

/// 8. BATTERIETECHNIK

LITHIUM-IONEN-BATTERIEN

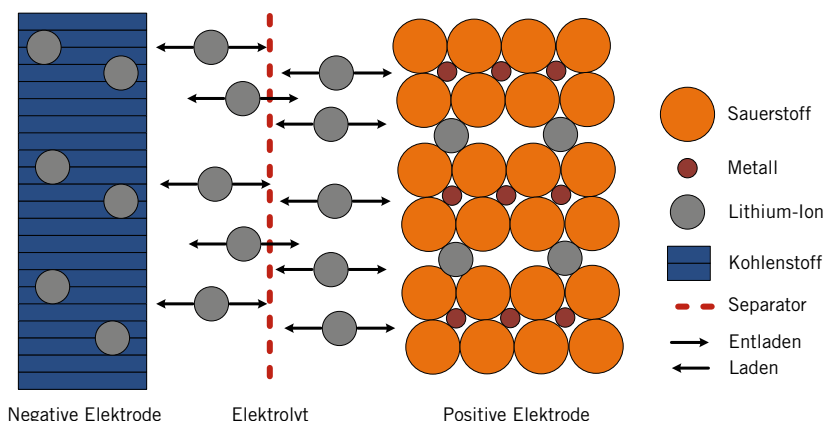
Wie in Folge 7 dieser Reihe dargelegt, ist die Lithium-Ionen-Batterietechnik mit ihrer Vielzahl von Materialkombinationen heute die Basis für die meisten modernen Konzepte zur Elektrifizierung des Antriebsstrangs von Fahrzeugen aller Art. Aufgrund ihrer hohen Energie- und Leistungsdichte sowie ihrer hohen Zellspannung gilt sie als erfolversprechende Technologie in Hybrid- und Elektrofahrzeugen, aber auch für Fahrzeugbordnetze mit gesteigerter Leistungsfähigkeit oder zwei Spannungsebenen (12 V/48 V). Den Betriebsbedingungen der Batterie sollte allerdings bei der Entwicklung eines Elektrofahrzeugs besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden, um eine möglichst zuverlässige, sichere und kostenoptimierte Auslegung zu ermöglichen. Das ist allein schon durch die hohen Kosten der Batterien dringend geboten. Im Folgenden wird das Grundprinzip der Lithium-Ionen-Batterietechnologie und deren Material-, Produkt- und Eigenschaftsvielfalt vorgestellt.

1 AUFBAU UND FUNKTIONSWEISE

Unter dem Begriff Lithium-Ionen-Batterie sind viele verschiedene Batterietechnologien zusammengefasst, die alle auf dem gleichen Funktionsprinzip beruhen. Wie in ❶ gezeigt, besteht eine Lithium-Ionen-Batterie wie alle Batterien aus zwei Elektroden, einem Separator und dem Elektrolyten. Lithium-Ionen-Batterien gehören zur Klasse der Interkalationsbatterien, bei denen beim Laden und Entladen der Zelle Lithium-Ionen an der einen Elektrode ausgelagert werden, durch den Elektrolyten zur gegenüberliegenden Elektrode wandern und sich dort wieder in das Kristallgitter des Elektrodenmaterials einlagern. Da es sich hierbei um eine reine Ein- und Auslagerung der Lithium-Ionen in ein Kristallgitter handelt, bleiben die Kristallstrukturen erhalten. Das ermöglicht prinzipiell eine hohe Zyklenlebensdauer. Dieses Prinzip hat auch den Vorteil, dass Lithium nicht in seiner hochreaktiven metallischen Form vorkommt, wie das bei Lithium-Metall-Batterien der Fall ist. Hierdurch erhöhen sich Sicherheit und Lebensdauer, da sich das Lithium-Ion in fest definierte Gitterplätze einlagert.

