie im Automobilbau üblich). Einige Wettbewerber setzen auf die Luftkühlung ihrer Module. Manche kühlen die Module nicht individuell sondern versuchen, dies über externe Wärmetauscher großflächig auf Systemebene zu realisieren.

Die Fluidkühlung bietet im Vergleich zur Luftkühlung erhebliche volumetrische Vorteile und kann einfach an übliche fahrzeugseitige Kühlsysteme angebunden werden. Im Modulbereich ist diese Lösung konstruktiv in der Regel komplexer, da ein fluidführendes System zuverlässig dicht und mit gutem und wiederholbarem Wärmeübergang an die Zellen angebunden werden muss. Das Akasol-Modul bietet hier über eine geschickte Kombination von Gehäuse- und Kühlstruktur eine sehr kompakte und leichtgewichtige Lösung.



① Pouch-Zelle Akasol

Energiedichte	163 Wh/kg
Chemie	Lithium-Ionen NMC
Kapazität	53 Ah
Gewicht	1,2 kg
Leistung nom.	1,0 kW
Leistung max. (10 Sek.)	1,5 kW
Entladetemperatur	-20 °C bis +60 °C
Ladetemperatur	-10 °C bis +50 °C



② Batteriemodul Akasol

Energiedichte	134 Wh/kg, 240 Wh/l
Energie	2,3 kWh
Gewicht	17,5 kg
Leistung nom.	12 kW
Leistung max. (10 Sek.)	18 kW
Abmessungen	260 x 230 x 160 mm
Kapazität	106 Ah / 53 Ah
Spannung	22,2 V / 44,4 V

Bei deren Entwicklung stand insbesondere auch das Potenzial zu einer Herstellbarkeit in sehr großen Stückzahlen im Vordergrund. Auch die Integration des BMS in das Modul hinein setzt Maßstäbe. Sehr genaue und gleichzeitig bei Bedarf dynamische Messungen von Spannung und Echtzeit-Impedanz sowie Temperatur werden auf kleinstem Bauraum angebunden. Dafür ist keine einzige modulinterne Kabelverbindung notwendig. Die Genauigkeit der Spannungsmessung ist so hoch, dass der Ladezustand jeder einzelnen Zelle im Ruhezustand mit weniger als 1 % Unsicherheit ermittelt werden kann, während sich durch die Impedanzanalyse Zellfehler und Zellalterung frühzeitig detektieren lassen.

Trotz der extrem hohen Funktionsintegration auf Modulebene erreichen die von Akasol derzeit gefertigten Module Energiedichten von bis zu 140 Wh/kg. Dieser Wert wäre noch vor wenigen Jahren sogar auf Zellebene als hervorragend bewertet worden. Diese Energiedichte bietet beste Voraussetzungen für den Bau kompakter und leichtgewichtiger Systeme. Trotz der hohen Energiedichte ist es möglich, gleichzeitig eine sehr hohe Leistung abzurufen:

Das komplette Modul kann von Standardbedingungen ausgehend mit einer 5C-Rate komplett entladen werden, ohne irgendwo zu überhitzen, ③. Das entspricht einer Fahrt mit einem Fahrzeug, bei der innerhalb von zwölf Minuten unter Volllast die Batterie komplett entladen wird. Auch wenn diese Situation in der Praxis selten auftreten dürfte, so ist doch die Konstruktion mit dieser Fähigkeit entsprechend robust ausgelegt.

VOM MODUL ZUM SYSTEM

Je umfangreicher die im Modul vorintegrierten Funktionalitäten sind, desto einfacher gestalten sich Design und Fertigung des ins Fahrzeug zu integrierenden Batteriesystems. Bei der genannten Vorintegration der Akasol-Module kann der Systemdesigner auf Lösungen mit garantierter Funktionalität und Leistung auf Zell- und Modulebene zurückgreifen und sich auf die speziellen Systemanforderungen konzentrieren.

Der Systemtrog muss entsprechend der Vorgaben aus dem Fahrzeugpackage entworfen werden. Er bietet damit einen weiteren Crash-Schutz für die bereits

robusten Module. Außerdem entkoppelt der Systemtrog die Module thermisch von der Umgebungstemperatur (Isolation). Ein BMM-Steuergerät wertet die batterie- und fahrzeugseitigen Daten aus und aktiviert zum Beispiel bei Störfällen Trennschütze an den elektrischen Systempolen. Außerdem steuert dieses Batteriemangement die Aktuatoren (Pumpen, Ventile, Lüfter) des thermischen Systems. Im einfachsten Fall befindet sich im Fahrzeug ein Radiator mit Lüfter, der überschüssige Wärme der Batterie an die Umgebung abgeben kann. Beim Einsatz in sehr kalter Umgebung kann ein zusätzliches Heizelement für die Batterie erforderlich sein, das die Batterietemperatur über einem Mindestwert hält und

so eine Verfügbarkeit auch im Winterbetrieb sicherstellt. Sicherheitsrelevante Komponenten wie Trennstecker für den Servicetechniker oder Sicherungen im Strompfad vervollständigen das Systemdesign, ④.

