

Unternehmen und Forschungseinrichtungen arbeiten weltweit an der Erhöhung der Kapazität von Aktivmaterialien, den Komponenten der Batterie, die innerhalb der Elektroden für die Speicherung der elektrischen Energie zuständig sind. Für Anode und Kathode sind inzwischen Materialien bekannt, die deutlich höhere Kapazitäten ermöglichen als bisher. Ihre potenzielle Nutzung hängt jedoch ganz wesentlich davon ab, inwieweit sich diese Materialien stabil und zuverlässig einbauen lassen.

Neuartige Anoden vervielfachen Energiespeicherkapazitäten

Silizium-Kohlenstoff-Komposite

als Speichermaterialien für Hochleistungs-Lithium-Ionen-Batterien

Von Hartmut Wiggers und Christof Schulz

Der zunehmende Energiebedarf von portablen Geräten des täglichen Lebens als auch die – politisch gewollte – Steigerung der Zahl von Fahrzeugen mit teil- oder vollelektrischem Antrieb stellt die Hersteller von wieder aufladbaren Batterien vor die Herausforderung, bei möglichst unveränderter Baugröße und gleichbleibendem Gewicht immer mehr Energie in den Batterien zu speichern. Nahezu alle Anwendungen basieren dabei auf Lithium-Ionen-Batterien (LIBs), die sich aufgrund zahlreicher Vorteile wie Langlebigkeit, Baugröße, Speicherdichte und Zuverlässigkeit im

Vergleich zu anderen Systemen inzwischen nahezu flächendeckend durchgesetzt haben. In einer Batterie, so auch in Lithium-Ionen-Batterien, werden die beiden Pole der Batterie (Anode und Kathode, auch als Elektroden bezeichnet) so miteinander kombiniert, dass zwischen ihnen Ionen, bei LIBs eben Lithium-Ionen, hin- und hertransportiert werden. Diese werden durch Elektronen ge- und entladen, die zeitgleich durch einen extern angeschlossenen Verbraucher oder ein Ladegerät in die eine oder andere Richtung transportiert werden. Die Elektroden stehen über einen

lithiumhaltigen Elektrolyten in Kontakt, der den entsprechenden Ionen-Transport gewährleistet. Zur Vermeidung eines elektrischen Kurzschlusses innerhalb der Batterie werden Anode und Kathode über eine elektrisch isolierende, poröse und ionendurchlässige Membran (Separator) voneinander getrennt.

Nach wie vor besteht ein großer Bedarf an einer Erweiterung der Speicherdichte, bei der Optimierung von Bauformen und der Größenreduktion von passiven Bauteilen wie Einhausung und Stromableiter sind jedoch schnell technische Grenzen erreicht. Somit werden andere Maß-

nahmen erforderlich, um die Kapazität der Batterien weiter zu steigern. Daher arbeiten Unternehmen und Forschungseinrichtungen weltweit an der Erhöhung der Kapazität von Aktivmaterialien, den Komponenten der Batterie, die innerhalb der Elektroden für die Speicherung der elektrischen Energie zuständig sind. Für Anode und Kathode sind inzwischen Materialien bekannt, die deutlich höhere Kapazitäten ermöglichen als bisherige Systeme, ihre potenzielle Nutzung hängt jedoch ganz wesentlich davon ab, inwieweit sich diese Materialien stabil und zuverlässig einbauen lassen.

Auch einige Forschungseinrichtungen an den Ruhrgebiets-Universitäten bearbeiten das Thema Materialien für Lithium-Ionen-Batterien entlang der gesamten Prozesskette. In zahlreichen Projekten, die unter anderem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung, dem Land NRW (kofinanziert über die EU) und dem Mercator Research Center Ruhr (MERCUR) finanziert worden sind, erforschen Wissenschaftler*innen des Instituts für Verbrennung und Gasdynamik (IVG) an der Universität Duisburg-Essen, des Zentrums für Elektrochemie an der Ruhr-Universität Bochum und des Zentrums für Brennstoffzellentechnik (ZBT) in Duisburg die Herstellung, Verarbeitung und Nutzbarmachung neuer Materialien für Anoden und Kathoden. Dabei wird sowohl die gesamte Prozesskette vom Aktivmaterial bis zur nahezu fertigen Batterie abgedeckt, als auch eine umfassende Analytik der Materialien auf Eignung und Stabilität durchgeführt. Ein Schwerpunkt des IVG liegt dabei auf der Herstellung und Prozessierung von Aktivmaterialien für die Anode auf Basis von Silizium. Dieses Material ist in der Lage, die Speicherkapazität der Anode im Vergleich zu bisher eingesetzten Komponenten zu vervielfachen. Dass es dabei mit der reinen Herstellung des Siliziums selbst nicht getan ist, soll im Folgenden am Bei-

spiel der komplexen Prozesskette bis zu einer fertigen Batterie aufgezeigt werden.

Herstellung der Aktivkomponente

Die in vielen Jahren am IVG erarbeitete Expertise zur Herstellung von spezifischen Silizium-Qualitäten als Kernkomponente zukünftiger Anoden ist Ausgangspunkt zur Erforschung neuer Batteriematerialien[1,2]. Silizium bietet im Vergleich zu heutigen Aktivmaterialien – im Wesentlichen Graphit – den Vorteil, dass es sowohl eine deutlich höhere volumetrische (volumenbezogene) als auch gravimetrische (massebezogene) Speicherdichte als Graphit aufweist. In Zahlen: Bezogen auf die eingesetzte Masse speichert reines Silizium zehnmals mehr Lithium als Graphit. Dieser immens erscheinende Gewinn zur Speicherung von Lithium relativiert sich zwar dadurch, dass die Gegenelektrode (Kathode) die enormen Mengen an Lithium bereitstellen muss, was mit den bisherigen konventionellen Materialien, beispielsweise Lithium-Eisenphosphat (LFP) oder Nickel-Mangan-Cobaltoxid (NMC) nur begrenzt möglich ist; nichtsdestotrotz sind sich Forscher und Batterieunternehmen einig, dass Silizium in Zukunft zu einem wichtigen Bestandteil von Lithium-Ionen-Batterien werden wird.