Bei Lithium-Ionen-Batterien gilt die Konvention, die positive und negative Elektrode auch bei den Ladeprozessen entsprechend dem Entladefall als Kathode und Anode zu bezeichnen. Häufig besteht die Kathode in Lithium-Ionen-Batterien aus einem Metalloxid, während die Anode aus einer Kohlenstoffmodifikation besteht, beispielsweise Graphit. Beide Elektroden sind hochporöse Strukturen, zusammengesetzt aus Einzelpartikeln der Aktivmaterialien sowie Binde- und Leitmaterialien. Sie weisen eine große Oberfläche auf, um dadurch eine hohe Reaktionsrate zu ermöglichen. Als Bindematerialien werden häufig verschiedene Formen von Polyvinylidenfluorid (PVDF) verwendet, als Leitmaterial oft Kohlenstoffe. Die Elektrodenmaterialien sind auf einer dünnen Metallfolie aufgetragen (Aluminium an der Kathode, Kupfer an der Anode), die gleichzeitig als Stromableiter dient. Als Elektrolyt wird ein Lithiumsalz in einem organischen Solvat gelöst, das bei den im Nennbetrieb auftretenden Potenzialen weitgehend stabil ist. Der Separator besteht in aller Regel aus einer porösen Polymerstruktur, die, wie auch die Elektroden, mit dem Elektrolyten getränkt ist.

Lithium-Ionen-Zellen werden handelsüblich in verschiedenen Bauformen angeboten. Man unterscheidet zwischen der sogenannten Pouch-Bag-Zelle sowie prismatischen und zylindrischen Zellen. Zellen all dieser Bauformen bestehen aus mehreren Lagen von Elektroden-Separator-Elektroden-Stapeln, wobei die Elektroden dann jeweils doppelseitig beschichtet sind. Im Falle der Pouch-Bag-Zelle werden diese Lagen übereinandergeschichtet, während sie in zylindrischen Zellen aufgewickelt werden. Prismatische Zellen werden sowohl mit gestapelten als auch mit gewickelten Elektroden angeboten. ❷ zeigt Zellen dieser verschiede-



❶ Schematischer Aufbau einer Lithium-Ionen-Batterie: auf der Anodenseite (negative Elektrode) das Graphit mit den einzelnen Graphenschichten, kathodenseitig (positive Elektrode) ein Lithium-metalloxyd; die Elektroden sind durch den Separator getrennt, der wiederum ebenso wie die porösen Elektroden mit Elektrolyt gefüllt ist; beim Entladen wandern Lithium-Ionen aus der Anode durch den Elektrolyt in die Kathode (frei nach [1])

nen Bauformen. Lithium-Ionen-Batterien gibt es sowohl mit hoher Energiedichte für moderate Stromstärken (beispielsweise für den Einsatz in Elektrofahrzeugen) als auch mit sehr hoher Leistungsdichte (etwa für Hybridfahrzeuge). Der innere Aufbau unterscheidet sich dabei im Wesentlichen durch die Beschichtungsdicke der Elektroden. Je dünner die Aktivmaterialien sind, desto höher ist die Leistungsdichte bei gleichzeitig abnehmender Energiedichte.

Der größte Unterschied zwischen den verschiedenen Lithium-Ionen-Batterietechnologien liegt allerdings in der Materialzusammensetzung der Elektroden. Auf der Kathodenseite kommen Materialien mit stark unterschiedlichen Eigenschaften zum Einsatz. Das älteste Material, von Sony in den 1990er-Jahren für die Unterhaltungs- und Haushaltselektronik am Markt eingeführt, ist Lithium-Cobalt-Oxid (LCO) mit einer vergleichsweise hohen Kapazität (das heißt hohen Energiedichte). Dieses weist allerdings wegen des hohen Kobaltgehalts einige Nachteile bei Kosten, Sicherheit und Umweltverträglichkeit auf. Somit sind die Hersteller bestrebt, den Kobaltanteil klein zu halten. Weitere in kommerziellen Batterien verwendete Materialien sind Lithium-Nickel-Oxid (LNO) oder Lithium-Mangan-Oxid (LMO). Auch LNO hat eine hohe Kapazität, allerdings eine geringere thermische Stabilität. LMO dagegen ist sehr stabil, hat aber den Nachteil, dass es sich bei Temperaturen über Raumniveau teilweise im Elektrolyten löst. Aus dem Bestreben, all diese Eigenschaften zu optimieren, sind beispielsweise die Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Technologie (NMC) und Elektroden aus Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium (NCA) her-