SICHERHEIT

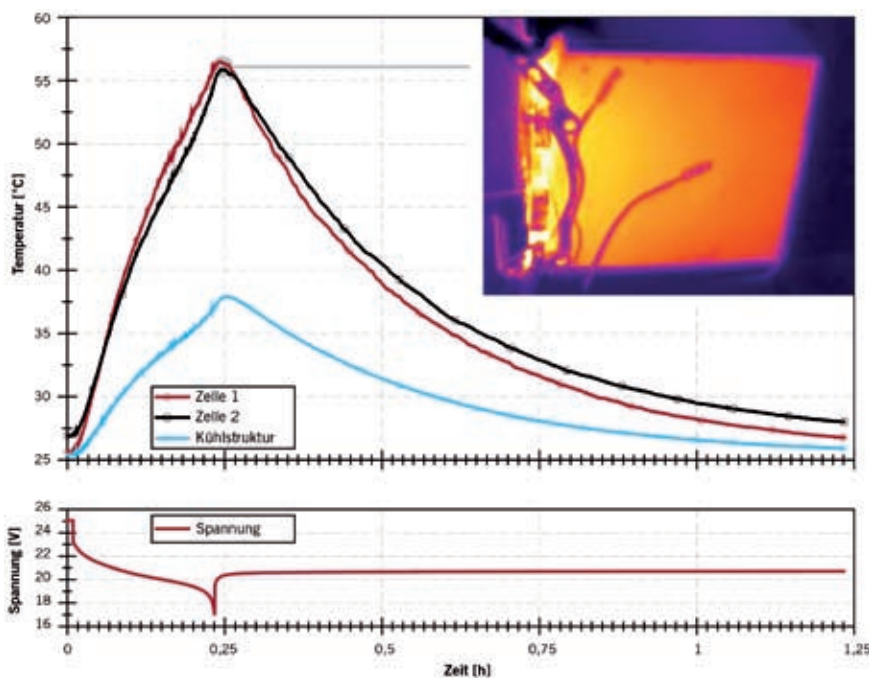
An die Sicherheit stellt die Automobilindustrie hohe Anforderungen, denn zweifelsfrei hängt die Akzeptanz der Endkunden für Elektrofahrzeuge maßgeblich von einem dauerhaft störungsfreien Betrieb ab. Für Batterieentwickler beginnt die Sicherheit daher bereits bei der Zellchemie, wo bevorzugt inhärent sichere Materialien eingesetzt werden [3]. Der

Grund: ein Sicherheitstestkriterium, das bereits auf Zellebene erfüllt wird, muss günstigstenfalls nicht mehr auf Modul- oder Systemebene konstruktiv berücksichtigt werden und erleichtert somit das Design und die Validierung in den übergeordneten Bereichen. So sind dann auch Mehrkosten auf Zellebene beispielsweise für spezielle Separatormaterialien mit thermischem Shut-Down oder mit Keramikanteilen zu rechtfertigen.

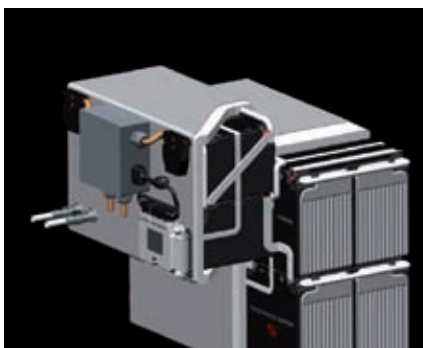
Auf Modulebene erfolgt eine erhebliche Verbesserung der mechanischen Robustheit und eine sichere elektrische Isolation. Außerdem ist im Akasol-Modul der dezentrale Teil des Batteriemangements zur Überwachung integriert. Im Gesamtsystem stellt die Überwachung jeder einzelnen Zelle einen zentralen Sicherheitsaspekt dar: Das Batteriemangement kennt zu jedem Zeitpunkt Werte wie Stromstärke, Spannungen sowie Temperaturen und Ladezustand. Das ist nicht nur ein wichtiger Baustein zum Ausschluss einer gravierenden Störung, sondern auch entscheidend für eine lange Lebensdauer. Denn die Kontrolle schützt die Batterie einerseits vor einer zu starken Entladung (Tiefentladung mit Folgeschäden), Überhitzung oder Überladung. Andererseits stellt das Management die Regelparameter für die Temperierung und die günstigste Betriebssteuerung zur Verfügung.