Forschungsergebnisse zur Verwendung von Silizium zeigen, dass das Material für die Verwendung in Batterien jedoch einige Voraussetzungen erfüllen muss. So ist es zwingend erforderlich, dass sich die Größe der Primärpartikel – das sind die kleinsten Baueinheiten, aus denen Partikel aufgebaut sein können – in einem Größenbereich um die einhundert Nanometer bewegen muss. Sind die Primärpartikel deutlich größer, so entwickelt sich wegen einer Volumenänderung bei der Speicherung von Lithium im Silizium-Gerüst eine so hohe mechanische Spannung, dass die Partikel zerbrechen. Dieses Problem besteht bei ausreichend

kleinen Primärpartikeln nicht mehr, da diese deutlich flexibler sind weil sie mechanische Spannung über die vergleichsweise große Partikeloberfläche abbauen können. Dies ließe vermuten, dass noch kleinere Primärpartikel hier von Vorteil wären, was aber nicht der Fall ist. Grund ist die mit abnehmender Partikelgröße stark zunehmende Anzahl an oberflächennahen Siliziumatomen. Diese tragen nicht zur Speicherung bei. Beträgt der Anteil der inaktiven Siliziumatome bei Primärpartikeln mit 100 Nanometern Durchmesser nur 1,5 Prozent, so steigt er für Partikel mit einem Durchmesser von 20 Nanometern bereits auf 7,5 Prozent, 10 Nanometer-Partikel weisen schon eine Anzahl an Oberflächenatomen von 14 Prozent auf.

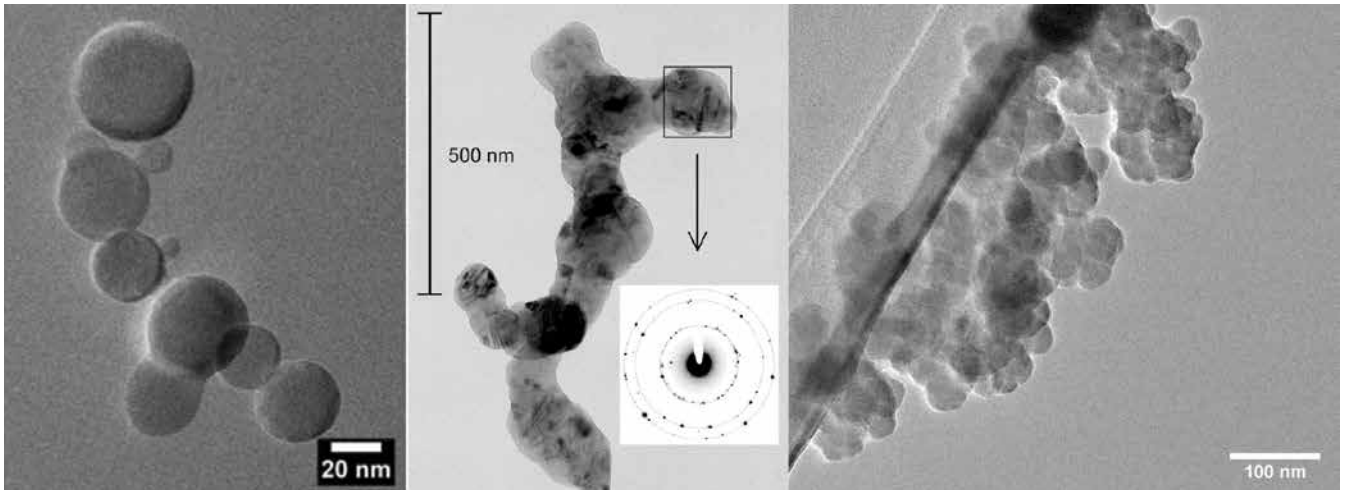
Beim wiederholten Laden und Entladen tritt außerdem ein parasitärer Effekt an der Partikeloberfläche auf: Das zunehmende Wachstum einer für die Speicherung ebenfalls inaktiven Grenzschicht mit dem Elektrolyten (Solid-Electrolyte Interphase, SEI), die sich auf die Langzeitstabilität auswirkt; dazu später mehr.

Als weiteres Ergebnis langjähriger Forschung an Silizium für den Einsatz in Lithium-Ionenbatterien wurde erkannt, dass amorphe Partikel im Vergleich zu kristallinen Vorteilen bieten. Beim ersten Laden und Entladen der Batterie entsteht amorphes Silizium – kristallines Material wird daher beim ersten Ladezyklus stark verändert und kann dabei strukturellen Schaden nehmen; amorphes Material verändert dagegen im Wesentlichen nur sein Volumen. Darüber hinaus zeigen einige Arbeiten, dass auch eine Dotierung des Siliziums mit Fremdatomen von Vorteil sein kann, hier sind die Ergebnisse aber noch uneinheitlich.