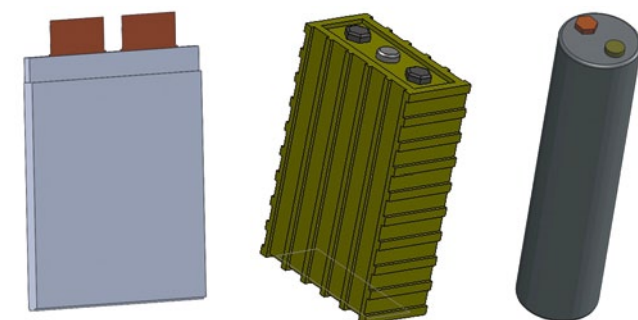
vorgegangen. Es sind Mixturen aus den vorher genannten Materialien, die beispielsweise im Falle von NMC je nach Zusammensetzung die Kapazität von LCO, die Sicherheit von LMO und die Kapazität und Leistungsfähigkeit von LNO vereinen.

Eine weitere verbreitete Technologie, die vor allem wegen ihrer Sicherheit für den Einsatz in Elektrofahrzeugen diskutiert wird, sind Kathoden auf Eisenphosphatbasis (LFP). Sie weisen zwar eine geringere Spannungslage sowie eine geringe gravimetrische Energiedichte auf, gelten aber dafür als sichere und günstige Technologie, da hier kein Kobalt zum Einsatz kommt.

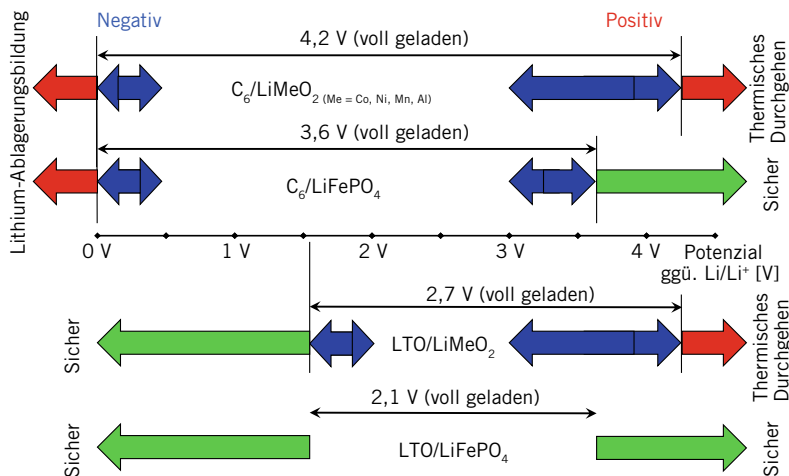
Auch auf Seiten der Anode gibt es Ansätze, um die Zelleigenschaften zu optimieren. Bei sogenannten LTO-Zellen wird anstelle von Kohlenstoff Lithiumtitanat verwendet. Dabei sinkt durch eine geringere Zellspannung die Energiedichte deutlich, es werden aber sehr hohe Leistungsdichten und Lebensdauern erreicht. Erste kommerzielle Serien auf Titanatbasis kommen derzeit auf den Markt. Des Weiteren werden für die negative Elektrode neben Kohlenstoff auch Modifikationen mit Siliziumanteilen entwickelt, die höhere Energiedichten ermöglichen. Reine siliziumbasierte Anoden befinden sich noch im Forschungsstadium. Sie haben den Vorteil einer theoretisch bis zu elf Mal höheren Energiedichte (nur auf die negative Elektrode bezogen). Das Problem liegt allerdings in der großen Volumenänderung des Materials von bis zu 400 % durch die Ein- und Auslagerung großer Lithiummengen. Dies führt zu höherer mechanischer Belastung des Materials und reduziert die Zyklenstabilität der Zellen erheblich.

❸ zeigt typische Spannungsbereiche der Elektrodenmaterialien und die sich ergebenden maximalen Zellspannungen bei verschiedenen Kombinationen. ❹ zeigt ebenfalls schematisch, bei welchem Spannungsniveau für die Stabilität, Lebensdauer und Sicherheit kritische Zustände erreicht werden, wenn diese definierten Spannungslimits überschritten werden.

