



# SPEKTRUM

Das Wissenschaftsmagazin der Universität Bayreuth ■ 15. Jahrgang ■ Ausgabe 1 ■ August 2019

## MATERIALIEN & ANALYTIK

Rohstoffe für Batterien

SEITEN 8-13

## ENERGIESYSTEME

Batterien und elektrische Antriebe

SEITEN 42-46

## NACHHALTIGKEIT

Batterien als Schlüsseltechnologie

SEITEN 64-67

THEMA

# Batterien

# Liebe Leserinnen und Leser,



■ Prof. Dr. Stefan Leible, Präsident der Universität Bayreuth.

Nachhaltigkeit in der Energieversorgung ist angesichts des Klimawandels eine der Zukunftsfragen des 21. Jahrhunderts. Neuen Technologien der Energiespeicherung kommt dabei eine Schlüsselrolle zu. Auf diesem Gebiet will die Universität Bayreuth mit ihrem Bayerischen Zentrum für Batterietechnik (BayBatt) innovative Entwicklungen offensiv vorantreiben.

Dabei geht es nicht allein darum, durch eine Ausweitung der Elektromobilität die CO<sub>2</sub>-Emissionen zu verringern. Stationäre Speicher in privaten Haushalten, Industrieanlagen und öffentlichen Einrichtungen, die in intelligente Energiesysteme integriert sind, werden dazu beitragen, dass der Anteil erneuerbarer Energien am Stromverbrauch weiter steigen kann. Hierfür reicht der „State of the Art“ in der Batterietechnik allerdings nicht aus. Deshalb wollen wir auch die Grundlagenforschung intensivieren und die gewonnenen Erkenntnisse nutzen, um zur Entwicklung effektiver, sicherer und marktfähiger Speichertechnologien beizutragen. Erneut wird sich hierbei die hervorragende interdisziplinäre Zusammenarbeit bewähren, die unsere Campusuniversität seit mehr als vier Jahrzehnten prägt. Physik und Chemie, die

Ingenieurwissenschaften und auch die Wirtschaftsinformatik werden sich noch stärker als bisher vernetzen. Soziale und ökologische Probleme, die mit dem Abbau der heute üblichen Batterie-Rohstoffe in Ländern Afrikas oder Südamerikas verknüpft sind, dürfen dabei nicht aus dem Blick geraten: Die Entwicklung von Batteriespeichern auf der Basis anderer, gut verfügbarer und recyclefähiger Materialien steht auf der Agenda weit vorn.

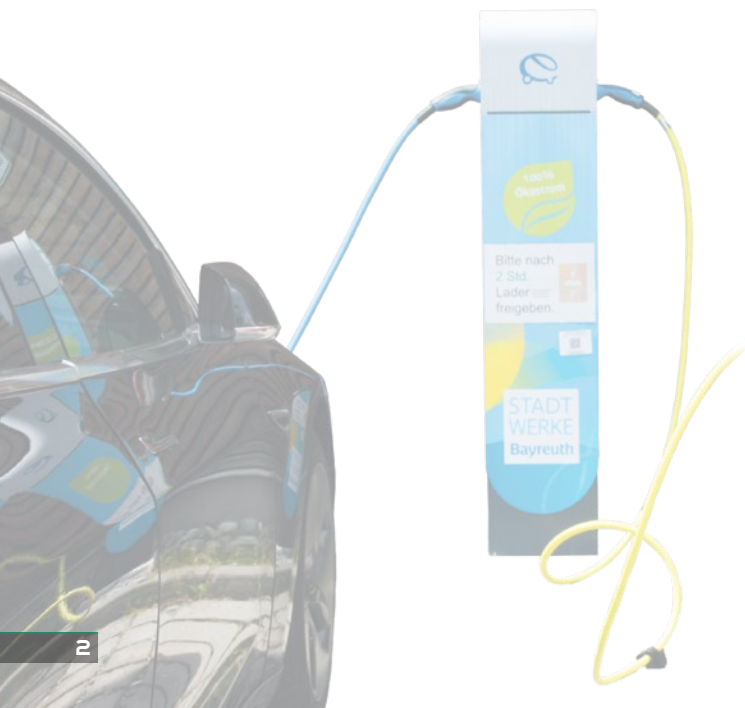
Die Entscheidung der Bayerischen Staatsregierung, das Bayerische Zentrum für Batterietechnik an der Universität Bayreuth anzusiedeln, hat erneut gezeigt: Auch auf dem Gebiet der Energieforschung und Energietechnik ist unser Campus ein dynamischer, der Zukunft zugewandter Wissenschaftsstandort.

Es grüßt sie herzlich

Ihr



Prof. Dr. Stefan Leible  
Präsident der Universität Bayreuth



## Weitere SPEKTRUM-Ausgaben

Auf der Homepage der Universität Bayreuth finden Sie unter anderem auch die vorigen SPEKTRUM-Ausgaben zu den folgenden Themen:

- 2/2018: Krieg
- 1/2018: Planet Erde
- 2/2017: Nachhaltigkeit
- 1/2017: Governance
- 2/2016: Molekulare Biowissenschaften
- 1/2016: Innovationen
- 2/2015: Digitalisierung
- 1/2015: Kulturbeggnungen und transkulturelle Prozesse
- 2/2014: Energie

- [www.uni-bayreuth.de/de/universitaet/presse/spektrum](http://www.uni-bayreuth.de/de/universitaet/presse/spektrum)

Als der bayerische Ministerpräsident im April 2018 verkündete, dass die Universität Bayreuth eine neue Forschungseinrichtung – nämlich ein Bayerisches Zentrum für Batterietechnik (Baybatt) – erhalten solle, war man sich auf dem Campus sofort einig: Wir bringen für dieses Vorhaben beste Voraussetzungen mit. Das Profildfeld „Energieforschung und Energietechnologie“ ist in natur- und ingenieurwissenschaftlicher Forschung und Lehre an der Universität Bayreuth fest etabliert, und das Zentrum für Energietechnik (ZET) bündelt seit vielen Jahren für Batteriespeicher relevante Kompetenzen aus verschiedenen Disziplinen.

Das BayBatt wird an diese campusumspannende Zusammenarbeit anknüpfen und das Thema „Batterien“ auf mehreren Skalen bearbeiten. Diese reichen von der Untersuchung molekularer Strukturen und Prozesse über die Modellierung einzelner Elektroden und Zellen bis hin zur Steuerung und Koordination von Batterien in einem intelligenten Energiesystem. Die neue SPEKTRUM-Ausgabe, die Sie in Händen halten, will Schlaglichter auf die Vielfalt der spannenden Fragestellungen der Batterieforschung in Bayreuth werfen.

Der wissenschaftliche Nachwuchs wird am BayBatt an herausfordernden Forschungsprojekten mitwirken

können. Masterstudierende, Doktoranden und Postdocs aus dem In- und Ausland sind willkommen, sich mit eigenen Ideen und Konzepten daran zu beteiligen. Mittelfristig ist auch der Aufbau eines Studiengangs zur Batterieforschung und -technik geplant. Wie die Universität Bayreuth insgesamt, hat auch ihr Zentrum für Batterietechnik eine „third mission“: Angesichts der technischen, ökonomischen und gesellschaftspolitischen Herausforderungen, die mit der Energiewende verbunden sind, wird es bei der Suche nach innovativen Lösungen mit Unternehmen, aber auch mit öffentlichen Einrichtungen zusammenarbeiten.

Batterien haben das Potenzial, einen Paradigmenwechsel im Energie- und Verkehrssektor einzuleiten, der letztlich alle Bürgerinnen und Bürger betrifft. Gerade unter diesem Aspekt würde es mich freuen, wenn Sie unserer SPEKTRUM-Ausgabe neue, interessante Anregungen entnehmen können.

Freundliche Grüße

Ihr



Prof. Dr.-Ing. Michael Danzer  
Leiter des Bayerischen Zentrums für Batterietechnik  
(BayBatt) an der Universität Bayreuth



■ Prof. Dr.-Ing. Michael Danzer ist Inhaber des Lehrstuhls für Elektrische Energiesysteme (EES) an der Universität Bayreuth.

IMPRESSUM

SPEKTRUM-Magazin der Universität Bayreuth

**Auflage:**  
deutsche Ausgabe: 1.500 Stück  
englische Ausgabe: 500 Stück

**Herausgeber:**  
Universität Bayreuth  
Stabsabteilung Presse, Marketing  
und Kommunikation (PMK)  
95440 Bayreuth  
Telefon (09 21) 55 - 53 56 / - 53 24  
pressestelle@uni-bayreuth.de

**Redaktionsleitung:**  
Christian Wißler (V.i.S.d.P.)

**Druck:**  
bonitasprint gmbh, Würzburg

**Satz und Layout:**  
GAUBE media agentur, Bayreuth  
www.gaube-media.de

**Bildquellen-Kennzeichnung:**  
sst: www.shutterstock.com



■ Christian Wißler M.A.,  
Fachwirt Public Relations (BAW),  
Stabsabteilung PMK  
der Universität Bayreuth,  
Wissenschaftskommunikation.

■ Titelseite: Batterieraum in einem  
Energiepark (sst).

■ Abb. links: E-Tankstelle auf dem Campus  
der Universität Bayreuth (Foto: Christian  
Wißler).

Alle Beiträge sind bei Quellenangaben und Belegexemplaren frei zur Veröffentlichung.



# Batterien

- 2 Grußwort**  
Prof. Dr. Stefan Leible  
Präsident der Universität Bayreuth
- 3 Editorial**  
Prof. Dr.-Ing. Michael Danzer  
Leiter des Bayerischen Zentrums  
für Batterietechnik (BayBatt) an der  
Universität Bayreuth
- 3 Impressum**
- 4 Inhaltsverzeichnis**

## Wissenschaftspolitik

- 6 Energiespeicherung – eine der zentralen Zukunftsfragen**  
Fragen an Bernd Sibling, MdL,  
Bayerischer Staatsminister für  
Wissenschaft und Kunst



Auch soziale und ökologische Umstände der Rohstoffgewinnung sind in der Batterieforschung zu beachten (Foto: Felix Malte Dorn / Shutterstock.com).

## Materialien & Analytik

- 8 Rohstoffe für Batterien**  
Nicht nur die Leistung zählt
- 14 Alles im Fluss**  
Flussbatterien speichern  
Sonnen- und Windenergie



Im Keylab für Device Engineering werden neuartige Batterie-Knopfzellen entwickelt (Foto: C. Wißler).

- 18 Prozesstechnologien für neue Festelektrolyte**  
Innovationen für die Lithium-Ionen-Batterie der Zukunft
- 22 Nanostrukturierte Oxide**  
Funktionelle Materialien für die elektrochemische Energiespeicherung und -wandlung
- 26 Batterien auf Kunststoffbasis**  
Lösungsmittelfreie Elektrolyte für die nächste Generation von Batterien



Flussbatterien – eine interessante Option für die Zwischenspeicherung erneuerbarer Energien (Foto: M. K. Kayarkatte).



- 30 Lithium-Ionen-Batterien**  
Herausforderungen der aktuellen Technologie

## Modellierung & Simulation

- 34 Batteriemodellierung**  
Wege zum Verständnis und Design elektrochemischer Energiespeicher
- 38 Wärmemanagement in Batterien**  
Erhöhte Sicherheit durch thermische Analysen und Simulationen





■ Mit dem Modell einer Batterie wurde das Bayerische Zentrum für Batterietechnik (BayBatt) auf dem Campus der Universität Bayreuth im September 2018 festlich eröffnet (Foto: Peter Kolb).

## Energiesysteme

**42 Batterien und elektrische Antriebe**  
Systembetrachtungen für die Elektromobilität



**64**  
Wichtiges Forschungsfeld: die Steuerung und Koordination einer großen Anzahl von Batteriespeichern (sst).



**60**  
Batteriespeichersysteme – ein Beitrag zur kommunalen Energieversorgung (Foto: F. X. Bogner).

## Nachhaltigkeit

**60 Energiezukunft gemeinsam gestalten**  
Wie regionale Partner die Energiewende vorantreiben

**64 Batterien als Schlüsseltechnologie**  
Durch interdisziplinäre Batterieforschung zu einer nachhaltigeren Energiewirtschaft



**54**  
Intelligente Energieknoten sind das Herz moderner Energiesysteme (Foto: B. Zeilmann).



**38**  
Untersuchung der Wärmeleitfähigkeit mit spektroskopischen Methoden (Foto: K. Herrmann).

**47 Mit Elektroantrieb voll im Rennen**  
Das Elefant Racing-Team

**48 Smart Homes**  
Wärme und Strom für unser künftiges Wohnen

**54 Industrielle und kommunale Anlagen**  
Energieoptimierter Betrieb mithilfe intelligenter Batteriesteuerung

## Wissenschaftsgeschichte

**68 Humboldt und Volta**  
Von den Experimenten Galvanis zur Erfindung der Batterie

# Energiespeicherung – eine der zentralen Zukunftsfragen

Fragen an Bernd Sibler, MdL, Bayerischer Staatsminister für Wissenschaft und Kunst



■ Abb. 1: „Sonnenscheibe“ des Glaskünstlers Florian Lechner vor der Fakultät für Ingenieurwissenschaften (Foto: Christian Wjßler).