Die oben genannten Anforderungen an Silizium für Lithium-Ionen-Batterien lassen sich in idealer Weise in einem Gasphasensyntheseprozess umsetzen. Dabei wird ein gasförmiger Ausgangsstoff – in unserem Fall Monosilan, SiH_4 –



Christof Schulz. Foto: Max Greve



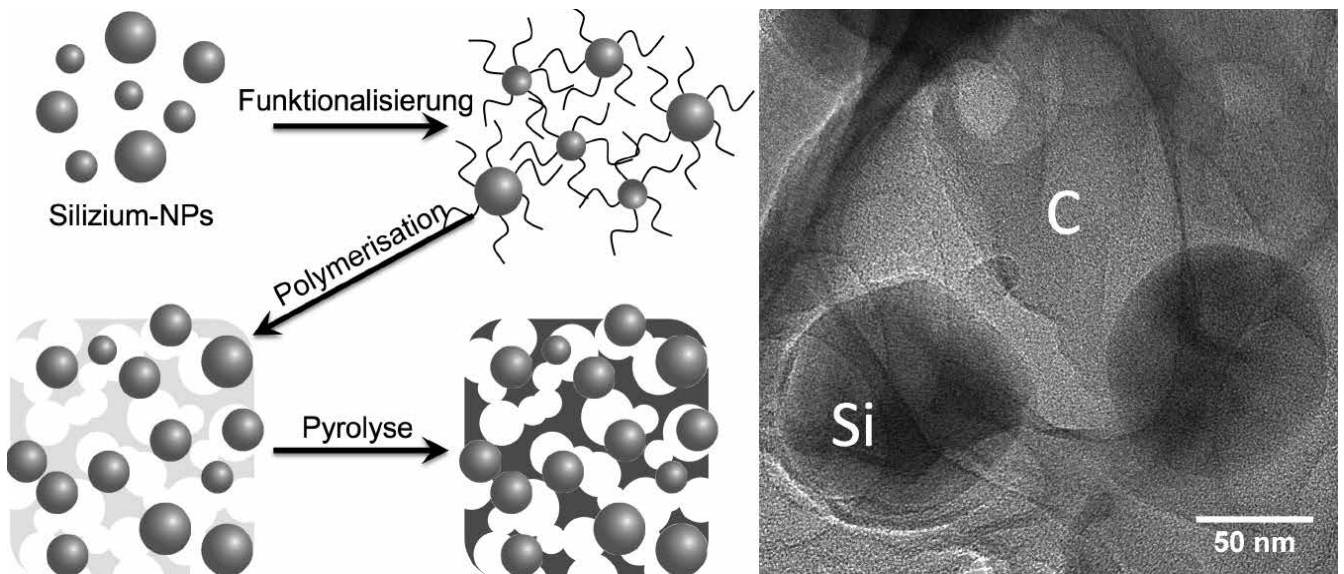
(1) Siliziumnanopartikel aus der Gasphasensynthese: Von links: nicht aggregierte, sphärische und kristalline Partikel aus der Plasmasynthese, kristalline Aggregate (Mitte) und amorphe Aggregate (rechts) aus dem Heißwandreaktor.
Quelle: eigene Darstellung

durch thermische Energie unter Bildung von Silizium und Wasserstoff zersetzt. Im Laborprozess wird der Wasserstoff verbrannt, in einer technischen Anlage kann er in einem Kreislauf wieder zur Herstellung von Monosilan verwendet werden. Das IVG verfügt über verschiedene Gasphasenreaktoren, die je nach Prozessbedingungen wie Druck und Temperatur sowohl die Herstellung von kristallinem als auch von amorphem Material ermöglichen. Darüber hinaus lässt sich direkt im Syntheseprozess durch Zugabe von

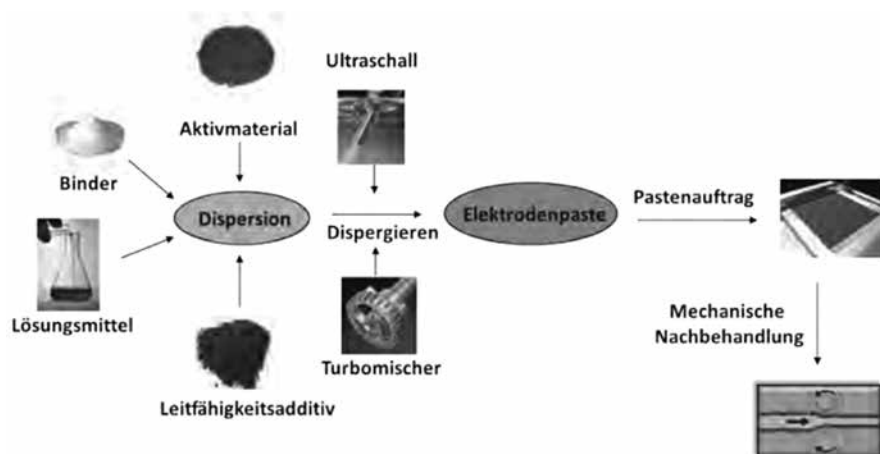
weiteren gasförmigen Komponenten wie beispielsweise Diboran (B_2H_6) eine direkte Dotierung während des Herstellprozesses realisieren, so dass die vorhandene Technologie in idealer Weise die Synthese einer geeigneten Aktivkomponente ermöglicht. Abbildung (1) zeigt elektronenmikroskopische Aufnahmen einer Auswahl von Siliziumnanopartikeln (Silizium-NPs), die in unterschiedlichen Reaktoren am IVG synthetisiert worden sind. Je nach Prozessbedingung lässt sich nahezu alles, von kleinsten, kristallinen bis

zu größeren, kristallinen oder amorphen Aggregaten herstellen.