Egal welche Materialkombination vorliegt, jede einzelne Lithium-Ionen-Zelle muss stets mit einer elektronischen Schutzschaltung betrieben werden, um Spannungsbereiche zu vermeiden, die dem Material schaden können, ❸. Bei einer Überladung der Zelle wird sich zum Beispiel der Elektrolyt zersetzen. Die Zelle beginnt dann Gas zu entwickeln und es kommt zum Ausfall der Zelle, im schlimmsten Fall zum Brand. Bei Lithium-Metall-Oxid-Kathodenmaterialien kann bei Überladung oder Temperaturen um 200 °C auch ein thermodynamisch instabiler Zustand erreicht werden (thermal runaway), bei dem sich das Material stark exotherm unter zusätzlicher Freisetzung von Sauerstoff zersetzt. Bei einer Tief-



❷ Verschiedene Zellgestaltungen: Pouch Bag (links), oft als Lithium-Polymer-Batterie bezeichnet, sowie prismatische (Mitte) und zylindrische Zelle (rechts)



3 Schematische Darstellung von Spannungslagen verschiedener Elektroden in Lithium-Ionen-Batterien und deren Stabilitätsbereiche: grün markiert Spannungsbereiche, in denen kein Sicherheitsrisiko besteht, rot markiert die sicherheitskritischen Bereiche

entladung kommt es bei einigen Kathoden zu irreversiblen Kapazitätsverlusten. Bei sehr niedrigen Ladezuständen besteht außerdem die Gefahr, dass es zur Auflösung der Stromableiter kommt, sich diese beim Wiederaufladen als fein verästelte Metallgebilde, sogenannte Metallendriten, wieder an die Elektrode anlagern und einen Kurzschluss erzeugen.

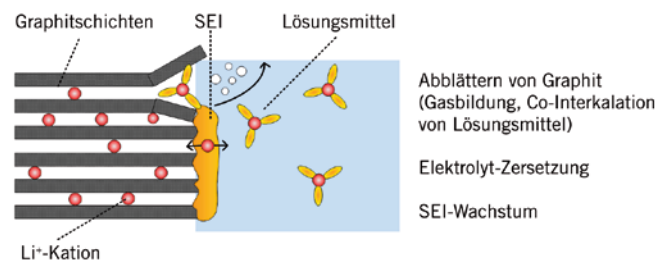
Lithium-Ionen-Batterien für die Unterhaltungs- und Haushalts-elektronik erreichen heute Energiedichten bis zu 240 Wh/kg. Die in Fahrzeugen eingesetzten Batterien liegen infolge höherer Sicherheits- und Lebensdauerausforderungen bei maximal 160 bis 180 Wh/kg. Basierend auf dem aktuellen Technologiekonzept scheinen in den kommenden Jahren allerdings Spitzenwerte bis 300 Wh/kg möglich. Die gravimetrischen Leistungsdichten liegen bei Elektrofahrzeugbatterien im Bereich von 500 W/kg und für Hybridfahrzeugbatterien bei 3000 W/kg. Alle Angaben beziehen sich dabei auf eine einzelne Zelle. Durch die Integration der Zellen zum Batteriepack sinken die Werte teilweise deutlich durch die notwendigen Kühl- und Batteriemanagementsysteme, Zellverbinder oder Gehäuse. Grundsätzlich können Lithium-Ionen-Batterien bei entsprechender Auslegung auch sehr hohe Ladeströme aufnehmen und sind damit schnellladefähig. Allerdings gilt dies nicht für tiefe Temperaturen. Im Bereich unter 0 °C kann es zu metallischen Lithiumablagerungen (Lithium Plating) kommen, ③, die zu einer beschleunigten Alterung und zu einer inneren Kurzschlussgefahr führen. Da die Produkte sehr unterschiedlich sensibel in Bezug auf Lithium Plating reagieren, muss die erlaubte Ladestromstärke in Abhängigkeit der Temperatur für jedes Produkt individuell bestimmt werden.

Um den hohen Anforderungen an die Energiedichte von Batterien in Elektrofahrzeugen gerecht zu werden, gibt es in der letzten Zeit vermehrt Bestrebungen, statt der Lithium-Ionen-Technologie Lithium-Metallelektroden einzusetzen. Mit Lithium-Metallelektroden erreicht man die höchsten Spannungen und Energiedichten. Im Gegensatz zu Lithium-Ionen-Batterien kann sich an einer Lithium-Metallelektrode das Lithium-Ion an beliebiger Stelle der Elektrodenoberfläche anlagern und zu Lithium reduzieren. Dieses neigt dann allerdings dazu, Dendriten zu erzeugen, die durch den Separator hindurchwachsen und einen Kurzschluss in der Zelle erzeugen können. Dieses Sicherheitsproblem hat bisher die Markteinführung größerer Zellen mit Lithium-Metallelektrode verhindert.