**S**ehr geehrter Herr Minister Sibler, es ist noch kein Jahr vergangen, seit Ihr Ministerium auf dem Campus der Universität Bayreuth das Bayerische Zentrum für Batterietechnik – kurz: BayBatt – eröffnet hat. Was hat die Bayerische Staatsregierung bewogen, auf diesem Gebiet der Energieforschung ein neues Zentrum ins Leben zu rufen? Und weshalb wurde das BayBatt als Einrichtung der Universität Bayreuth gegründet – und nicht an einem anderen Standort, beispielsweise als außeruniversitäres Institut?

Energiespeicherung ist eine der zentralen Zukunftsfragen! Bei der internationalen Suche nach Antworten wollen wir hier in Bayern innovative Impulse setzen. Mit einem eigenen Forschungszentrum können wir unsere Kompetenz bündeln und vertiefte Forschungsarbeit leisten. Unser Ziel ist es, über die gesamte Wertschöpfungskette von Batteriespeichern hinweg zukunftssträchtige Entwicklungen anzustoßen. Wir setzen dabei neben der Forschung auch auf die akademische Aus- und Fortbildung junger Nachwuchskräfte. Schließlich brauchen wir sie auf diesem Zukunftsfeld als Visionäre und Problemlöser! Dazu wollen wir ein ansprechendes Angebot machen.

Das Konzept der Universität Bayreuth zur Gründung eines Forschungs- und Entwicklungszentrums für Batterietechnik hat übrigens all diese Punkte berücksichtigt. Die Ausrichtung und Schwerpunktsetzung der Universität hat es möglich gemacht, dass wir das Bayerische Zentrum für Batterietechnik im September letzten Jahres – und damit nur wenige Monate nach seiner Ankündigung – eröffnen konnten.

Denn „Energieforschung und Energietechnologie“ ist bereits seit Jahren ein wichtiger Forschungsschwerpunkt der Universität Bayreuth – disziplin- und fakultätsübergreifend. Auf diese große Expertise und Kompetenz bauen wir.

In seiner Regierungserklärung vom April letzten Jahres, in der er das Forschungs- und Entwicklungszentrum

für Batterietechnik an der Universität Bayreuth ankündigt, stellt Ministerpräsident Söder fest: „Der Elektromobilität gehört die Zukunft.“ Welche Impulse erwartet die Staatsregierung dazu aus der Forschung an der Universität Bayreuth?

Wenn wir beim Klimaschutz vorangehen und unsere Abhängigkeit von fossilen Energieträgern reduzieren wollen, kommen wir an der Elektromobilität nicht vorbei. Hier haben wir aber noch einigen Spielraum bei der Weiterentwicklung, zum Beispiel bei der Reichweite und der Frage, was mit den Batterien passiert, wenn sie nicht mehr nutzbar sind. In diesen Bereichen kann BayBatt mit seinem interdisziplinären Ansatz, der den gesamten Lebenszyklus einer Batterie in den Blick nimmt, ganz entscheidende Impulse auf dem Weg zur effizienten und nachhaltigen Batterie von morgen setzen.

Der Koalitionsvertrag der Staatsregierung aus CSU und Freien Wählern weitet die Batterieforschung am BayBatt auf stationäre Energiespeicher aus. Welche Bedeutung hat die Erforschung innovativer Speichertechniken für die regionale und landesweite Energiewende?

Die Weiterentwicklung stationärer Energiespeicher ist der Schlüssel für die Energieversorgung von



■ Abb. 2: Blick auf den zentralen Campus der Universität Bayreuth (Foto: UBT).



morgen. In Bayern können wir beim Ausbau der regenerativen Energiequellen schon große Erfolge vorweisen. Für die wirtschaftliche und nachhaltige Nutzung und Vernetzung dieser dezentral produzierten grünen Energie sind stationäre Energiespeicher aber ganz essentiell. Denn mit diesen können wir die Schwankungen von Wind- und Sonnenkraft ausgleichen und eine umfassende Versorgungssicherheit in unseren Stromnetzen gewährleisten – damit können wir unser Leben ganz konkret und fühlbar ein Stück weit besser machen.

Die nächste Generation sicherer, intelligenter und nachhaltiger Energiespeicher wird aus Bayreuth kommen – dies hat die Staatsregierung in ihrem Ministerratsbeschluss vom September 2018 angekündigt. Zudem verspricht sie eine interdisziplinäre Zusammenarbeit und enge Vernetzung von Wissenschaft und Wirtschaft. Wie kann diese ausgestaltet werden?

Die Universität Bayreuth ist in ein weites und vor allem äußerst erfolgreiches Kompetenznetzwerk mit außeruniversitären Partnern eingebunden. Davon wird auch BayBatt maßgeblich profitieren! So sind die beteiligten Arbeitsgruppen bereits jetzt im Rahmen von Projekten oder Industrieaufträgen in vielfältiger Weise mit der Wirtschaft verbunden. Für wichtige Impulse von außen wird darüber hinaus der aus Wissenschafts- und Wirtschaftsvertretern zusammengesetzte Beirat des BayBatt sorgen.

Welche direkten und mittelbaren Effekte erwarten Sie in Bezug auf die bayerische Wirtschaft? Welche Rolle spielt die Batterietechnik für die zukünftige Industriepolitik des Landes?

BayBatt ist eng mit der Wirtschaft verknüpft. Entsprechend gut wird sich die Forschung zielgerichtet an deren Bedürfnissen orientieren und diese bei



■ Abb. 3: Bernd Sibler, MdB, Bayerischer Staatsminister für Wissenschaft und Kunst (Foto: ©StMWK).

der Lösung konkreter Fragestellungen im Bereich der Batterietechnik nachhaltig unterstützen. Hinzu kommt, dass wir mit dem geplanten Studienangebot auf den vorhandenen Bedarf an Fachkräften in diesem Bereich reagieren.

Zweifelsohne spielt die Batterietechnik eine zentrale Rolle in der Industriepolitik des Freistaates, wenn es darum geht, die aktuellen Herausforderungen in den Wirtschaftsbranchen Verkehr und Energie zu meistern. Sowohl bei der Elektromobilität als auch bei der Energieversorgung nehmen moderne und effiziente Batterien eine Schlüsselrolle ein. Erfolgreiche Forschungs- und Entwicklungsvorhaben im Bereich der Batterietechnik sind daher für die Zukunftsfähigkeit unseres Industriestandortes Bayern immens wichtig. Sie tragen vor allem auch dazu bei, den Wirtschaftsstandort Bayern mit eigenen Innovationen zu stärken.

Denken wir einmal weit in die Zukunft voraus: Wie wird das BayBatt im Jahre 2028 dastehen? Auf welche Leistungen und Erfolge soll es am 10. Jahrestag seiner Gründung zurückblicken können – und was wollen Sie als Bayerischer Wissenschaftsminister dafür tun, dass diese Vision Wirklichkeit wird?

Ich bin überzeugt, dass sich BayBatt in den kommenden Jahren erfolgreich als weithin sichtbare Forschungseinrichtung positionieren wird! Sicherlich werden wir vielfältige Impulse zur Batterietechnologie ‚made in Bayreuth‘ in vielen Häusern, Geräten und Autos finden. Damit dies gelingt, werde ich die weitere Entwicklung von BayBatt weiter eng begleiten. Ich werde mich nach Kräften für diese einzigartige Forschungseinrichtung in Oberfranken einsetzen!

■ Die Fragen stellen Michael Danzer und Christian Wißler.





■ Thorsten Gerdes

# Rohstoffe für Batterien

Nicht nur die Leistung zählt

■ Der Salar de Uyuni im Südwesten Boliviens, der auf einer Höhe von 3.653 Metern liegt, ist nicht nur die größte Salzpfanne der Erde, sondern enthält eines der weltweit größten Lithiumvorkommen (sst).



Seit der italienische Physiker Alessandro Volta im Jahr 1800 die Batterie erfunden hat, sind immer wieder neue Batterietypen entwickelt worden. Ob Smartphone, Hörgerät, Fernbedienung, Herzschrittmacher, Anlasser im Auto oder unterbrechungsfreie Stromversorgung großer Anlagen – so unterschiedlich wie die Anwendungen sind auch die verwendeten Batterien. Angesichts des Klimawandels und der Notwendigkeit, insbesondere in großen Städten die Luftqualität zu verbessern, haben Batterien als Energiespeicher heute eine Bedeutung gewonnen, die vor wenigen Jahren noch unvorstellbar war. Von Batterien wird heute erwartet, dass sie wiederaufladbar sind, möglichst keine toxischen Stoffe enthalten und aus Rohstoffen bestehen, die gut verfügbar und preisgünstig sind. Auch unter kritischen Bedingungen wie Überhitzung oder mechanischer Schädigung müssen Batterien sicher sein, und am Ende einer möglichst langen Lebensdauer sollte ein Recycling obligatorisch sein.

Die Batterien, die heute weltweit pro Jahr auf den Markt kommen, haben eine Speicherkapazität von insgesamt rund 500 Gigawattstunden. Für ihre erstmalige vollständige Aufladung würde ein Kernkraftwerk ungefähr ein halbes Jahr benötigen. Die Energiespeicher-Roadmap des Fraunhofer-Instituts für System- und Innovationsforschung (ISI) prognostiziert für 2050 eine Nachfrage an Speicherkapazität, die sich auf 8.000 bis 10.000 Gigawattstunden (GWh) pro Jahr beläuft.<sup>1</sup> Um den Bedarf decken zu können, müssen nicht allein hinreichende Rohstoffressourcen, Fertigungstechnologien und -kapazitäten zur Verfügung stehen. Es müssen auch Batteriewerkstoffe, -zellen und -systeme optimiert oder völlig neu entwickelt werden.

In Bayreuth haben Forschergruppen am Lehrstuhl für Werkstoffverarbeitung seit 15 Jahren Batteriewerkstoffe und Herstellungsverfahren entwickelt, Zellen gefertigt, physikalisch und elektrochemisch charakterisiert und bewertet. Schwerpunkte waren Anodenwerkstoffe für Lithium-Ionen-Batterien, Anoden- und Kathodenwerkstoffe für wiederaufladbare Zink-Luft-Batterien, Separatoren zur Trennung der Anode von der Kathode und Analysen zur Aufklärung von Alterungsprozessen der Zellkomponenten. Darüber hinaus befassen sich die Forschungsarbeiten aber auch mit der Frage, wie sich Batterierohstoffe ersetzen lassen, die unter wirtschaftlichen, sozialen, ökologischen oder politischen Aspekten kritisch zu bewerten sind.

## „Der Energiebedarf bei der Gewinnung und Raffination von Batteriewerkstoffen ist oft beträchtlich.“

### Verfügbarkeit von Rohstoffen

Zur Herstellung von Batterien werden Rohstoffe wie Lithium, Kobalt, Nickel, Mangan und Graphit benötigt, die nicht unbegrenzt in der Erdkruste zur Verfügung stehen und mit Anwendungen in anderen Bereichen im Wettbewerb stehen. Gleichzeitig steigt die globale Nachfrage. So lag der weltweite Bedarf an Speicherkapazität für Lithium-Ionen-Batterien im Jahr 2015 noch bei etwa 70 GWh, doch 2025 wird er – selbst wenn man moderate Wachstumsszenarien zugrunde legt – bereits bei 535 GWh liegen. Die gute Nachricht lautet: Die weltweiten Vorkommen für alle Batterierohstoffe übersteigen den prognostizierten Bedarf der nächsten Jahre jeweils deutlich. Dies schließt allerdings nicht aus, dass es zu zeitweiligen Verknappungen oder Preissteigerungen einzelner Rohstoffe kommen kann.