Beim wiederholten Laden und Entladen bildet sich an der Oberfläche der Siliziumnanopartikel eine Grenzschicht, die sogenannte SEI. Sie entsteht dadurch, dass sich bei dem zum Laden der Batterie angelegten Potenzial ein Teil des Elektrolyten an der Partikeloberfläche zersetzt und mit dieser reagiert. Dieser Prozess ist nicht erwünscht und muss so weit wie möglich unterdrückt werden. Darüber hinaus dehnen sich die Partikel,



(2) Schemazeichnung zur Herstellung poröser Si/C-Kompositmaterialien (links) und Elektronenmikroskopie-Aufnahme (rechts) des hergestellten Produktes.
Quelle: eigene Darstellung



(3) Schemazeichnung zur Verarbeitung von Aktivmaterialien zu gedruckten Schichten.
Quelle: Unikate 43 (2013), S. 95

wie oben beschrieben, beim Laden der Batterie aus, während sie sich beim Entladen wieder zusammenziehen. Dieses Verhalten erfordert die Verarbeitung der Nanopartikel in der Form, dass zum einen die Volumenveränderung möglich ist, zum anderen die mechanische Integrität der Partikel und die ihrer Umgebung darunter nicht leidet. Dazu wurde eine Strategie entwickelt, die diesen Forderungen Rechnung trägt. Grundidee des patentierten Verfahrens ist die Einbettung der Partikel in einem porösen, schwammartigen und elektrisch leitfähigen Gerüst. Dieses gewährleistet sowohl den notwendigen Platz für die Volumenänderung als auch den Zutritt von Lithium-Ionen und die elektrische Anbindung der Partikel innerhalb der Elektrode. Zur Herstellung eines geeigneten Gerüsts werden gängige flüssige Chemikalien (Styrol und Divinylbenzol) zu porösem Polystyrol umgesetzt. Um dabei eine gleichmäßige Einbettung der Siliziumpartikel zu erreichen, müssen diese bereits homogen in der flüssigen Ausgangsmischung verteilt sein. Eine solch homogene Verteilung erreicht man dadurch, dass man die Partikel an ihrer Oberfläche dem Styrol möglichst ähnlich macht, um so eine gute Dispergierung zu gewährleisten. Ein etabliertes Verfahren ist die Oberflächenfunktionalisierung von Partikeln, die auch hier Verwendung

findet. Es dient dazu, Oberflächen hydrophob oder hydrophil, oleophob oder oleophil zu machen. Im Fall der Siliziumnanopartikel wird die Oberfläche mit langkettigen Kohlenwasserstoffmolekülen zur Reaktion gebracht, um diese oleophil zu machen und somit eine homogene Dispergierung in der Styrol/Divinylbenzol-Mischung zu erzielen (siehe Schemazeichnung in Abb. 2).

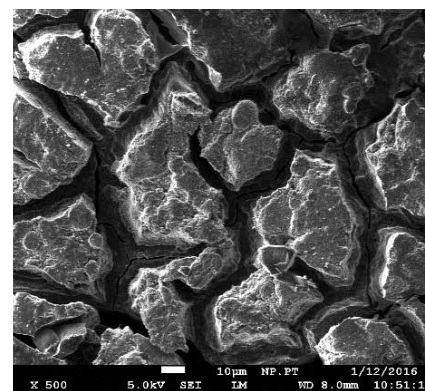
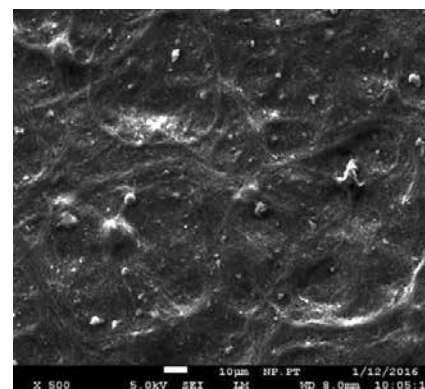
In einem anschließenden Heizschritt wird das poröse Polystyrolgerüst zu Kohlenstoff verkocht (pyrolysiert), wobei sowohl die Gerüststruktur als auch die Siliziumnanopartikel erhalten bleiben. Die Bildung von Siliziumcarbid, die bei Temperaturen ab etwa 850°C einsetzt, muss dabei in jedem Fall vermieden werden, weil ansonsten die erforderlichen Eigenschaften für ein funktionales Anodenmaterial erheblich beeinträchtigt würden.