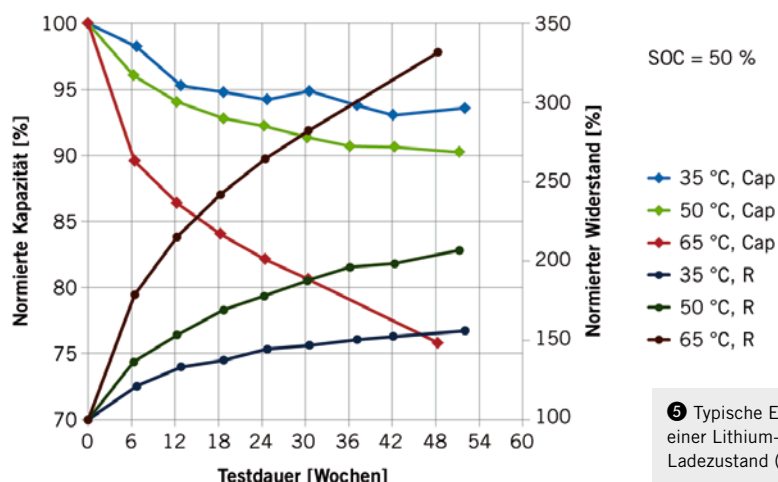
Neue Technologien, die im Zusammenhang mit einer Metallelektrode derzeit diskutiert werden, sind Lithium-Luft- (Li-O₂) und

Lithium-Schwefel-Batterien (Li-S). Mit Li-S erreicht man im Vergleich zu herkömmlichen Lithium-Ionen-Technologien theoretisch um den Faktor sieben höhere gravimetrische Energiedichten, mit Li-O₂ sogar um den Faktor neun. Weitere Vorteile dieser Konzepte sind beispielsweise, dass sich in Li-O₂-Batterien der Sauerstoff im geladenen Zustand nicht in der Batterie befindet und somit nicht zum Gewicht der Zelle beiträgt, und dass Schwefel in der Li-S-Batterie ein sehr günstiges Elektrodenmaterial darstellt. Li-S-Batterien sind schon seit den 1940er-Jahren Objekt der Forschung; Prototypzellen wurden zum Beispiel von der Firma Sion Power entwickelt. Allerdings sind viele Probleme, die sich aus der isolierenden Eigenschaft von Schwefel und dessen Reaktionsprodukten ergeben, wie die geringe Lebensdauer und auch die Sicherheitsproblematik, immer noch nicht gelöst. Ähnlich sieht es für die Li-O₂-Technologie aus. Das Zellsystem befindet sich noch im Entwicklungsstadium, da unter anderem die Zyklenstabilität, die Optimierung des eingesetzten Elektrolyten sowie die geringe Stromdichte beziehungsweise Leistungsdichte begrenzende Faktoren darstellen.

Generell werden international vier unterschiedliche Elektrolyttypen für Li-O₂-Systeme diskutiert: wässrige Flüssigelektrolyte, nichtwässrige Flüssigelektrolyte (zum Beispiel basierend auf organischen Carbonaten), feste Elektrolyte (Keramiken, Gläser, Polymere) und Mischsysteme. Da Lithiummetall wie alle Alkalimetalle stark mit Wasser reagiert, müssen die Anoden bei wässrigen Elektrolyten geschützt werden. Die benötigten Anodenschutzschichten müssen wasserundurchlässig und gleichzeitig reversibel lithiumionenleitend sein – eine Forderung, die bisher nur unvollkommen



4 Entstehung der sogenannten Solid Electrolyte Interphase (SEI) (frei nach [5])



erfüllt werden konnte. Zum jetzigen Zeitpunkt können mit Li-O₂-Laborzellen maximal einige 100 Zyklen erreicht werden. Für die kommerzielle Nutzung dieser Technologie in Elektrofahrzeugen ist in den nächsten Jahren also noch viel Forschungsarbeit nötig. Experten gehen nicht von einer Markteinführung der Li-S-Technologie vor 2020 und der Li-O₂-Technologie vor 2025 im Fahrzeug aus. Batterien für Fahrzeuge müssen neben geringen Kosten und hohen Energiedichten auch weitere Anforderungen erfüllen, insbesondere in Bezug auf Sicherheit, mechanische Robustheit und Hoch- und Tieftemperaturfähigkeit. Bis heute kann nicht sicher gesagt werden, ob mit den oben beschriebenen Technologien in allen Kategorien die Automobilstandards zu erreichen sind.