Es darf trotz optimistischer Prognosen aber nicht übersehen werden, dass die Förderung von Batterierohstoffen auch heute noch oft mit sozialen und ökologischen Problemen einhergeht. Die Arbeitsbedingungen in den Minen sind in zahlreichen rohstoffreichen Ländern der Erde gesundheitsschädigend, die Arbeitslöhne gering. Nicht selten kommt es zwischen Bergbauunternehmen und der einheimischen Bevölkerung zu Konflikten wegen des Wasserverbrauchs. Belastete Abwässer, die aus dem Abbau und der Aufarbeitung von Batterierohstoffen entstehen, können die Umwelt schädigen. Zudem ist der Energiebedarf bei der Gewinnung und Raffination von Batteriewerkstoffen oft beträchtlich, was die „Graue Energie“<sup>2</sup>, aber auch die Kosten erhöht. Fünf wichtige Batterierohstoffe – Blei, Lithium, Kobalt, Graphit und Zink – sollen nachfolgend genauer betrachtet werden.

### Blei

Der wichtigste Batterierohstoff ist schon seit den 1950er Jahren Blei. Das gilt sowohl für den Bedarf von fast neun Millionen Tonnen pro Jahr als auch für die Nachfrage nach Batteriekapazität. Diese liegt aktuell bei knapp 400 GWh pro Jahr und ist damit viermal höher ist als für Lithium-Ionen-Batterien. Als

#### AUTOR



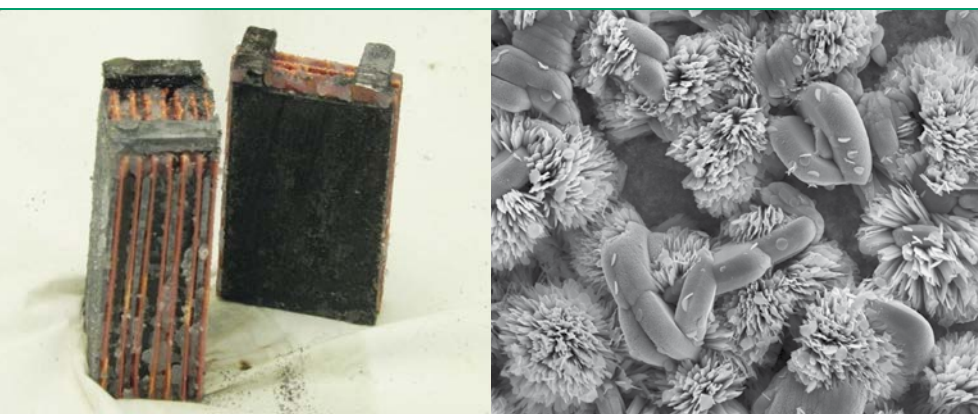
■ Prof. Dr.-Ing. Thorsten Gerdes leitet das Keylab Glastechnologie am Lehrstuhl für Keramische Werkstoffe der Universität Bayreuth.

toxisches Schwermetall hat Blei unter den Batteriewerkstoffen eine besondere Stellung. Viele etablierte Anwendungen, wie bleihaltige Bildschirmröhren, haben mittlerweile ihre technologische Bedeutung verloren. Andere Anwendungen, wie Blei in Metallloten, sind gesetzlich verboten. Daher stehen gut 80 Prozent des weltweit verfügbaren Bleis für die Verwendung in Blei-Batterien zur Verfügung.<sup>3</sup> Zudem sind die Recyclingraten im Vergleich zu anderen Batterierohstoffen sehr hoch. Das liegt nicht nur an der ausgereiften Recycling-Technologie, sondern in Deutschland auch an einem Pfandsystem für Blei-Säure-Batterien, das im Vergleich mit anderen Batterierohstoffen einmalig ist. Von den 370.000 Tonnen Blei, die jährlich hierzulande verarbeitet werden, stammen etwa 65 Prozent aus recyceltem Blei.<sup>4</sup>

stärksten mit Feuchtigkeit reagiert, muss die Fertigung der Batteriezellen unter absolut trockenen Bedingungen erfolgen. Schon heute kommt weit mehr als ein Drittel des weltweit geförderten Lithiums in Lithium-Ionen-Batterien zum Einsatz. Selbst vorsichtige Wachstumsprognosen sagen voraus, dass dieser Anteil bis zum Jahr 2025 auf zwei Drittel steigt.<sup>5</sup>

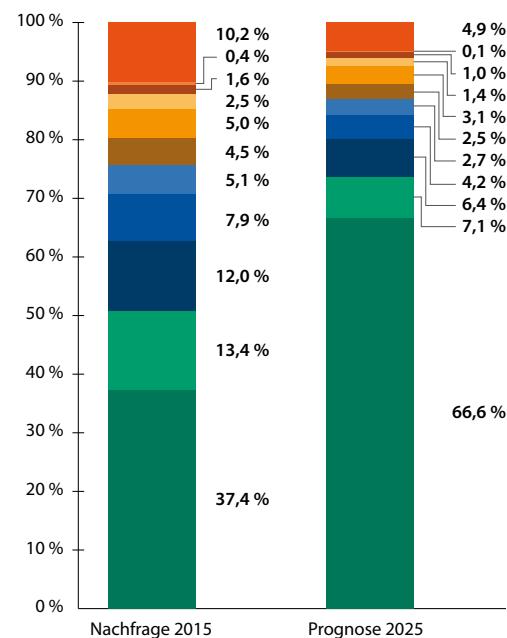
Als Rohstoffe für die Batterieherstellung dienen vor allem lithiumhaltige Mineralien, die insbesondere in Australien abgebaut werden, und lithiumhaltige Solvorkommen in Chile. Die Fördermenge aus beiden Ländern zusammen deckt zurzeit etwa 80 Prozent des globalen Lithiumbedarfs. Wegen der erwarteten hohen Bedarfssteigerungen bauen viele Länder ihre Förderkapazitäten aus oder nehmen stillgelegte Bergwerke wieder in Betrieb. Neue Bergbauprojekte werden gestartet. Der seit 2015 um mehr als das Dreifache gestiegene Lithiumpreis begünstigt auch den Abbau in Lagerstätten mit einem niedrigen Lithiumgehalt, der einen höheren Aufwand für die Aufarbeitung bedingt. In jüngster Zeit ist der Lithiumpreis allerdings so deutlich gefallen, dass die Wirtschaftlichkeit einiger Projekte schwieriger geworden ist.

Auch aus der Lagerstätte Zinnwald in Sachsen nahe der deutsch-tschechischen Grenze könnten zukünf-



■ Abb. 1: Links: Blei-Säure-Batterien post mortem. Rechts: Die Bildung von Bleisulfat-Kristallen hat zur Blockade der Bleielektrode geführt (Bilder: Tobias Michlik).

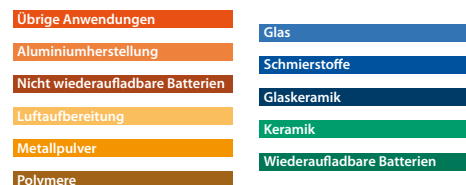
Als Starterbatterie in Fahrzeugen oder zur Sicherung einer unterbrechungsfreien Stromversorgung in Industrieanlagen sind Blei-Säure-Batterien gut geeignet. Sie besitzen eine ausreichende Zyklenstabilität, und das Preis-Leistungsverhältnis ist günstig. Die Zyklenstabilität sinkt jedoch drastisch, wenn die Entladetiefe steigt – beispielsweise bei Elektrofahrzeugen, die zwecks Energieeinsparung mit einer Start-Stopp-Automatik ausgestattet sind. In dieser Hinsicht besteht für diesen alten Batterietyp noch immer Entwicklungsbedarf. Vermutlich wird es noch bis ins Jahr 2025 dauern, bis die Jahrzehnte alte Dominanz der Blei-Batterien durch andere Batterietypen, insbesondere durch Lithium-Ionen-Batterien, abgelöst wird.



■ Abb. 2: Lithium-Nachfrage 2015 im Vergleich zur Prognose 2025 (Grafik: Andreas Gaube).  
 Quellen: Roskill Information Services Ltd.: Lithium: Global Industry, Markets & Outlook. London 2016 (Nachfrage 2015); DERA Rohstoffinformationen: Rohstoffrisikobewertung – Lithium. Berlin 2017 (Prognose 2025), vgl. Anm. 5. Dieser Prognose liegt ein Szenario zugrunde, in der das Gesamtnachfragewachstum 9,2 Prozent beträgt.

### Lithium

Lithium ist nicht nur in Gläsern, Glaskeramiken und Keramiken – beispielsweise in Kochfeldern oder Zahnersatz – ein wichtiger Bestandteil, sondern auch in Batterien. Weil es unter allen Alkalimetallen am







■ Abb. 3: Links: Teststand zur elektrochemischen Charakterisierung von Batterie-Experimentalzellen, rechts: Experimentalzellen zur elektrochemischen Analyse neuartiger Batterie-Werkstoffe (Fotos: Christian Wiffler).

tig nicht unerhebliche Mengen Lithium gefördert werden. Aktuelle Schätzungen gehen von 25 Millionen Tonnen Mineral aus, wobei der durchschnittliche Lithiumgehalt bei 0,45 Prozent liegt.<sup>6</sup> Das wichtigste Mineral in diesem Vorkommen ist das Zinnwaldit mit einem Lithiumgehalt von etwa 1,6 Prozent.<sup>7</sup>

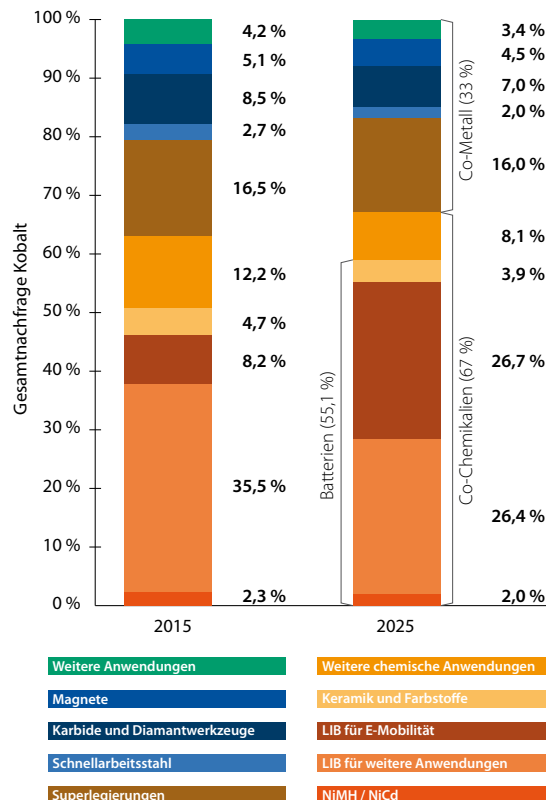
## Kobalt

Kobalt ist ein wichtiger Bestandteil in Superlegierungen, Hartmetallen, Stählen, Emailles und Gläsern. Fast die Hälfte der 2017 weltweit geförderten 117.000 Tonnen entfielen allerdings auf die Batterieherstellung. Häufig wird der Rohstoff Kobalt als besonders kritisch eingeschätzt: Er lässt sich nur bedingt durch andere Rohstoffe ersetzen, und die Vorkommen beschränken sich auf wenige Länder. So sind die DR Kongo mit über 64 Prozent, die Russische Föderation mit 4,6 Prozent und Australien mit 4,2 Prozent am weltweiten Kobaltabbau beteiligt.<sup>8</sup> Die DR Kongo ist der mit Abstand wichtigste Kobaltlieferant und besitzt mit 3,5 Millionen Tonnen etwa 48 Prozent der globalen Kobaltreserven. Das Länderrisiko – das aus unsicheren politischen, wirtschaftlichen und sozialen Verhältnissen resultiert – gilt in diesem zentralafrikanischen Staat als besonders hoch. Hier wird der Bergbau häufig mit Kinderarbeit und illegalem Kleinbergbau zur Finanzierung von Milizen in Verbindung gebracht.