Herstellung von Elektrodenschichten

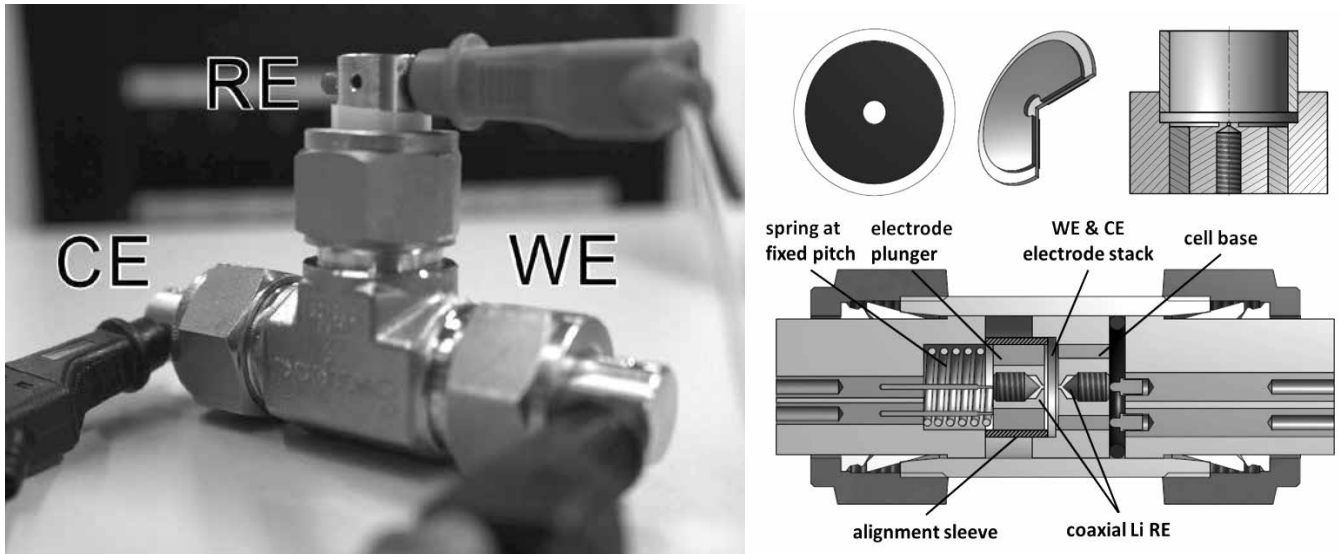
Zur Herstellung von Elektrodenschichten ist es erforderlich, dass die Aktivmaterialien für Kathode und Anode mit hoch leitfähigen Materialien, einem Binder und Lösungsmitteln gemischt und zu homogenen Dispersionen verarbeitet werden (siehe Abb. 3).

In einem anschließenden Druckprozess erfolgt die Auftragung auf

den sogenannten Stromableiter, eine Metallfolie aus Kupfer oder Aluminium. Der Zusatz eines Leitfähigkeitsadditivs zur Dispersion ist erforderlich, um den Innenwiderstand der Batterie durch Ohmsche Verluste zu minimieren, die beim Laden und Entladen in Wärme umgesetzt würden. Hier wird unter anderem auch der Einsatz neuartiger Stoffe wie Kohlenstoff-Nanoröhren oder Graphen untersucht. Besondere Aufmerksamkeit gilt neben den Leitfähigkeitsadditiven auch den Bindersystemen. Diese sind sowohl für die mechanische Integrität der gedruckten Elektroden als auch für die Haftung auf dem Stromableiter verantwortlich und müssen im besonderen Fall Silizium-basierter Elektroden auch die enormen Volumenveränderungen beim Laden und Entladen tolerieren. Sind die Voraussetzungen für eine dauerhafte mechanische Beständigkeit nicht gewährleistet, so brechen die Elektroden wie in Abbildung (4)



(4) Elektrode aus Silizium vor (oben) und nach dem Durchlaufen von 140 Lade-/Entladezyklen.
Quelle: eigene Darstellung



(5) Testzelle für elektrochemische Charakterisierungen. Links: klassische Swagelok® T-Zelle; rechts: Schema einer Messzelle mit koaxialer Referenzelektrode.

Quelle: S. Klink, E. Madej, E. Ventosa, A. Lindner, W. Schuhmann and F. La Mantia, *Electrochem. Commun.*, 2012, 22, 120–123

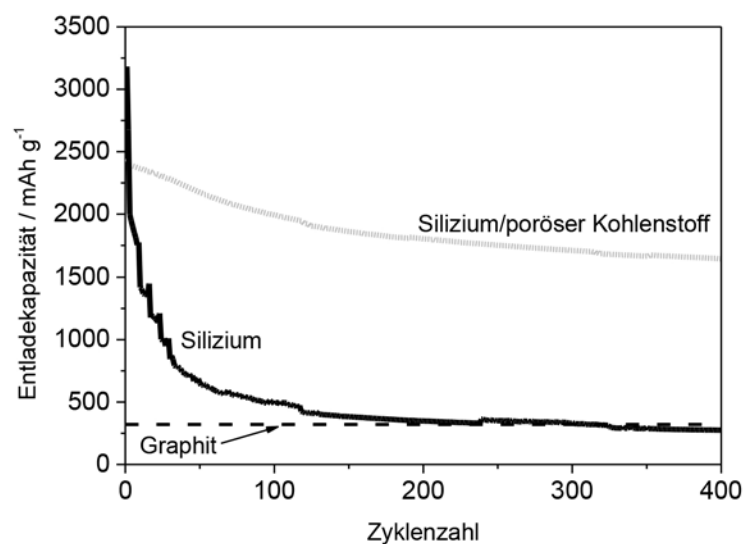
dargestellt auseinander, verbunden mit einem entsprechend schnellen Kapazitätsverlust.

Je nach Anforderung an die Eigenschaften der Batterie (Hochstromfähigkeit beziehungsweise hohe Speicherkapazität) beträgt die Schichtdicke der Elektroden wenige zehn bis zu wenige hundert Mikrometer. Zur Herstellung homogener Schichten ist es daher notwendig, dass die eingesetzten Feststoffe wie das Leitfähigkeitsadditiv und das Aktivmaterial ausreichend fein dimensioniert sind, dass sie die Herstellung solch dünner Schichten nicht stören. Dies erfordert, dass die Teilchengrößen der Feststoffe einen Wert von 20 μm nicht überschreiten. Da die Produkte aus der oben beschriebenen Pyrolyse typischerweise deutlich größere Strukturen aufweisen, ist ein Mahlschritt unvermeidbar. Dabei ist es wichtig, dass die mühsam hergestellte poröse Gerüststruktur erhalten bleibt und die Zusammensetzung des Aktivmaterials nicht verändert wird. Ein Mahlprozess mit geringem Energieeintrag in einer Planetenmühle hat sich als erfolgreich und kostengünstig erwiesen, wobei sich die Pyrolyseprodukte aufgrund ihrer porösen Struktur vergleichsweise einfach zerkleinern lassen.