2 ALTERUNG

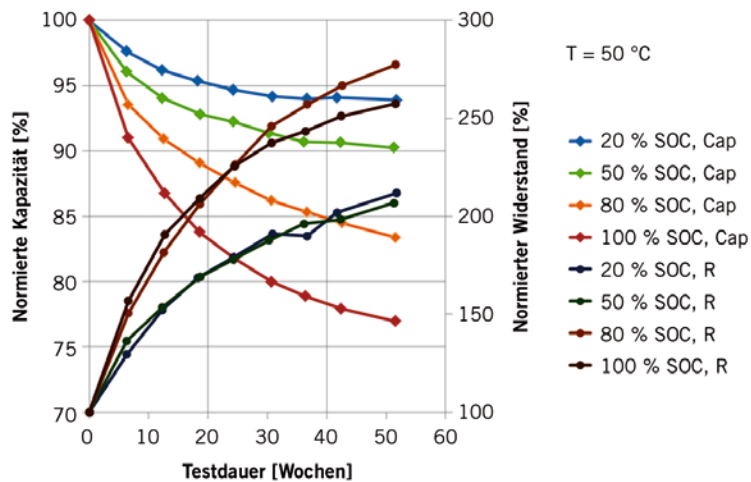
Zur Optimierung der Betriebsstrategie und zum Erreichen der notwendigen Lebensdauer ist es wichtig, das Alterungsverhalten von Lithium-Ionen-Batterien zu verstehen. Je nach verwendeten Materialien können verschiedene Alterungsprozesse in der Zelle auftreten, die unterschiedlich stark ausgeprägt sein können. Alterungserscheinungen wie Kapazitätsverlust und Widerstandserhöhung treten insbesondere dadurch auf, dass zyklisierbares Lithium oder Teile des Elektrodenmaterials verloren gehen oder diese den Kontakt mit den Ableitern verlieren. Hierfür verantwortlich sind zum einen chemische Reaktionen, durch die Schichten auf den Grenzflächen ausgebildet oder Kristallstrukturen verändert werden, zum anderen mechanische Belastungen durch die Volumenänderungen der Elektroden bei Ein- und Auslagerung von Lithium. Ein wesentlicher Alterungseffekt in Lithium-Ionen-Batterien ist die Ausbildung der sogenannten Solid Electrolyte Interface (SEI). Diese Schicht entsteht auf einer Graphitanode durch die Reaktion von Lithium mit dem Elektrolyten an der Grenzfläche zwischen Anode und Elektrolyt, 4. Die SEI ist nur für Lithium-Ionen durchlässig und verhindert eine weitere Reaktion zwischen Elektrolyt und Aktivmaterial. Das Ausbilden der SEI ist bei graphitbasierten Lithium-Ionen-Batterien in den ersten Zyklen der Zelle also notwendig. Allerdings wird bei der Bildung der SEI Lithium irreversibel eingebunden, was zu einem Verlust von zyklisierbarem Lithium führt. Außerdem erhöht sich der Widerstand der Zelle, da die SEI eine zusätzliche Barriere beim Ein- und Auslagern der Lithium-Ionen darstellt. Besonders die Zusammensetzung des Elektrolyten und die verwendeten Additive in der

Elektrolytlösung bestimmen Aufbau und Eigenschaften der SEI und sind damit auch sehr wichtig für das Alterungsverhalten der Lithium-Ionen-Batterie.

Die oben beschriebenen Alterungsprozesse zeigen sich in elektrischen Tests an Zellen durch Widerstandserhöhung und Kapazitätsabnahme. Mit Kapazitäts- und Leistungstests sowie Impedanzmessungen lässt sich die Alterung in Abhängigkeit der Betriebsbedingungen untersuchen. Man unterscheidet hierbei zwischen der kalendarischen Alterung, also dem Lagern der Zellen ohne Strombelastung, und der zyklischen Alterung, die mit verschiedenen Stromprofilen hervorgerufen werden kann.