Einen weiteren sicherheitsrelevanten Aspekt stellt das Batteriesystem als Einheit dar: Ein crashgeschütztes und robustes Systempackage sorgt dafür, dass die Module und Zellen selbst einen Unfall in der Regel unbeschadet überstehen. Sicherheitsvorrichtungen wie Hauptschütze oder Sicherungen im System sorgen im Extremfall für eine Abschaltung von externen Spannungen oder Überströmen. Die Integrität der elektrischen Isolation wird im Betrieb vom BMM laufend überwacht.

Entsprechend der existierenden und sich derzeit entwickelnden Standards führen die Ingenieure umfangreiche Sicherheitstests durch, die die gesamte Entwicklungsdauer begleiten und deren Ergebnisse in die Weiterentwicklung einfließen. Diese Tests umfassen zum Beispiel Überladung oder Kurzschluss tests. Andere Tests setzen die Batterien der Einwirkung von Nägeln, ⑤, hydraulischen Pressen oder von Feuer aus.

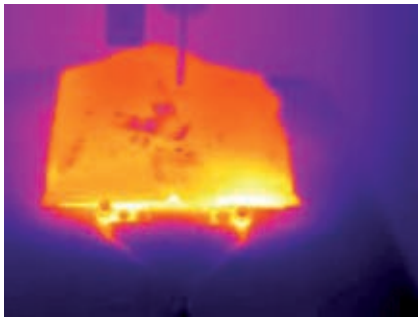


③ Temperaturen im Modul bei einer Vollentladung mit 5C

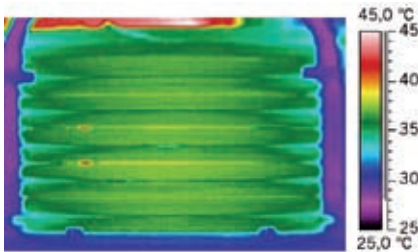


④ Exemplarische Systemgruppierung mit 16 Modulen

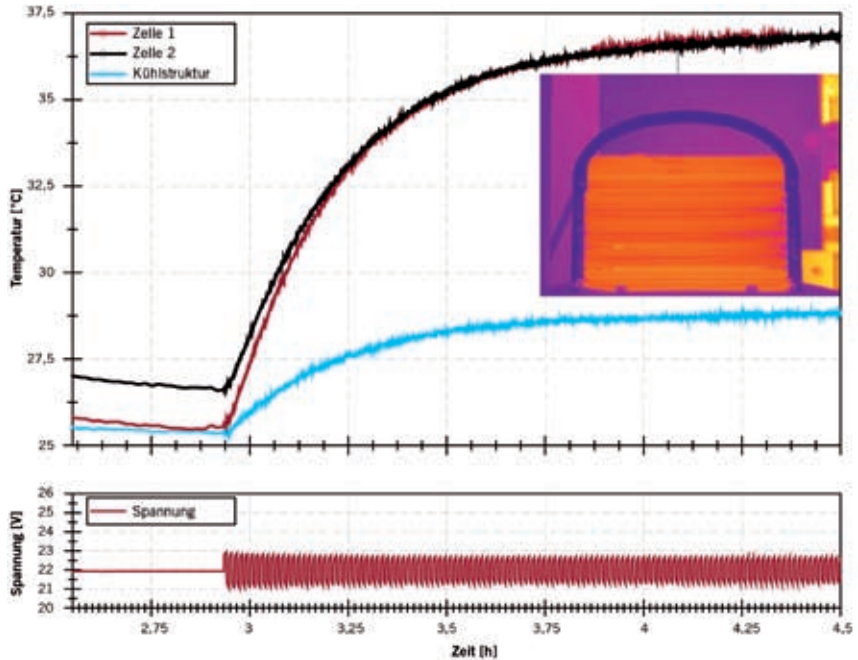
Energiedichte	122 Wh/kg, 180 Wh/l
Energie	37,6 kWh
Gewicht	308 kg
Leistung nom.	192 kW
Leistung max. (10 Sek.)	288 kW
Abmessungen	672 x 741 x 608 mm
Kapazität	106 Ah / 53 Ah
Spannung	355 V / 710 V