Etwa 75 Prozent des weltweit benötigten Kobalts stammen aus industriellem Bergbau, 10 Prozent aus Recycling und etwa 13 Prozent aus Kleinbergbau. Zertifizierungen des Bergbaus und Kooperativen tragen heute dazu bei, die gravierendsten Missstände

der Vergangenheit zumindest teilweise zu unterbinden. Damit wird der Kleinbergbau, in dem im Kongo 150.000 bis 200.000 Menschen beschäftigt sind, auch zukünftig substantiell zum weltweiten Kobaltangebot beitragen.<sup>9</sup>

Infolge der wachsenden wirtschaftlichen Bedeutung der E-Mobilität, die auf Lithium-Ionen-Batterien angewiesen ist, wird sich die Kobaltnachfrage bis 2026



■ Abb. 4: Kobaltnachfrage nach Anwendungsbereichen im Jahr 2017 und 2026 (Grafik: Andreas Gaube). Daten aus S. Al Barazi: Rohstoffrisikobewertung – Kobalt. DERA Rohstoffinformationen 36. Berlin 2018.

## LITERATURTIPP

T. Michlik et al.: Improved Discharge Capacity of Zinc Particles by Applying Bismuth-Doped Silica Coating for Zinc-Based Batteries. Batteries (2019), Bd. 5, Heft 1.  
DOI:10.3390/batteries5010032.



■ Abb. 5: Die Bou Azzer-Kobaltmine im Anti-Atlas in Marokko (Foto: Sunart Media / Shutterstock.com).

- 1 Fraunhofer-Institut für System und Innovationsforschung ISI: Energiespeicher-Roadmap (Update 2017) – Hochenergie-Batterien 2030+ und Perspektiven zukünftiger Batterietechnologien. Karlsruhe 2017.
- 2 Die „graue Energie“ ist die Energie, die für Herstellung, Transport und Entsorgung eines Produktes benötigt wird.
- 3 S. Mohr, D. Giurco et al.: Global Projection of Lead-Zinc Supply from Known Resources, Resources (2018), 7(1), 17. DOI 10.3390/resources7010017.
- 4 Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Rohstoffwissenschaftliche Steckbriefe – Blei. Hannover 2018.
- 5 M. Schmidt: Rohstoffrisikobewertung – Lithium. DERA Rohstoffinformationen 33, Berlin 2017.
- 6 A. Stark: Lithium aus Sachsen soll Versorgungssicherheit für Batterien schaffen, Process – Chemie.Pharma. Verfahrenstechnik, 19. Feb. 2019.
- 7 Das Zinnwald-Lithium-Projekt: Lithiumverbindungen aus Deutschland. DERA Industrieworkshop 27. Juni 2017, Berlin.
- 8 S. Al Barazi: Rohstoffrisikobewertung – Kobalt. DERA Rohstoffinformationen 36: Berlin 2018.
- 9 S. Vetter: Aktuelle Entwicklung und Akteurslandschaft im kongolesischen Kleinbergbausektor, DERA Industrieworkshop zur Verfügbarkeit von Kobalt für den Industriestandort Deutschland. Berlin, 2. Juli 2018.
- 10 ebd.
- 11 U.S. Geological Survey: Mineral Commodity Summaries, 2018.
- 12 Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Preismonitor Oktober 2018.
- 13 Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Graphit – Rohstoffwirtschaftliche Steckbriefe, 03/2014.
- 14 U. Dörner: Rohstoffrisikobewertung – Zink. DERA Rohstoffinformationen 25. Berlin 2015.

voraussichtlich verdoppeln.<sup>10</sup> Diese Prognose berücksichtigt bereits, dass der Kobaltanteil in den Batterien sinken wird, weil stattdessen neue Kathodenwerkstoffe zum Einsatz kommen. Wie alle Rohstoffe wird sich auch Kobalt in den nächsten Jahren sehr wahrscheinlich verteuern. Diese Entwicklung begünstigt Investitionsentscheidungen zum Ausbau der Primärförderung, so dass mittelfristig keine Versorgungsengpässe zu befürchten sind.

## Graphit

Ohne Graphit keine Bleistifte. Noch bedeutender ist der Werkstoff in der Feuerfestindustrie, in Gießereien, in Bremsbelägen, als Elektrodenwerkstoff in der Metallurgie und eben auch in Batterien und Brennstoffzellen. Etwa 1,2 Millionen Tonnen Graphit-Flakes werden jährlich gefördert.<sup>11</sup> Davon besitzen aber nur 380.000 Tonnen eine ausreichende Qualität, um für Anoden in Lithium-Ionen-Batterien verwendet werden zu können. Das Besondere am Graphit ist, dass er nicht nur als natürliche Ressource verfügbar ist, sondern auch synthetisch hergestellt werden kann. Natürliche und synthetische Graphite ergänzen sich in ihren Vorzügen, so dass Batterieanoden durch deren Kombination optimiert werden können. Die Preise für Graphit sind mit etwa 1.000 Euro pro Tonne im Vergleich zu anderen Batterierohstoffen moderat und relativ konstant.<sup>12</sup> Gleichwohl gilt Graphit als kritischer Rohstoff – nicht wegen mangelnder Verfügbarkeit, sondern aufgrund der Tatsache, dass sich das weltweite Angebot auf China und Indien mit Marktanteilen von 71 bzw. 14 Prozent konzentriert.<sup>13</sup> In Bayern wird in der Graphitgrube Kropfmühl traditionell Graphit abgebaut. Der Betreiber des Bergwerks, die AMG Kropfmühl, entwickelt in einem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projekt die Veredelung des Graphits zu Graphenen. Diese zweidimensionalen Modi-

fikationen des Graphits werden in Bayreuth von der Firma Future Carbon und dem Institut für Innovative Verfahrenstechnik (InVerTec) zu neuen Silizium-Kohlenstoff-Anoden weiterverarbeitet. Diese Anoden zeichnen sich durch eine hohe Zyklenstabilität aus und eignen sich daher für eine neue Generation von Lithium-Ionen-Batterien.



■ Abb. 6: Arbeitsgruppe des Projekts „Coatemo“ im Graphit-Bergwerk Kropfmühl in Bayern. Hier gefördertes und zu Graphen veredeltes Material wird in Bayreuth zu Graphit-Silizium-Anoden für Lithium-Ionen-Batterien weiterverarbeitet (Foto: Hochschule Landshut).

## Zink

Zink ist ein gut verfügbarer, preiswerter und seit langem etablierter Rohstoff für Primärbatterien. Zu unterscheiden sind dabei Zink-Kohle-, Alkali-Mangan-, Silberoxid- oder Zink-Luft-Batterien. Jährlich werden auf dem Weltmarkt 13,7 Millionen Tonnen angeboten, die hauptsächlich für den Korrosionsschutz von Stahl, in Gusslegierungen oder als Bestandteil von Messing verwendet werden. Demgegenüber ist der Bedarf an Zink für Batterien von untergeordneter Bedeutung.<sup>14</sup> Allerdings wird Batteriezinke in sehr hoher Reinheit als feines Pulver benötigt, das genau definierte Dotierungen mit weiteren Metallen (Bismut, Indium) aufweist. Dadurch steigen die Herstellungskosten. Besonders häufig wird Zink heute in Primärbatterien für Hörgeräte eingesetzt.

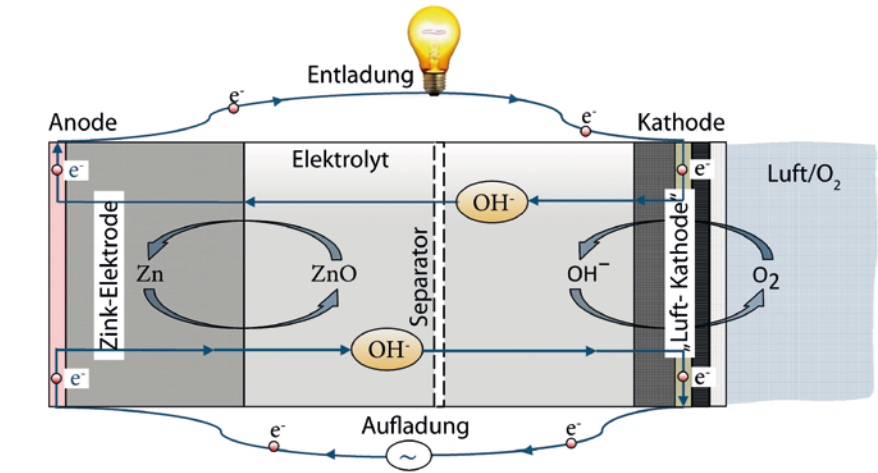
Zink-Luft-Batterien unterscheiden sich von anderen Zink-Batterien dadurch, dass Zink mit Luftsauerstoff reagiert und dabei oxidiert wird. Weil das Kathodenmaterial kein fester Bestandteil dieser Batterien ist, sind sie leicht und kompakt. Mit etwa 1.000 Wattstunden pro Kilogramm besitzen sie eine theoretische Energiedichte, die dreimal höher ist als die von Lithium-Ionen-Batterien. Der Traum der Batterieforscher ist daher eine wiederaufladbare Zink-Luft-Batterie, die diese hohe Energiedichte mit einer ho-



hen Zyklusstabilität verbindet, wie sie in modernen Lithium-Ionen-Batterien realisiert ist. Eine solche Sekundärbatterie ließe sich hervorragend recyceln, und die Rohstoffkosten wären gering.

Allerdings haben Zink-Luft-Batterien bis heute den Nachteil, dass sie vergleichsweise schnell altern. Denn während der Entladung der Anode bilden sich lösliche Zinkat-Ionen, die in hoher Konzentration eine elektrisch nicht leitfähige Zinkoxidschicht bilden. Dadurch nimmt die Leitfähigkeit der Anode und somit auch die Zyklusfähigkeit der Batterie stetig ab. Hier setzt das vom BMBF geförderte Projekt „PrintEnergy“ am Lehrstuhl für Werkstoffverfahrenstechnik an. Um die Zyklusfähigkeit zu verbessern, entwickeln die Forscher im Keylab Glastechnologie eine Glasbeschichtung für die in der Anode enthaltenen Zinkpartikel. Infolge der Beschichtung entsteht auf der Anode während des Entladens ein Gel-Elektrolyt, der die Zinkat-Ionen aufnimmt und dennoch elektrisch leitfähig bleibt. Um die Leitfähigkeit zu erhöhen und die Wiederaufladbarkeit der Batterie noch weiter zu verbessern, wird Bismutoxid in das Glasnetzwerk eingebaut.

Die Bayreuther Forscher arbeiten noch in einer weiteren Hinsicht an der Optimierung von Zink-Luft-Sekundärbatterien: Um die Verwendung des kritischen Rohstoffs Kobalt zu verringern, entwickeln sie für die Kathode dieser Batterien – die sogenannte Luftkathode – Werkstoffe, die nur wenig oder überhaupt kein Kobalt enthalten. Die Luftkathode unterscheidet sich von anderen Batteriekathoden dadurch, dass sie den für die Erzeugung elektrochemischer Energie benötigten Sauerstoff aus der umgebenden Luft bezieht. Sie gewährleistet eine kontinuierliche Zu- und Abfuhr des Sauerstoffs, weil sie im Wesentlichen aus einer gasdurchlässigen Schicht und einer



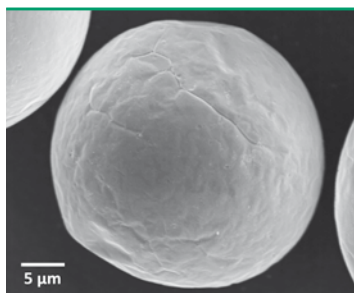
■ Abb. 7: Funktionsprinzip einer Zink-Luft-Sekundärbatterie (Grafik: Michael Fink).

katalytisch aktiven Schicht besteht. Erst die Vorgänge in dieser reaktiven Schicht ermöglichen die für die Auf- und Entladung der Batterie notwendigen Teilreaktionen: die Reduktion des Luftsauerstoffs ( $O_2$ ) und die erneute Oxidation des Entladeprodukts ( $OH^-$ ) zu Sauerstoff. Hinsichtlich ihrer hohen katalytischen Aktivität sind Edelmetalle wie Platin und Iridium für den Einsatz in Luftkathoden zwar geeignet, doch sie sind sehr teuer und wenig stabil. Die Bayreuther Forschungsarbeiten in diesem Bereich konzentrieren sich deshalb auf die Entwicklung von Katalysatormaterialien, die nicht nur möglichst wenig Kobalt enthalten, sondern auch frei von Edelmetallen sind.

Auch wenn die geologische Verfügbarkeit der Batterierohstoffe grundsätzlich gegeben ist, bleibt eine Ressourcenschonung durch Effizienzerhöhungen und Recyclingstrategien zwingend erforderlich, genauso wie die Entwicklung von Substitutionsstrategien. Forschung, Entwicklung und ein tiefgreifendes Verständnis der Werkstoffe bleiben daher für den nachhaltigen Umbau unserer Energieversorgung unabdingbar.