Einflussfaktoren auf die kalendarische Alterung sind vor allem die Spannungslage (gleichbedeutend dem Ladezustand) und die Temperatur. Tests zeigen, dass erhöhte Temperaturen bei der Lagerung zu stärkerer Alterung führen, was relativ gut mit dem Arrhenius-Gesetz beschrieben werden kann, 5. Daraus folgt in etwa eine Halbierung der Lebensdauer einer Zelle bei einer Temperaturerhöhung um 10 °C. Demnach sollten hohe Temperaturen möglichst vermieden werden. Allerdings geht bei tieferen Temperaturen auch die Leistungsfähigkeit durch reduzierte elektrochemische Reaktionsraten und steigenden Elektrolytwiderstand zurück. Somit sollte für eine gute Leistung ein moderater Betriebstemperaturbereich von circa 20 bis 40 °C angestrebt werden. Für den Einfluss der Temperatur auf die Alterung muss die gesamte Betriebsdauer inklusive der Standzeiten betrachtet werden. Kurzfristig hohe Temperaturen sind tolerierbar, sofern nicht sicherheitskritische Werte überschritten werden. Auf dem Prüfstand gibt es kommerzielle Zellen, bei denen beschleunigte Alterungstests auf Lebensdauern von mehr als 20 Jahren schließen lassen. Es finden sich aber auch Zellen, bei denen die bei Standardbedingungen zu erwartenden Lebensdauern kaum zehn Jahre beträgt.

Die Abhängigkeit der Alterung von der Spannungslage ist je nach betrachteter Zelle sehr unterschiedlich. In den in 6 gezeigten Daten einer Zelle mit einer NMC-Kathode und einer Graphitanode findet sich eine exponentielle Abhängigkeit. Dies kann für gleiche Technologien bei leichten Änderungen der Elektrolytzusammensetzung oder bei einem veränderten Verhältnis der Anoden- zur Kathodenkapazität aber auch ganz anders aussehen. In den meisten Fällen gilt jedoch allgemein, dass der Batterie der Verbleib in hohen Ladezuständen schadet. Dieser Effekt wird bei zusätzlich hohen Temperaturen besonders deutlich. Insgesamt sollte also der Betrieb einer Zelle mit hohem Ladezustand und



6 Typische Entwicklung der Kapazität (Cap) und des Innenwiderstands (R) einer Lithium-Ionen-Batterie bei verschiedenen Ladezuständen (SOC) und 50 °C Zelltemperatur (nach [6])

hoher Temperatur soweit möglich vermieden werden. Eine Konsequenz daraus ist, dass für eine optimale Ladestrategie die Vollladung erst kurz vor Antritt der nächsten Fahrt erreicht werden sollte. Dies kann etwa über ein intelligentes Batterie-Management-System (BMS) umgesetzt werden, dem mitgeteilt wird, wann der Fahrer am nächsten Tag wieder losfahren möchte.

Die Auswirkungen der Zyklenalterung sind im Vergleich zur kalendarischen Alterung sehr viel komplexer. Um zuverlässige Alterungsprognosen für die Zellen in der praktischen Anwendung treffen zu können, müssen neben der Temperatur und Spannungslage auch Einflüsse von Zyklenzahl, Zyklientiefe (entnommene beziehungsweise zugeführte Ah pro Zyklus) und Stromstärke untersucht werden. Eine Testmatrix mit etwa 30 unterschiedlichen Tests und je drei Zellen pro Test ist daher für Alterungsuntersuchungen keine Seltenheit. Davon sind meist mehr als die Hälfte Zyklientests. Komplex ist hier insbesondere der Einfluss von Spannungslage und Zyklientiefe. Denn abhängig davon, in welchen Spannungslagen mit welchem Hub zyklisiert wird, können Kristallstrukturänderungen auftreten, die zur erhöhten mechanischen Belastung führen. Diese können sich je nach betrachteter Zelle sehr unterschiedlich auswirken. Das Verständnis solcher Effekte und auch des Zusammenhangs zwischen kalendarischer und zyklischer Alterung sind wichtige Ziele der Forschung. Meist gilt aber, dass Zyklen mit geringer Zyklientiefe wesentlich höhere Energiedurchsätze in der Batterie ermöglichen. So kann der Energiedurchsatz bei einer Zyklientiefe von 10% durchaus fünf bis zehn Mal größer als bei Zyklientiefen von 100% sein. Kommerzielle Zellen für den automobilen Einsatz erreichen heute bei Vollzyklisierung meist 3000 und mehr Zyklen. Auch hier gehen die Qualitäten zwischen den Produkten verschiedener Hersteller aber sehr weit auseinander. Diese Schwankungen sind wesentlich größer als die systematischen Unterschiede zwischen den Batterien mit unterschiedlichen Elektrodenmaterialien oder Bauformen.