Elektrochemische Testung

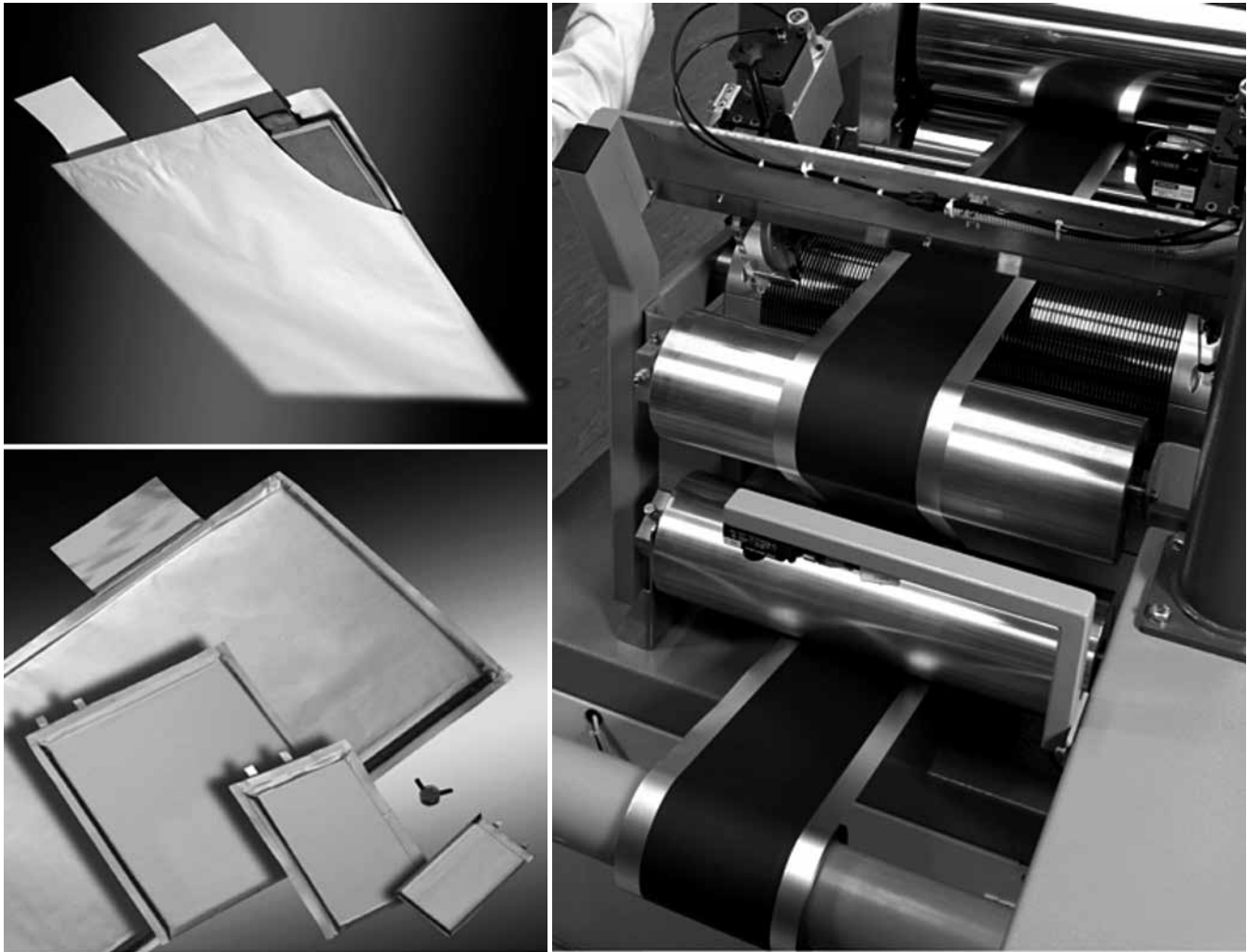
Erst nach Abschluss aller zuvor beschriebenen Prozessschritte lässt sich beurteilen, inwieweit sich die zu Beginn hergestellten Siliziumpartikel für eine Anwendung in Lithium-Ionen-Batterien eignen. Dazu finden zunächst sogenannte Halbzellentests statt, bei der die Gegenelektrode (Counter Electrode, CE) aus metallischem Lithium besteht, die Arbeitselektrode (Working Electrode, WE) ist das zu untersuchende

Kathoden- oder Anodenmaterial. Entsprechende Tests finden an der Ruhr Universität Bochum (RUB) statt. Der Lehrstuhl für Analytische Chemie der RUB verfügt über jahrzehntelange Erfahrung in der Charakterisierung elektrochemischer Prozesse, wie sie in zahlreichen Bereichen wie Sensorik, Elektrokatalyse oder Li-Ionen-Batterien zu beobachten sind. Untersuchungsmethoden wie die Cyclovoltammetrie und insbesondere die Elektrochemische Impedanzspektroskopie (EIS) erwie-



(6) Entladekapazität für eine Elektrode aus Silizium und eine aus porösem Si/C-Kompositmaterial im Vergleich zu Graphit.