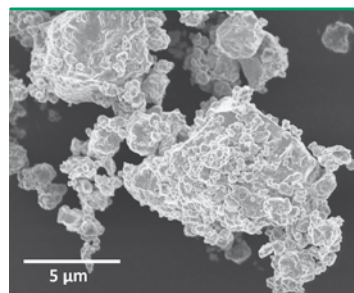


■ Abb. 8: Testzelle zur Untersuchung der elektrochemischen Eigenschaften der Aktivmaterialien (Foto: Michael Fink).



Zinkpartikel (Bi, In)

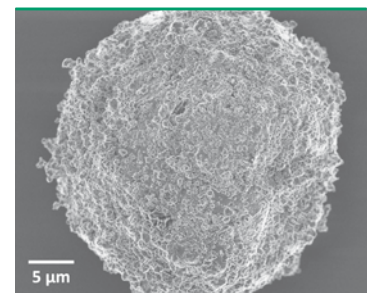
+



$Bi_2O_3$ -CaO-ZnO-Glas

⇒

mechanisches Beschichten



Funktionalisiertes Zinkpartikel

Der Lehrstuhl für Werkstoffverarbeitung an der Universität Bayreuth wurde von Prof. Dr. Monika Willert-Porada bis zu ihrem Tod im Dezember 2016 geleitet. Die Arbeiten werden zukünftig am Lehrstuhl für Werkstoffverfahrenstechnik von Prof. Dr.-Ing. Christina Roth und im Keylab Glastechnologie von Prof. Dr.-Ing. Thorsten Gerdes weitergeführt.

■ Abb. 9: Am Lehrstuhl für Werkstoffverfahrenstechnik werden glasbeschichtete Zink-Partikel als Anodenwerkstoff für wiederaufladbare Zink-Luft-Batterien entwickelt, um die noch unzureichende Zyklusstabilität zu verbessern (REM-Aufnahmen: Tobias Michlik).

# Alles im Fluss

## Flussbatterien speichern Sonnen- und Windenergie

■ Das Anwendungszentrum erneuerbare Energien am Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie (ICT) in Pfinztal koppelt ein Windrad mit Flussbatterien. Der Lehrstuhl für Werkstoffverfahrenstechnik an der Universität Bayreuth kooperiert mit dem ICT im Verbundvorhaben „DegraBat: Degradationsprozesse in All-Vanadium-Redox-Flow-Batterien“, das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert wird (Foto: Anwendungszentrum erneuerbare Energien am Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie ICT).

Wenn die Sonne scheint und der Wind weht, sind die besten Voraussetzungen erfüllt, um Energie aus erneuerbaren Quellen in unser Versorgungsnetz einzuspeisen. Leider wird Strom aber gerade zu diesen Zeiten eher weniger gebraucht, sondern beispielsweise dann, wenn frühmorgens und noch im Dunkeln zehntausende Bürger ihre Kaffeemaschine anschalten wollen. Um ein besseres Gleichgewicht zwischen Angebot und Nachfrage zu erzielen und resultierende Stromspitzen im Netz abzuf puffern, sind Flussbatterien (Redox Flow Batteries) eine interessante Option. Im Unterschied zu Lithium-Ionen-Batterien, die mit festen Elektrolyten arbeiten, wird die Energie in wässrigen Lösungen gespeichert. Pumpen bewirken, dass diese flüssigen Elektrolyte durch poröse Elektroden hindurchfließen. So wird die Batterie schnell geladen und im Bedarfsfall wieder entladen. Flussbatterien eignen sich für große stationäre Anwendungen, in denen die überschüssige Energie aus Windparks und Solarfeldern zwischengespeichert werden muss. Sie sind vergleichsweise wartungsarm und zeichnen sich dadurch aus, dass Energie (kWh) und Leistung (kW) über einen weiten Bereich variiert werden können.

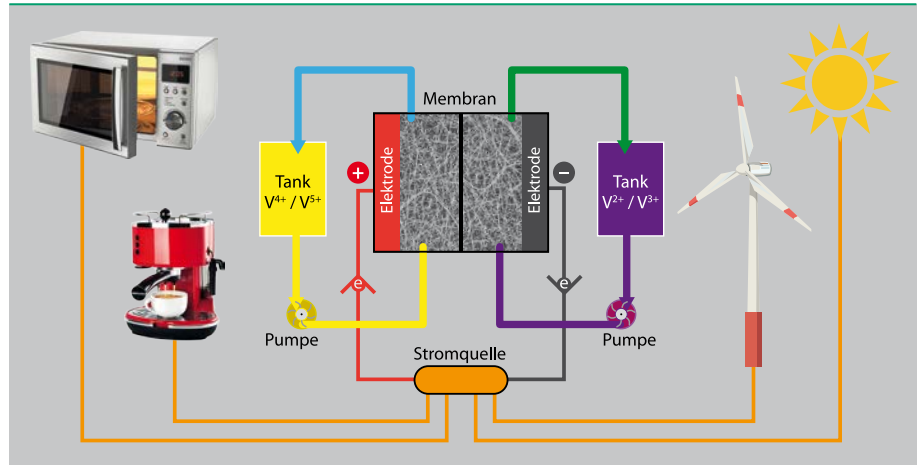
Bereits vor 70 Jahren wurde die Flussbatterie in einer Patentanmeldung von Walter Kangro als Verfahren zur Speicherung von elektrischer Energie vorgestellt.<sup>1</sup> In den Folgejahren wurde sie an der TU Braunschweig intensiv erforscht. In den 1980er Jahren entwickelte die Forschungsgruppe von Maria Skyllas-Kazacos an der University of New South Wales in Australien die Vanadium-Flussbatterie, die einen Meilenstein auf dem Weg zur Kommerzialisierung dieser technologischen Entwicklung darstellt.<sup>2</sup>

## Aufbau und Funktion der Vanadium-Flussbatterie

Das Besondere an einer Vanadium-Flussbatterie ist, dass ausschließlich Vanadium als Elektrolyt verwendet wird – und zwar in den verschiedenen Oxidationsstufen  $V^{2+}$  (violett) und  $V^{3+}$  (grün) sowie  $V^{4+}$  (blau) und  $V^{5+}$  (gelb). Diese Elektrolyt-Paare verteilen sich auf zwei Behälter (Tanks), die jeweils mit einer elektrochemischen Halbzelle in Verbindung stehen. Die beiden Halbzellen enthalten die Elektroden und sind durch eine nicht-leitende Polymermembran räumlich getrennt: An der Kathode in der positiven Halbzelle wird  $V^{5+}$  (gelb) zu  $V^{4+}$  (blau) reduziert, während an der Anode in der negativen Halbzelle  $V^{2+}$  (violett) zu  $V^{3+}$  (grün) oxidiert wird. Dabei fließt ein Ionenstrom durch die Polymermembran. Die komplet-

tären Prozesse von Reduktion und Oxidation haben beim Entladen der Batterie zur Folge, dass Elektronen an die Elektroden abgegeben und in einen äußeren Leiterkreis übertragen werden. Hier fließt der Strom, der in das Stromnetz eingespeist und vom Endverbraucher für den Betrieb elektrischer Geräte eingesetzt wird.

■ Abb. 1: Funktionsprinzip einer Vanadium-Flussbatterie. Weil sich in beiden Elektrolytbehältern Vanadium befindet, ist gewährleistet, dass die Elektrolyte nicht durch andere chemische Elemente verunreinigt werden (Grafik: Christina Roth / Christian Göppner / Andreas Gaube, Fotos: sst).



Mithilfe der Flussbatterie als Stromspeicher könnte also der koffeinbedürftige Bundesbürger morgens seine Kaffeemaschine mit Strom betreiben, der über Nacht zwischengespeichert wurde. Selbst wenn es viele morgendliche Kaffeetrinker in Bayreuth geben sollte, würden sie weder Netzschwankungen noch einen Stromausfall verursachen.

## Robuste Elektroden durch Kohlenstoff

Das in der Flussbatterie verwendete Vanadium ist ein Schwermetall und muss in verdünnter Schwefelsäure gelöst werden. Daraus ergeben sich gleich zwei Probleme:

- Es kann bislang nur eine vergleichsweise geringe Menge an Vanadium gelöst werden. Von der gelösten Menge hängt aber unmittelbar ab, wie viel Strom in der Batterie gespeichert werden kann. Daher werden derzeit Zusatzstoffe wie Phosphorsäure erforscht, um die Vanadiumkonzentration zu erhöhen.
- Die zum Lösen von Vanadiumsalzen verwendete Schwefelsäure ist sehr korrosiv. Die für die Elektroden verwendeten Materialien müssen daher besonders beständig sein, damit sie nicht durch den stetigen Kontakt mit den sauren Lösungen angegriffen werden. Die meisten korrosionsstabilen Materialien, zu denen hoch-

## AUTORIN



■ Prof. Dr.-Ing. Christina Roth ist seit April 2019 Inhaberin des Lehrstuhls für Werkstoffverfahrenstechnik an der Universität Bayreuth.



## LITERATURTIPPS

J. Noack et al.: The Chemistry of Redox-Flow Batteries, *Angewandte Chemie* (2015), Vol. 127, 9912-9947. DOI: 10.1002/anie.201410823.

A. Fetyan et al.: Comparison of Electrospun Carbon–Carbon Composite and Commercial Felt for Their Activity and Electrolyte Utilization in Vanadium Redox Flow Batteries, *ChemElectroChem* (2019), Vol. 6, 130-135. DOI: 10.1002/celec.201801128.



■ Abb. 2: Vanadium-Flussbatterien arbeiten mit vier wässrigen Vanadiumlösungen. Die Farben entsprechen den unterschiedlichen Oxidationsstufen des Vanadiums (Foto: Joachim Langner).

legierte Stähle und Edelmetalle wie Platin zählen, sind jedoch teuer. Kohlenstoffmaterialien sind daher eine spannende Alternative.

Aktuell werden Kohlenstofffilme – dies sind kommerziell erhältliche Gewebe aus Kohlenstofffasern – als poröse Elektroden verwendet. Durch diese Gewebe werden die sauren Vanadiumlösungen hindurchgepumpt. Kohlenstoff ist dafür aus mehreren Gründen gut geeignet: Er ist gegenüber den sauren Lösungen beständig, leitet die Elektronen gut und ist vergleichsweise preiswert. Allerdings sind die bislang verwendeten Kohlenstofffilme nicht für die Anwendung in Flussbatterien konzipiert. Ursprünglich wurden sie aufgrund ihrer flammhemmenden Eigenschaften als Ofenisolierung eingesetzt. Damit sie in der Lage sind, die Reduktion und Oxidation der Vanadiumlösung beim Laden bzw. Entladen der Flussbatterie zu katalysieren, müssen sie hierfür zunächst aktiviert werden. Dies kann beispielsweise im Ofen durch eine Temperaturbehandlung bei 400 Grad Celsius über eine Dauer von 30 Stunden unter Luftatmosphäre geschehen, oder auch durch den Kontakt mit stark oxidierenden Säuren. Dadurch steigt die Benetzbarkeit der Filme, so dass sich der Kontakt zwischen ihnen und der Vanadiumlösung verbessert. Zudem werden durch den Kontakt der Kohlenstoffoberfläche mit dem Luftsauerstoff funktionelle Gruppen erzeugt, welche die jeweils gewünschte Reduktion oder Oxidation des Vanadiums beschleunigen. Wie dieser Mechanismus genau funktioniert, ist in der Forschung bisher noch nicht hinreichend geklärt.

Kohlenstofffilme sind somit als Werkstoffe für korrosionsbeständige Elektroden in Flussbatterien prinzipiell geeignet. Doch die bisher verwendeten handelsüblichen Gewebe haben eine Reihe von Nachteilen, die nach wie vor eine Herausforderung für Forschung und Entwicklung darstellen:

- Die Elektroden besitzen nur eine vergleichsweise kleine Oberfläche für katalytische Reaktionen.
- Die Benetzbarkeit der Elektroden und ihre Reaktionsfähigkeit werden durch die aktivierende Vorbehandlung zwar verbessert, aber ihre katalytische Leistungsfähigkeit ist immer noch sehr begrenzt.
- Die Vorbehandlung erfordert zwar keinen hohen Aufwand, doch es stellt sich die Frage, ob sie beim Hersteller der Kohlenstofffilme oder beim Kunden vorgenommen werden soll. Dies ist vor allem bei Haftungsfragen wichtig. Wer übernimmt die Haftung, wenn die Filzaktivierung nicht zum gewünschten Erfolg führt?