Die aus den Tests gewonnen Erkenntnisse können in Alterungsmodelle einfließen. So werden Lebensdauerprognosen für unterschiedliche Anwendungsprofile möglich, die eine wichtige Grundlage für die Markteinführung von Elektrofahrzeugen und für Garantiezusagen sind. Solche Modelle werden heute nur in Entwicklungsabteilungen und Forschungsinstituten betrieben und stehen nicht als Bibliothek für Standard-Simulationssoftware zur Verfügung. Insbesondere die Parametrierung für ein bestimmtes Produkt wird auch in Zukunft sehr aufwendig bleiben.

Neben der Alterung ist die Temperaturabhängigkeit der Leistungsfähigkeit und der Kapazität von großer Bedeutung. Diese Kennwerte brechen bei Lithium-Ionen-Batterien vor allem in der Kombination von hohen Strömen und tiefen Temperaturen stark ein. Während die Kapazität bei kleinen Strömen und -20 °C je nach Produkt zwischen 30 und 70% abfällt, kann der Wechselstromwiderstand um das Drei- bis Fünffache und bei tiefen Frequenzen, also langen Entladezyklen, um das zehn- bis 100-fache ansteigen. Allerdings erwärmen sich die Batterien durch den hohen Widerstand bei tiefen Temperaturen sehr schnell. Zusätzlich muss bei Temperaturen unter 0 °C beachtet werden, dass durch zu hohe Ladeströme das oben bereits diskutierte Lithium Plating auftritt.

3 SCHLUSSFOLGERUNG

Generell umfasst die Lithium-Ionen-Batterietechnologie eine Vielzahl unterschiedlicher Zellchemien und Bauformen. Zellen mit sehr hohen Leistungen, hohen Energiedichten, sehr hohen kalendarischen oder Zyklenlebensdauern sowie günstigen Kosten sind am Markt von vielen Herstellern verfügbar. Dadurch entsteht ein extrem starker Technologie- und Anbieterwettbewerb, der die technologische Entwicklung mit hohem Tempo vorantreibt. Leider lassen sich die gewünschten positiven Eigenschaften nicht alle in einer Zelle vereinigen, sodass die geeignete Zelle je nach Anwendung sorgfältig ausgewählt werden muss.

Dipl.-Phys. Madeleine Ecker und Prof. Dr. rer. nat. Dirk Uwe Sauer,
RWTH Aachen

LITERATURHINWEISE

- [1] Scrosati, B. et al.: Lithium batteries: Status, prospects and future. In: J. Power Sources 195 (2010), S. 2419-2430
- [2] Pollet, B. G. et al.: Current status of hybrid, battery and fuel cell electric vehicles: From electrochemistry to market prospects. In: Electrochimica Acta, 2012
- [3] Winter, M. et al.: What Are Batteries, Fuel Cells, and Supercapacitors? In: Chemical Reviews 104 (2004), Nr. 10, S. 4245-4270
- [4] Bruce, P. G. et al.: Li-O₂ and Li-S batteries with high energy storage. In: Nat Mater 11 (2012), Nr. 2, S. 172
- [5] Vetter, J. et al.: Ageing mechanisms in lithium-ion batteries. In: J. Power Sources, 147 (2005), S. 269-281
- [6] Ecker, M. et al.: Development of a lifetime prediction model for lithium-ion batteries based on extended accelerated aging test data. In: J. Power Sources, 215 (2012), S. 248-257