5 Pouch-Zelle beim Nageltest (Thermographie)



6 Thermischer Gleichlauf der Einzelzellen innerhalb eines Moduls



7 Temperaturverlauf der Zelltemperaturen im Modul bei 2C-Dauerlast

THERMOMANAGEMENT

Noch sind die auf dem Markt verfügbaren Lithium-Ionen-Zellen nicht ideal in Bezug auf ihr Temperaturverhalten. Und wahrscheinlich werden diese Einschränkungen auf Zellebene auch mittel- und langfristig nicht alle gelöst werden können. Zu tiefe Temperaturen reduzieren die Leistungsfähigkeit drastisch, zu hohe Temperaturen beschleunigen die Alterung oder führen gar zu thermischer Schädigung der Zellen. Auf der anderen Seite fordert der Fahrzeugnutzer eine Verfügbarkeit des Fahrzeuges sowohl bei Sommer- als auch bei Winterbetrieb, und die Lebensdauer der Zellen soll im Idealfall der Fahrzeuglebensdauer entsprechen oder diese übersteigen.

In diesem Zusammenhang kommt dem thermischen Management eine bedeutende Aufgabe zu: Durch eine optimale Konstruktion und Steuerung hält es die Temperatur im gesamten Batteriesystem im günstigen Bereich. Unterschiede in der Temperatur von Einzelzellen werden ausgeglichen oder treten gar nicht erst auf, 6.

Die thermische Anbindung des Kühlfluids an die Zelle ist in dem Akasol-Modul so gut, dass beim Einsatz in gemäßigten Klimazonen und bei typischer Benutzung eines Elektrofahrzeugs eine Anbindung an die Fahrzeugklimaanlage nicht zwingend

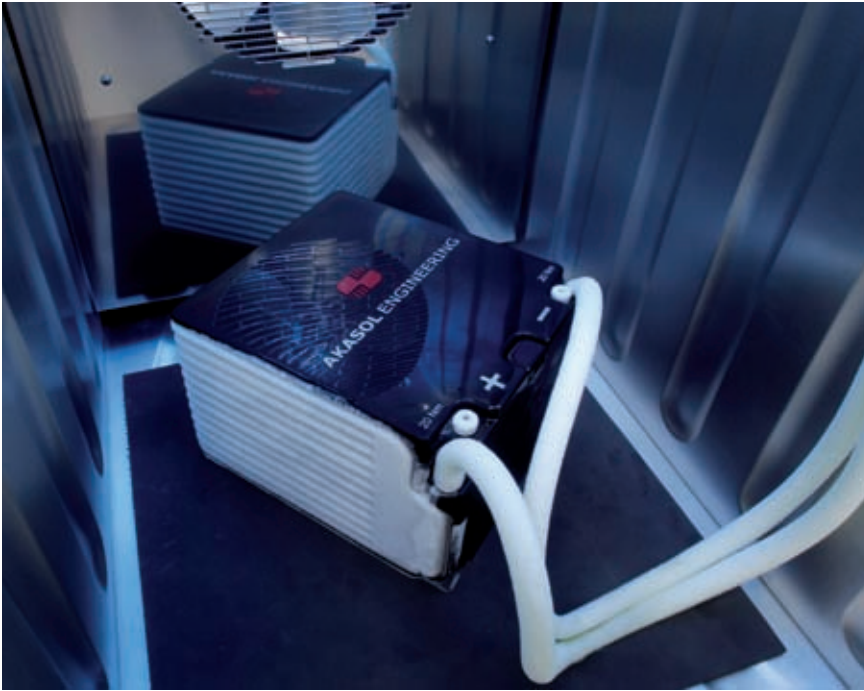
erforderlich ist. Das spart konstruktiven Systemaufwand sowie elektrische Energie und erhöht somit den Wirkungsgrad des Batteriesystems. Denn schnell wird der eigentlich sehr gute energetische Wirkungsgrad einer Lithium-Ionen-Batterie durch eine häufig laufende Batterieconditionierung (wie durch eine elektrische Klimaanlage) drastisch reduziert. Die alternative Kühlung über einen einfachen Radiator mit einem kleinen Lüfter, der eventuell die kühlere Umgebungsluft in den Nachtstunden ausnutzt, kann mit sehr wenig Energie den gleichen Effekt erzielen – vorausgesetzt, die Zellen sind entsprechend gut an das Kühlfluid angebunden. Selbst bei intensiver Nutzung der Batterie (permanentes Laden und Entladen mit 2C) weicht die Zelltemperatur in dem Akasol-Modul an der wärmsten Stelle nur um zirka 12,5 °C von der Temperatur des Fluids ab, 7.