Filzhersteller sind deshalb im engen Kontakt mit der Wissenschaft, um diese Nachteile zu beseitigen. Das Ziel ist es, die Elektroden mit Oberflächen zu versehen, die unmittelbar aktiv sind und keiner zusätzlichen Aktivierung bedürfen, um ihrer Rolle als Katalysatoren gerecht zu werden. Wenn sich derart optimierte Filme industriell fertigen ließen, könnten sie vom Hersteller ohne Vorbehandlung an die Batterieproduzenten ausgeliefert und direkt in der Flussbatterie verbaut werden.

**„Flussbatterien eignen sich für große stationäre Anwendungen, in denen die überschüssige Energie aus Windparks und Solarfeldern zwischengespeichert werden muss.“**



■ Abb. 3: Dr. Igor Derr, ehemaliger Doktorand in der Arbeitsgruppe von Prof. Dr.-Ing. Christina Roth, beim Laboraufbau zur Testung der Batterieleistung (Foto: Manoj Krishna Kayarkatte).

### Innovative Strategien zur Optimierung der Elektroden

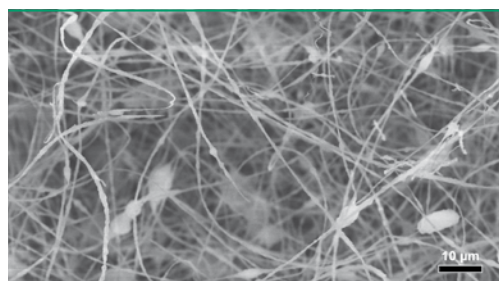
Auch der Lehrstuhl für Werkstoffverfahrenstechnik an der Universität Bayreuth befasst sich mit der Herausforderung, die Elektroden von Flussbatterien zu optimieren. In den letzten Jahren hat die Arbeitsgruppe um Prof. Dr.-Ing. Christina Roth an der FU Berlin eine Reihe von neuen Ansätzen verfolgt:

- Grundlegend für eine Optimierung der Elektroden ist ein besseres Verständnis der Prozesse, die ablaufen, wenn eine Batterie immer und immer wieder geladen und entladen wird. Dabei nimmt die Energiemenge, die gespeichert und freigesetzt werden kann, kontinuierlich ab. Um dieses Alterungsphänomen in kommerziell erhältlichen Filzelektroden besser zu verstehen, wird unter anderem die elektrochemische Impedanzspektroskopie angewendet. Bei diesem Verfahren bestimmt man den Widerstand

des Wechselstroms und setzt ihn mit seiner Frequenz in Beziehung. Dabei ist es wichtig, den durch die Degradation der Elektroden verursachten Leistungsverlust von der Alterung anderer Komponenten der Batterie – wie etwa der Polymermembran oder der Vanadiumlösung – zu unterscheiden. Die durch die elektrochemischen Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse können dazu beitragen, der Alterung der Filzelektroden durch eine entsprechende Vorbehandlung entgegenzuwirken.<sup>3</sup>

■ Eine andere Strategie zur Optimierung der Elektroden zielt darauf ab, die zu ihrer Aktivierung notwendige Vorbehandlung unter Luft überflüssig zu machen. Dafür werden kommerziell erhältliche Filze – bevor sie in die Elektroden eingesetzt werden – mit einer zweiten Kohlenstoffphase überzogen, so dass ein Kohlenstoff-Kohlenstoff-Komposit entsteht. Während die Fasern im Filz hauptsächlich Elektronen leiten, hat der Kohlenstoffüberzug eine katalytische Funktion. Er soll die Reaktion im Kontakt mit der Vanadiumlösung beschleunigen.<sup>4</sup>

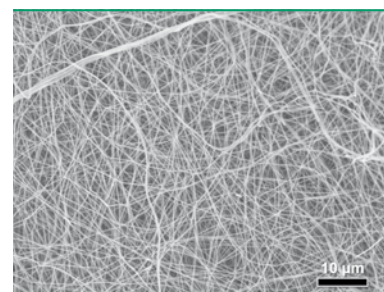
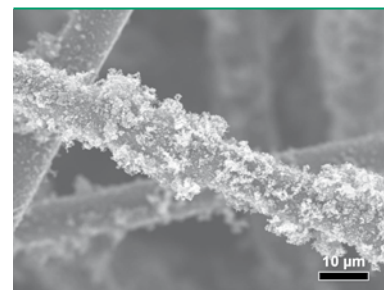
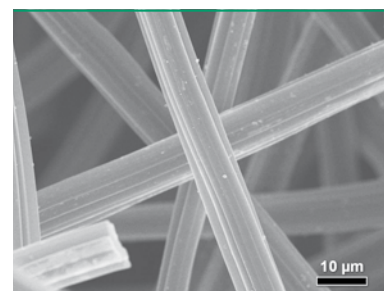
■ Eine weitere Strategie verzichtet ganz auf die kommerziellen Filze. Sie wendet das Elektrospleinverfahren an, um die benötigten Kohlenstoffelektroden selbst herzustellen. Beim *Electrospinning* wird eine Kunststofflösung durch Anlegen einer Hochspannung zwischen Nadelspitze und Sammlerplatte aus der Spitze „gezogen“, verwirbelt und ähnlich



wie Zuckerwatte auf der Sammlerplatte abgelegt. Während der Herstellung des Gewebes lassen sich die Hochspannung, der Abstand zwischen Nadelspitze und Sammlerplatte sowie die Viskosität der Lösung variieren. Auf diese Weise erhält man die unterschiedlichsten Strukturen, zum Beispiel verschiedene Faserdurchmesser, Porengrößen und Verzweigungen. Da das Polymergewebe unmittelbar nach der Herstellung noch nicht elektronenleitend ist, muss es bei mindestens 1.700 Grad Celsius unter Inertgas im Ofen geheizt werden. Übrig bleibt ein Kohlenstofffilz, der eine 100fach größere Oberfläche als die kommerziellen Elektroden hat und deshalb viel leistungsfähiger ist.<sup>5</sup>

### Alternative Werkstoffe für bessere Umweltverträglichkeit

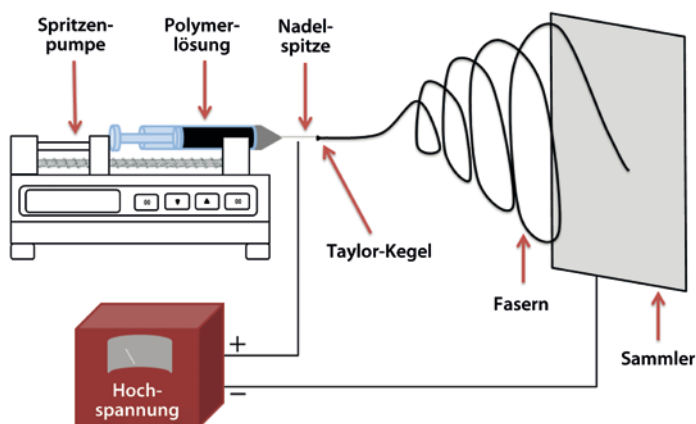
Künftig werden auch die Verfügbarkeit von Batterierohstoffen und deren Rückführung in den Stoffkreislauf stärker ins Zentrum der Forschungsprojekte auf dem Bayreuther Campus rücken. Was geschieht, wenn eine Batterie nicht mehr genügend Energie speichern kann, weil sie sich über ihre Lebensdauer erschöpft hat? Unter dem Aspekt des Recyclings ist Vanadium als Schwermetall sicher nicht die erste Wahl. Ein neuer, an der Universität Jena entwickelter Forschungsansatz zielt darauf ab, das Vanadium durch recycelbare Polymere zu ersetzen.<sup>6</sup> In diesem Fall sind Polymere, die Ladungen aufnehmen und wieder abgeben, entscheidend für die Speicherkapazität der Batterie. An der Universität Bayreuth werden in einem interdisziplinären Team verstärkt Eisensysteme ins Visier genommen und daraufhin untersucht, ob sie als besser verfügbare Werkstoffe das Vanadium ersetzen können. Von beiden Alternativen verspricht man sich im Vergleich mit Vanadium nicht allein eine bessere Umweltverträglichkeit, sondern auch einen erheblichen Preisvorteil.



Kohlenstoffmaterialien im Rasterelektronenmikroskop:

- Abb. 4: Kommerzielle Filzelektrode (Bild: Abdulmonem Fetyan).
- Abb. 5: Kohlenstoff-Kohlenstoff-Komposit mit salzstangenähnlichen Fasern (Bild: Maike Schnucklake).
- Abb. 6: Ein in der AG Roth elektrospinnenes Gewebe mit 100fach größerer Oberfläche (Bild: Abdulmonem Fetyan).
- Abb. 7 (links): Rasterelektronische Aufnahme von Fasern mit Spindelstruktur, die mit dem Elektrospleinverfahren erzeugt werden können (Bild: Mahboubeh Maleki).

■ Abb. 8: Das Prinzip des Elektrospleinverfahrens (Grafik: Abdulmonem Fetyan).



- 1 W. Kangro, DE Patent 914264 (1949).
- 2 E. Sum et al.: Investigation of the V(V)/V(IV) system for use in the positive half-cell of a redox battery, *Journal of Power Sources* (1985), Vol. 16, 85-95. DOI: 10.1016/0378-7753(85)80082-3.
- 3 J. Schneider et al.: Degradation phenomena of bismuth-modified felt electrodes in VRFB studied by electrochemical impedance spectroscopy, *Batteries* (2019), 5(1), 16. DOI: 10.3390/batteries5010016.
- 4 M. Schnucklake et al.: Salt-templated porous carbon-carbon composite electrodes for application in vanadium redox flow batteries, *Journal of Materials Chemistry A* (2017), 5, 25193-25199. DOI: 10.1039/C7TA07759A.
- 5 A. Fetyan et al.: Electrospun Carbon Nanofibers as Alternative Electrode Materials for Vanadium Redox Flow Batteries, *ChemElectroChem* (2015) 2, 2055-2060. DOI: 10.1002/celc.201500284; siehe auch Literaturtipps: A. Fetyan et al., *ChemElectroChem* (2019).
- 6 Vgl. die Pressemitteilung vom 5. Juli 2017: <https://idw-online.de/de/news698945>.





■ Autorenteam des Lehrstuhls für Funktionsmaterialien

# Prozesstechnologien für neue Festelektrolyte

Innovationen für die Lithium-Ionen-Batterie der Zukunft

■ Forschungsarbeiten zum Zellaufbau einer Lithium-Ionen-Batterie und ihrer Prüfung (Foto: Christian Wißler).

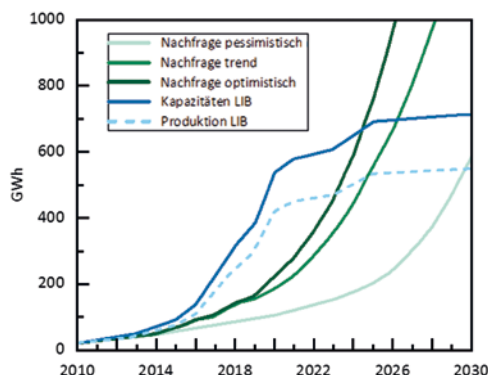
Primärbatterien und Akkumulatoren – letztere lassen sich wiederaufladen und werden auch als Sekundärbatterien bezeichnet – sind heute allgegenwärtig. Das Spektrum der Anwendungen reicht von einfachen Geräten wie Uhren, Fernsteuerungen und Akkuwerkzeugen über Smartphones, Tablets, E-Bikes und elektrischen Kraftfahrzeugen bis hin zu netzunabhängiger dezentraler Energieversorgung.