Quelle: eigene Darstellung



(7) Pouchzelle mit einem Zellpaar (oben links), Pouchzellen mit gestapelten Zellpaaren (unten links) und Beschichtungsanlage zum Drucken der Aktivmaterialien auf den Stromabnehmer (rechts).

Quelle: © Fraunhofer Institut für Siliziumtechnologie

sen sich in den letzten Jahren für die Materialcharakterisierung als ausgesprochen hilfreich, da durch Anregung der Arbeitselektrode mit einem kleinen Wechselspannungssignal zerstörungsfrei viele der oben genannten Parameter ermittelt werden können. Dazu wurde für die Untersuchung der Detailprozesse in Batterieelektroden eine einzigartige Messgeometrie mit koaxialer Referenzelektrode (Reference Electrode, RE) entwickelt, die Asymmetrieffekte, wie sie bei klassischen Dreielektroden-Messungen in sogenannten Swagelok® T-Zellen (siehe Abb. 5 links) auftreten, vermeidet. So ist es mit dieser Zelle möglich, Elektroden einfach, vollständig und zuverlässig für die Materialentwicklung zu charakterisieren.

Dass das Konzept der porösen, leitfähigen Matrix zur Einbettung der Siliziumpartikel funktioniert, zeigt sich eindrucksvoll an den Ergebnissen der elektrochemischen Untersuchungen. Dazu werden die hergestellten Elektroden in die oben beschriebenen Testzellen eingebaut und einem Langzeittest unterzogen, indem sie wiederholt ge- und entladen werden. Die Anzahl der Lade-/Entladezyklen bis zum Abfall der Kapazität auf 80 Prozent des Anfangswertes wird dabei als Zykluslebenszeit definiert. Batterien für mobile Geräte müssen dabei eine Lebenszeit von einigen hundert Zyklen aufweisen, Batterien für Anwendungen in der Elektromobilität sogar einige tausend. Wie in Abbildung (6) unschwer zu erkennen ist, behalten Elektroden aus dem

Kompositmaterial auch nach einigen hundert Zyklen eine Kapazität, die mehr als viermal höher ist als die des konventionellen Materials Graphit. Elektroden aus unbehandeltem Silizium versagen dagegen bereits nach wenigen Zyklen.

Anwendungsnahe Untersuchungen in Vollzellen

Nach erfolgreichen Halbzellentests stehen als nächstes Untersuchungen in Vollzellen, das heißt in realen Batteriezellen an. Dazu werden einzelne Zellpaare untersucht, die in einer gasdichten Verpackung zusammengelegt und darin eingeschweißt werden (sogenannte Pouchzellen, siehe Abb. 7, oben links). Diese Form der Batterie kennt

inzwischen jede*r aus dem Mobiltelefon, dort sind jedoch nicht nur einzelne Zellpaare sondern ganze Stapel von Zellpaaren parallel zusammengesaltet (Abb. 7, unten links). Wie bei der Herstellung der Elektroden für die kleinen Halbzellentests werden auch hierfür die Elektrodenmaterialien aus Dispersion gedruckt, wobei – wie bei der industriellen Fertigung – kostengünstige Rolle-zu-Rolle-Druckverfahren (siehe Abb. 7, rechts) zum Einsatz kommen.

Erst bei diesen Tests zeigt sich, ob das Gesamtsystem Batterie auf Basis der neuen Materialien funktioniert. Dabei spielt neben den Erkenntnissen bezüglich neuer Materialien auch die Erfahrung in der Prozessierung, Weiterverarbeitung und dem Bau von Batteriezellen eine ganz erhebliche Rolle für die erfolgreiche Weiterentwicklung.

Ausblick

In den letzten Jahren haben die Forschungsarbeiten an der Universität Duisburg-Essen in Kooperation mit benachbarten Partnern, besonders auch im Rahmen der Universitätsallianz Ruhr (UA Ruhr), einen erheblichen Fortschritt gebracht. Silizium-haltige Nanocomposite wurden systematisch erforscht und Herstellungsverfahren entwickelt. Trotz der Erfolge bleibt noch einiges an erkenntnisgetriebener Verbesserung der Materialien zu leisten, wobei dies nicht ohne eine intensive Zusammenarbeit von Wissenschaftler*innen aus unterschiedlichen Disziplinen zu bewerkstelligen ist. Nur die detaillierte Untersuchung der komplexen Prozesse, die zum langsamen Abbau der Kapazität führen, wird hier zu einem detaillierten Verständnis führen. Dabei kommt der intensiven Zusammenarbeit von Materialwissenschaftler*innen und Expert*innen in der Untersuchung elektrochemischer Detailprozesse eine zentrale Bedeutung zu. Nur auf Basis der Erkenntnis, wie sich Materialien so optimieren lassen,

dass sie den Abbauprozessen widerstehen, wird sich langfristig ein Einsatz der Materialien für die Elektromobilität abzeichnen.

Summary

The increasing demand for portable electronics as well as the politically backed rise in electric vehicles requires new, advanced materials for improved battery systems. For this reasons, scientists as well as industry face the challenge to further boost capacity and performance beyond the actual state of the art. Nowadays, almost all electrical high-energy and high-power storage systems are based on lithium-ion batteries. A change in technology is not foreseeable yet and materials for next-generation batteries need to be compatible with the existing systems. Several institutes located at the universities in the Ruhr area such as the Institute for Combustion and Gas Dynamics (IVG) at the University of Duisburg-Essen, the Center for Electrochemical Sciences the Ruhr University Bochum and the Fuel Cell Research Center (ZBT) are engaged in battery research along the process chain. Their activities cover the range from materials development and processing all the way to manufacturing complete battery cells. A specific focus is on the development and electrochemical characterization of new active anode and cathode materials. Based on newly developed silicon/carbon composite materials, highly promising active components have been identified and synthesized for next-generation lithium-ion batteries.