Damit ist ein intelligentes Thermomanagement in der Lage, den Alterungsprozess der Batteriechemie zu verlangsamen und damit die Lebensdauer und Zyklusfestigkeit der Batteriezelle zu erhöhen. Zudem lässt sich die Batterie bei voller Leistungsfähigkeit ständig betriebsbereit halten. Allerdings: Auch das beste thermische Management verbraucht noch elektrische Energie. Um diesen Bedarf weiter zu mini-

mieren, prüfen die Entwicklungsingenieure der Akasol in umfangreichen Testreihen den maximalen Temperaturbereich, in dem die Zellen noch ohne Leistungsreduktion eingesetzt werden können und arbeiten mit Zellchemiespezialisten an Verbesserungen, 8. Nächste Entwicklungsschritte stellen eine Erweiterung des nutzbaren Bereichs der Arbeitstemperatur der Zellen in Aussicht, womit mehr Energie für die Traktion zur Verfügung steht. Auf diesem Weg wird sich der Systemwirkungsgrad noch stärker an den Wirkungsgrad des Moduls annähern. Das Akasol-Modul erreicht heute selbst bei dynamischer Nutzung des Fahrzeugs energetische Wirkungsgrade von über 95 %.

SERIENPRODUKTION UND ZELLKOSTEN

Während derzeit weltweit Anlagen zur Fertigung von Zellen in erheblichen Stückzahlen entstehen, muss gleichzeitig an die Fertigungseinrichtungen für die Module und Systeme gedacht werden. Die erforderlichen Stückzahlen sind hoch: Bei 96 Zellen in einem typischen kleinen Pendlerfahrzeug, verteilt auf acht Module à zwölf Zellen, sind bereits bei einer Produktion von nur 10.000 Fahrzeugen im Jahr rund eine Million Zellen notwendig,



8 Modul beim Kältetest

verbaut in 2500 Modulen. Angesichts der Stückzahlankündigungen aus der Politik (Ziel für Deutschland: eine Million E-Fahrzeuge bis 2020) wird deutlich, dass nur über den raschen Aufbau automatisierter Massenfertigungsanlagen solche Szenarien erfüllbar sind. Als Teil der Schulz Group, deren Schwerpunkt die Fertigungsplanung im Automotive-Bereich ist, hat Akasol frühzeitig in diesem Bereich Allianzen geschaffen und Kernkompetenzen entwickelt. Bereits die aktuelle Modulgeneration wurde in Abstimmung mit

Experten aus dem Bereich der Entwicklung von Anlagen zur Serienproduktion entworfen. Entsprechend der Nachfrage können vergleichsweise kurzfristig Kapazitäten zur Produktion von ersten Serien aufgebaut werden. Die Entwicklung der nächsten Modulgeneration wurde bereits gestartet. Nach den sehr guten Performance-Daten der aktuellen Generation liegt jetzt der Schwerpunkt bei der Serienfertigkeit sowie dem Qualitätsmanagement und den Kosten. Der Löwenanteil der Kostenreduktion muss allerdings von

den Zellen kommen – noch immer sind die großformatigen Elektrofahrzeugzellen mit rund 500 Dollar/kWh erheblich teurer als die in riesigen Stückzahlen hergestellten Rundzellen für die Konsumentenindustrie (< 250 Dollar/kWh). Diese Differenz wird allerdings im Zuge steigender Stückzahlen von großformatigen Zellen sukzessive sinken. Dann steht einer elektrischen Revolution auf der Straße eigentlich nichts mehr im Weg.

LITERATURHINWEISE

- [1] Teuschl, G.: Hybrid- und Elektrofahrzeuge: Dimensionierung und Integration von Energiespeichern. In: ATZ 111 (2009), Nr. 6, S. 434-441
 [2] Wiebelt, A.; Isermeyer, T.; Siebrecht, T.; Heckenberger, T.: Thermomanagement von Lithium-Ionen-Batterien. In: ATZ 111 (2009), Nr. 8, S. 500-505
 [3] Conte, F.V.: Sicherheitsrelevantes Design von Lithium – Ionen – Batterien. In: ATZelektronik 4 (2009), Nr. 1, S. 12-19



DOWNLOAD DES BEITRAGS
www.ATZonline.de



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE
 order your test issue now:
SpringerAutomotive@abo-service.info

scienlab
 electronic systems

Durchgängige Prüftechnik für den elektrifizierten Antriebsstrang

- Energiespeichertest Zellen / Module / Packs
- Batterie- & Maschinen-Emulatoren
- Wechselrichter-Testsysteme
- BMS - HiL-Testumgebung
- End-of-Line-Test

Die Zukunft ist elektrisch.
 Wir haben die Technik, sie zu entwickeln.