Je nachdem, in welchen Anwendungsbereichen sie später eingesetzt werden sollen, weisen Batterien unterschiedliche Eigenschaften auf, die für ihre Eignung ausschlaggebend sind. An erster Stelle steht jedoch für alle Batterietypen der sichere Betrieb der Batterie. Das Verhindern von Selbstentzündung und die Toxizität der Materialien sind dabei wichtige Kenngrößen. Zudem müssen Batterien auch im Hinblick auf die folgenden Parameter den jeweiligen Anwendungen genügen:

- **Energiedichte:**  
*gravimetrisch:* das Verhältnis der speicherbaren Energie zum Batteriegewicht  
*volumetrisch:* das Verhältnis der speicherbaren Energie zum Batterievolumen
  
- **Leistungsdichte:**  
*gravimetrisch:* das Verhältnis der abrufbaren Leistung zum Batteriegewicht  
*volumetrisch:* das Verhältnis der abrufbaren Leistung zum Batterievolumen

Akkumulatoren in Smartphones sollen bei möglichst geringem Platzbedarf ausreichend Energie enthalten, um einen langen Betrieb zu gewährleisten. Von Akkumulatoren für E-Autos hingegen wird neben einer hohen Energie- auch eine hohe Leistungsdichte verlangt, damit Energie schnell eingespeichert bzw. abgerufen werden kann. Zudem müssen Akkumulatoren langlebig sein – sowohl im Falle ihrer Lagerung (kalendarische Lebensdauer) als auch im Hinblick auf häufiges Auf- und Entladen (zyklische Lebensdauer). Weil die Elektromobilität ständig zunimmt, geht man mittelfristig davon aus, dass der Bedarf an Batteriespeicher-Kapazität stark wächst (Abb. 1).

Um den künftigen Anforderungen an Energie- und Leistungsdichte sowie der hohen Nachfrage nachkommen zu können, sind grundlegende Neuerungen und Innovationen erforderlich. Diese betreffen zunächst die verwendeten Materialsysteme, darüber hinaus das Design der Batteriezellen und schließlich die Ebene des Gesamtsystems.<sup>1</sup> Zuletzt konkurriert die fertige Batterie auf dem Markt mit weiteren Ener-



■ Abb. 1: Prognostizierte Entwicklung von weltweitem Bedarf, Kapazitäten und Produktion von Lithium-Ionen-Batterien bis 2030.<sup>2</sup> (Grafik: Dominik Hanft).

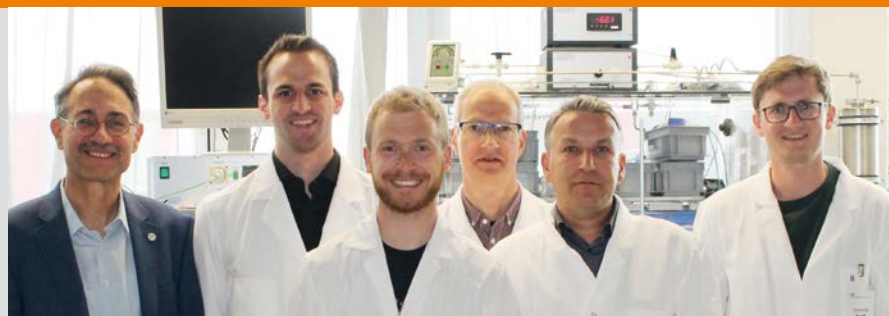
giespeichern. Dadurch sind die Kosten für den Verbraucher ein entscheidender Faktor. Diese hängen wiederum direkt von den Verarbeitungskosten sowie der Verfügbarkeit, der Recyclingfähigkeit und vor allem von den Preisen der verwendeten Materialien ab.

### Lithium-Ionen-Batterien

Eine konventionelle Lithium-Ionen-Batterie (LIB) enthält – vereinfacht dargestellt – vier Komponenten: Die beiden Elektroden, die Kathode einerseits und die Anode andererseits, bestehen aus zwei verschiedenen energiespeichernden Materialien. Zwischen ihnen befindet sich ein flüssiger Elektrolyt und ein Separator. Dieser sorgt dafür, dass die Elektroden keinen direkten Kontakt zueinander haben, der zu einem internen Kurzschluss führen würde. Um die Batterie zu entladen, wird zwischen den Elektroden über elektronische Ableiter ein Kontakt hergestellt, so dass elektrischer Strom von der Anode zur Kathode fließt. Gleichzeitig fließt im Inneren der Batterie ein ionischer Strom von der Anode zur Kathode. Neben den Elektrodenmaterialien kommt auch dem Elektrolyten eine besondere Rolle zu: Er muss

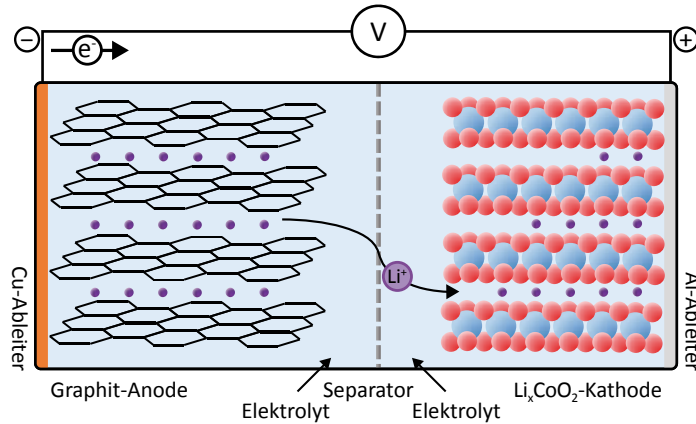
„Die keramischen Festelektrolyte weisen häufig einen sehr weiten elektrochemischen Stabilitätsbereich auf.“

### AUTOREN



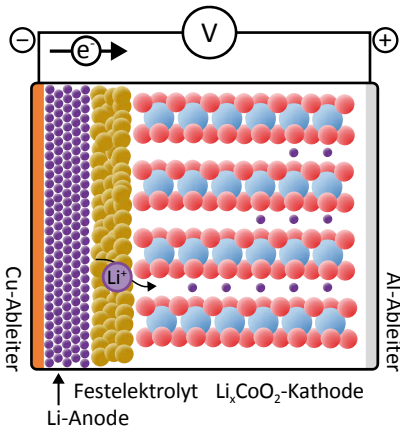
■ Das Autorenteam des Lehrstuhls für Funktionsmaterialien: Prof. Dr.-Ing. Ralf Moos, Dipl.-Ing. Tobias Nazarenus, Yannick Jännsch M.Sc., Dr. Martin Hämmerle, Dr.-Ing. Jaroslaw Kita, Dipl.-Ing. Dominik Hanft (v.l.n.r.).





$W_{vol} : +70\%$

$W_{grav} : +40\%$



eine möglichst hohe ionische Leitfähigkeit und eine möglichst geringe elektronische Leitfähigkeit aufweisen. Zugleich muss er (elektro-)chemisch stabil gegenüber den benachbarten Komponenten, der Anode und der Kathode, sein. Dies stellt eine große Herausforderung bei der Suche nach neuen geeigneten Materialien dar.

### Materialien im Fokus von Forschung und Entwicklung

Die Materialien, die derzeit in den gängigen Lithium-Ionen-Batterien verwendet werden, stehen nicht zuletzt aufgrund geopolitischer Aspekte in den Förderländern im Blickpunkt des öffentlichen Interesses. So werden kathodenseitig häufig Mischoxide auf Basis von Kobalt-, Nickel- und Manganoxid als Aktivmaterialien genutzt. Begründet liegt die Wahl für die Zusammensetzung der Mischoxidverbindung in den hohen Zellspannungen, die mit diesen Komponenten erzielbar sind, sowie den Rohstoffpreisen. Weitere Vorzüge der Mischoxide sind die vergleichsweise große gravimetrische und volumetrische Kapazität zur raschen reversiblen Einlagerung von Lithium-Ionen sowie eine hohe Zyklenstabilität und eine hohe Coulomb-Effizienz.

Bei dieser Art von Aktivmaterialien handelt es sich um Interkalations-Werkstoffe, die ähnlich einem Schwamm beim Entladen des Akkumulators Lithium-Ionen aufnehmen und beim Laden Lithium-Ionen abgeben können. Während der Lade-Entlade-Zyklen bleibt das Grundgerüst erhalten, und freie Plätze im Kristallgitter können ähnlich wie die Poren eines Schwamms besetzt werden.

Anodenseitig wird nach derzeitigem Stand der Technik Graphit als Interkalations-Werkstoff gewählt. Um die Speicherkapazität auf der Anodenseite weiter

zu steigern, werden Siliziumpartikel bei der Herstellung der Anode in geringen Mengen zugegeben. Silizium besitzt eine sehr hohe Speicherkapazität, ist allerdings mit einer besonderen Herausforderung verbunden: Das Laden und Entladen geht jeweils mit einer extremen Volumenänderung der Silizium-Partikel einher. So kommt es zu mechanischen Spannungen und infolgedessen zu Kontaktverlusten. Deshalb sinkt, je öfter der Akkumulator zyklert – also geladen und entladen wird –, seine Energiedichte und somit auch seine Lebensdauer erheblich.

Eine mögliche, derzeit diskutierte Alternative zur Verwendung von Graphit und Siliziumpartikeln besteht darin, metallisches Lithium als Anodenmaterial zu verwenden. Auf diese Weise könnte die Zellspannung weiter erhöht und die Kapazität erheblich gesteigert werden. Im zyklischen Betrieb würde die Anode stetig ab- und wieder aufgebaut werden. Zur verbesserten Anbindung an den Stromkollektor kann dabei ein Lithiumüberschuss verwendet werden.

Festelektrolyte auf polymerer oder (glas-)keramischer Basis gelten als aussichtsreiche Technologie, die eine kommerzielle Realisierung von metallischem Lithium als Elektrodenwerkstoff ermöglichen kann. Insbesondere die keramischen Festelektrolyte weisen häufig einen sehr weiten elektrochemischen Stabilitätsbereich auf, sodass es nicht – wie bei flüssigen Elektrolyten üblich – zu einer Zersetzung des Elektrolytwerkstoffes an den Elektroden kommen kann. Zudem kann durch die Verwendung eines keramischen Ionenleiters die Betriebssicherheit gesteigert werden, da dieser weder ausläuft noch entflammbar ist. Zwar hat Keramik ein höheres spezifisches Gewicht als flüssige Elektrolyte, aber diesem Nachteil kann man durch eine Anpassung des Zelldesigns begegnen. Die mechanische Stabilität der Keramiken soll der Gefahr von Kurzschlüssen entgegenwirken. Zudem würde bei Verwendung von Festelektrolyten die Selbstentladung keine Rolle mehr spielen.

### Neue Wege in Bayreuth: Die aerosolbasierte Kaltabscheidung

Obwohl die Forschungsaktivitäten im Bereich der Werkstoffe in den vergangenen Jahren signifikant zugenommen haben und obwohl es gelungen ist, die technische Funktionalität von Festkörperbatterien im Labormaßstab darzustellen, fehlt es bis dato an Prozesstechnologien für eine Massenfertigung

■ Abb. 2: Schematische Darstellung des Aufbaus verschiedener Batteriekonzepte. Oben: Kommerzielle Lithium-Ionen-Zelle mit  $\text{LiCoO}_2$ -Kathode, flüssigem Elektrolyt und Graphit-Anode. Unten: Konzept einer Feststoffbatterie mit  $\text{LiCoO}_2$ -Kathode, Festelektrolyt und Li-Metall-Anode. Im Vergleich zur konventionellen Zelle ergeben sich für Feststoffbatterien deutlich höhere gravimetrische und volumetrische Energiedichten ( $W_{grav}$  und  $W_{vol}$ ) (Bild: Yannick Jännsch / Tobias Nazareus, bearb. von Christian Göppner).