Danksagungen/Literatur

Die Autoren danken Ingo Plümel, Hans Orthner, Yee Hwa Sehlleier, Lisong Xiao und Sascha Dobrowolny für ihre Unterstützung.

[1] L. Xiao, Y. H. Sehlleier, S. Dobrowolny, H. Orthner, F. Mahlendorf, A. Heinzl, C. Schulz and H. Wiggers, *Chemelectrochem*, 2015, 2, 1983–1990.

[2] Y. H. Sehlleier, S. Dobrowolny, I. Pluemel, L. Xiao, F. Mahlendorf, A. Heinzl, C. Schulz and H. Wiggers, *Journal of Applied Electrochemistry*, 2016, 46, 229–239.

[3] S. Klink, E. Madej, E. Ventosa, A. Lindner, W. Schuhmann and F. La Mantia, *Electrochem. Commun.*, 2012, 22, 120–123.

Die Autoren

Hartmut Wiggers studierte von 1983 bis 1989 Chemie an der WWU Münster und der TH Darmstadt mit den Schwerpunkten Festkörperchemie und Elektrochemie. Von 1990 bis 1998 war er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Anorganische Chemie der damaligen Universität Essen und promovierte 1993 mit dem Thema „Untersuchung der elektronischen Eigenschaften von mit Silber-Clustern belegten Antimonaten mittels Impedanzspektroskopie“. 1998 wechselte Wiggers an die damalige Universität Duisburg und hat den Ausbau des Bereichs Nanopartikelsynthese am Institut für Verbrennung und Gasdynamik (IVG) vorangetrieben. Seit 2001 ist er Leiter der Abteilung Nanopartikelsynthese und habilitierte 2015. Hartmut Wiggers ist wissenschaftlicher Berater am Institut für Energie- und Umwelttechnik e.V. (IUTA) in Duisburg und war maßgeblich verantwortlich für die Einrichtung und den Aufbau des Bereichs Nano-Energie & Nanopartikelsynthese. Seit einigen Jahren beschäftigt er sich mit Materialien für Batteriesysteme und ist seit 2012 Mitglied des Direktoriums des Zentrum für Brennstoffzellentechnik (ZBT).

Christof Schulz studierte von 1989 bis 1994 Chemie in Karlsruhe und war von 1994 bis 1997 wissenschaftlicher Assistent im Physikalisch-Chemischen Institut (PCI) an der Universität Heidelberg. Er promovierte 1997 mit dem Thema „Entwicklung und Anwendung eines laserinduzierten Fluoreszenzverfahrens zur quantitativen Bestimmung momentaner Stickoxidverteilungen in Verbrennungsmotoren“. Von 1997 bis 2004 war Schulz Leiter der Abteilung „Laserdagnostik in Verbrennungsprozessen“ am PCI und habilitierte 2002. Währenddessen brachten ihn zahlreiche Forschungsaufenthalte an die Stanford University: von 2000 bis 2002 als Visiting Scholar und 2002 bis 2004 als Consulting Associate Professor. Seit Juli 2004 ist er Leiter der Arbeitsgruppe Reaktive Fluide am Institut für Verbrennung und Gasdynamik (IVG) der Universität Duisburg-Essen mit etwa 45 wissenschaftlichen Mitarbeiter*innen.

Christof Schulz war von 1991 bis 94 Stipendiat der Studienstiftung des deutschen Volkes, erhielt 2014 den Leibniz-Preis der DFG, 1999 den Freudenberg-Preis der Heidelberger Akademie der Wissenschaften

und den 1. Preis des BMW Scientific Award. Er ist Editor-in-Chief von Progress in Energy and Combustion Science und Mitglied der Editorial Boards von Applied Physics B, Proceedings of the Combustion Institute und Powder Technology. Von 2007 bis 2010 war er stellvertretender Sprecher und von 2010 bis 2015 wissenschaftlicher Direktor des Center for Nanointegration Duisburg-Essen (CENIDE). Seit 2008 ist er im wissenschaftlichen Direktorium des IUTA (Institut für Energie und Umweltforschung, Duisburg) und seit 2009 wissenschaftlicher Direktor des NanoEnergieTechnikZentrums (NETZ) in Duisburg. Seit 2007 ist er im Vorstand der deutschen Sektion des Combustion Institute und seit 2012 ebenfalls im Vorstand des (internationalen) Combustion Institute. Von 2008 bis 2016 war er gewähltes Mitglied des DFG-Fachkollegiums „Energieverfahrenstechnik“.

DuEPublico

Duisburg-Essen Publications online

UNIVERSITÄT
DUISBURG
ESSEN

Offen im Denken

ub | universitäts
bibliothek

Dieser Text wird über DuEPublico, dem Dokumenten- und Publikationsserver der Universität Duisburg-Essen, zur Verfügung gestellt. Die hier veröffentlichte Version der E-Publikation kann von einer eventuell ebenfalls veröffentlichten Verlagsversion abweichen.

DOI: 10.17185/duepublico/70417

URN: urn:nbn:de:hbz:464-20190816-103947-5

Erschienen in: UNIKATE 48 (2016), S. 10-19

Alle Rechte vorbehalten.