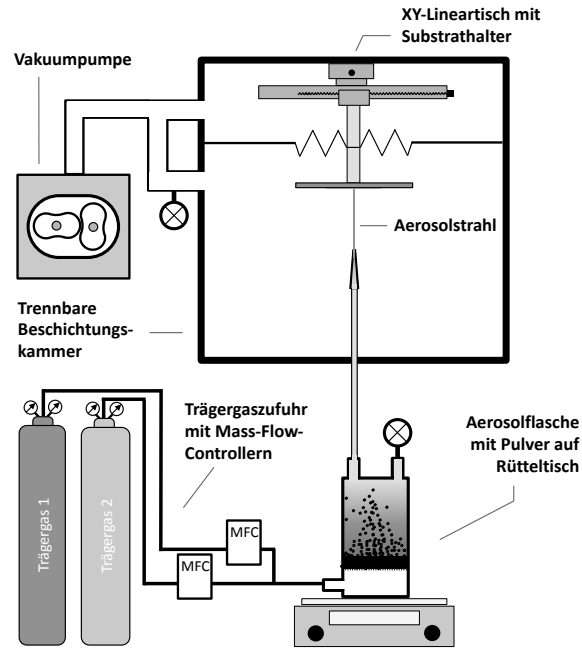
1 Vgl. T. Placke et al.: Lithium ion, lithium metal, and alternative rechargeable battery technologies: the odyssey for high energy density. *J. Solid State Electrochem.* (2017), 21, 1939-1964. DOI: 10.1007/s10008-017-3610-7; J. Janek, W.G. Zeier: A solid future for battery development. *Nat. Energy* (2016), 1, 16141. DOI: 10.1038/nenergy.2016.141.  
2 Daten nach A. Thielmann et al: *Energiespeicher-Roadmap (Update 2017): Hochenergie-Batterien 2030+ und Perspektiven zukünftiger Batterietechnologien.* Karlsruhe 2017.

von Lithium-Ionen-Batterien mit den genannten (glas-)keramischen Festelektrolyten. Die Erzeugung von dichten keramischen Festelektrolytschichten, die nur wenige Mikrometer dick sind, stellt eine große Herausforderung an die Prozesstechnik dar. Es sollen gezielt Schichten erzeugt werden, die nicht einmal halb so dick sind wie ein menschliches Haar, das einen Durchmesser von rund 60 Mikrometern hat. Die konventionelle keramische Prozesstechnik ist geprägt von hohen Verarbeitungstemperaturen und dementsprechend hohen Anlagen- und Betriebskosten.

Am Lehrstuhl für Funktionsmaterialien der Universität Bayreuth werden daher mit einem neuartigen keramischen Beschichtungsverfahren neue Wege beschritten. Die aerosolbasierte Kaltabscheidung (Powder Aerosol Deposition Method) ermöglicht erstmals die Herstellung von Dickschichten bei Raumtemperatur direkt aus den keramischen Ausgangspulvern. Dieses Sprühbeschichtungsverfahren zeichnet sich dadurch aus, dass Schichten im Bereich von wenigen Mikrometern bis hin zu mehreren hundert Mikrometern kostengünstig hergestellt werden können. Dabei werden die keramischen Partikel auf nahezu Schallgeschwindigkeit beschleunigt und auf die zu beschichtende Oberfläche gelenkt. Die Partikel bilden hier eine dichte nanokristalline Schicht. Charakteristisch für den Prozess ist zudem eine exzellente Anbindung an verschiedenste Grundmaterialien. So ist es ein Alleinstellungsmerkmal des Verfahrens, dass neben keramischen und metallischen Werkstoffen auch Gläser und sogar Kunststoffe beschichtet werden können.

Daraus ergeben sich hochinteressante Anwendungen auf dem Gebiet der Batterieentwicklung: Die starke Anbindung der keramischen Beschichtungen schafft die Voraussetzung für den Aufbau der Elektrolytschicht auf dem Kathodensubstrat. Ferner ist durch die annähernd freie Wahl der Prozessgase und die geringen Prozesstemperaturen eine inerte Verarbeitung von feuchtempfindlichen und reaktiven Werkstoffen möglich. Dies trifft auf die meisten gängigen Festelektrolyte für künftige Lithium-Ionen-Batterien zu. Besonders interessant für den Aufbau einer „All-Solid State Battery“ ist, dass hier der direkte Verbund von Elektrolyt und Kathode möglich ist, ohne die Wärmeausdehnungskoeffizienten und die chemische Stabilität des Grenzbereichs bei erhöhter Temperatur beider Komponenten beachten zu müssen.

■ Abb. 4: Forschungsspektrum des Lehrstuhls für Funktionsmaterialien im Bereich der Energietechnik (Grafik: Dominik Hanft, Bilder: sst).



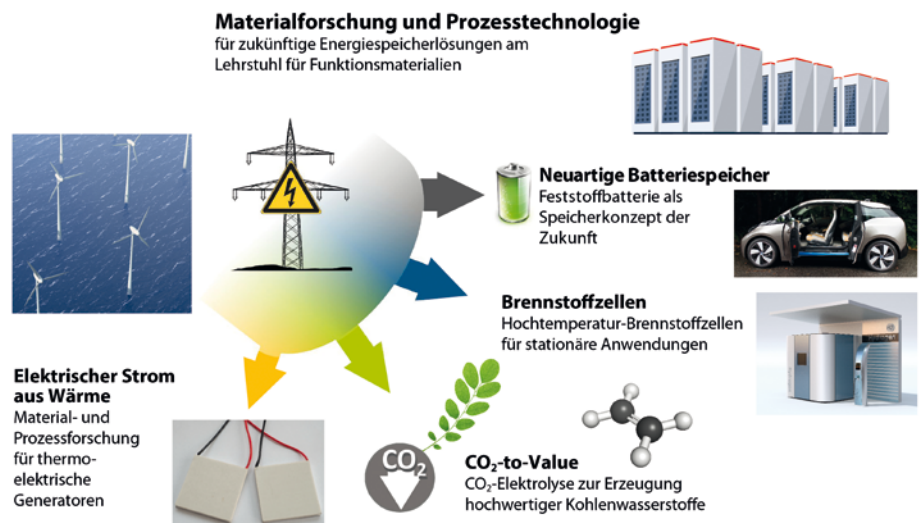
■ Abb. 3: Schematische Darstellung einer Anlage zur Aerosol-Beschichtung aus dem keramischen Pulver (Grafik: LS für Funktionsmaterialien).

### Ausblick

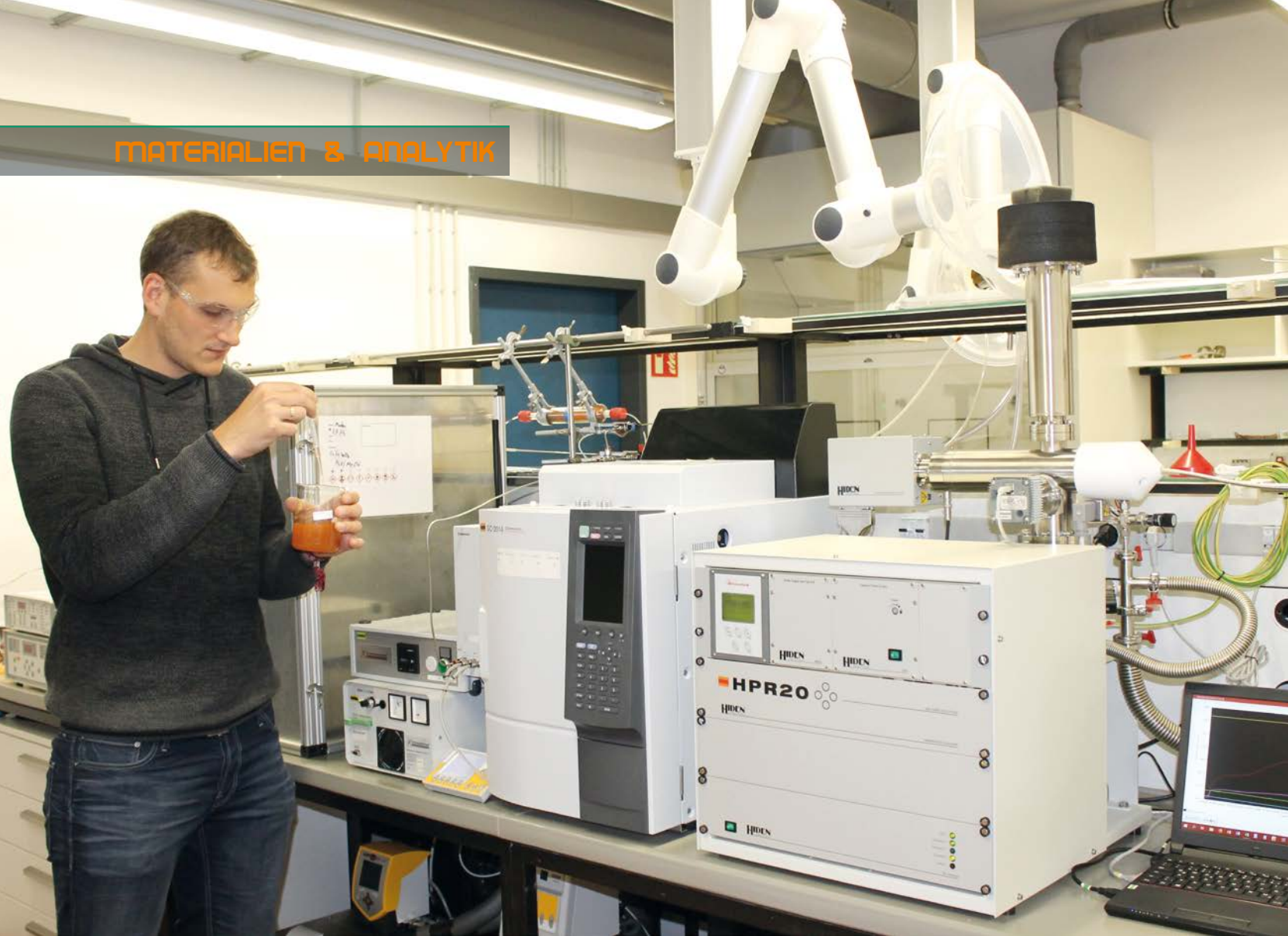
Neben der Erforschung der Materialien und der Prozesstechnologie für neuartige Akkumulatoren erstreckt sich die Forschung am Lehrstuhl für Funktionsmaterialien auf weitere Bereiche der Energiespeicherung und -wandlung. So werden Materialien für thermoelektrische Generatoren erforscht, die Wärmeenergie direkt in elektrische Energie umwandeln können. Bei der elektrochemischen CO<sub>2</sub>-Reduktion wird elektrische Energie – zum Beispiel als Überschussenergie aus erneuerbaren Energiequellen wie Wind oder Photovoltaik – zur Produktion von Kohlenwasserstoffen aus CO<sub>2</sub> in einem Elektrolyseprozess eingesetzt. Auf diesem Gebiet forscht der Lehrstuhl an Katalysatormaterialien (Elektrodenmaterialien) und einer geeigneten Prozessführung, um Ausbeuten, Selektivitäten und Prozessstabilitäten zu verbessern.

### LITERATURTIPP

D. Hanft et al.: An Overview of the Aerosol Deposition Method: Process Fundamentals and New Trends in Materials Applications. J. Ceram. Sci. Technol. (2015), 6, 147-182. DOI: 10.4416/JCST2015-00018.







■ Roland Marschall

# Nanostrukturierte Oxide

Funktionelle Materialien für die elektrochemische Energiespeicherung und -wandlung

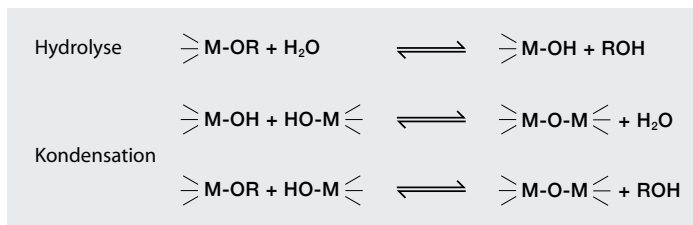
■ Eine Suspension von  $MgFe_2O_4$ -Nanopartikeln wird für die Untersuchung in der Photokatalyse / Wasserspaltung per Gaschromatograph vorbereitet (Foto: Christian Wisfler).

**F**unktionelle Materialien aus der Klasse der Metalloxide haben in vielfältiger Form Einzug in unseren Alltag gefunden. Insbesondere im Bereich der Kleinelektronik, sei es in Touchscreens oder Li-Ionen-Akkumulatoren, aber auch in täglichen Gebrauchsgegenständen wie Zahnpasta sind sie allgegenwärtig. Metalloxide sind Verbindungen aus Metallen und Sauerstoff. Sie kommen in einer Vielzahl von Zusammensetzungen und Kristallstrukturen vor, die sich durch die darin enthaltenen Metalle, das Zusammensetzungsverhältnis und die Größe der aufbauenden Atome (Metall-Kationen und Sauerstoff-Anionen  $O^{2-}$ ) unterscheiden.

Damit Metalloxide genau diejenigen Eigenschaften besitzen, die im jeweiligen Kontext für eine optimale Anwendung erforderlich sind, ist es notwendig, dass sich ihre Herstellung auf einfache Weise entsprechend modifizieren lässt. Zur Herstellung von Metalloxiden gibt es zahlreiche Möglichkeiten: nasschemische Methoden, Hydrothermalsynthesen und Festphasenreaktionen. Nasschemische Methoden – sie gehören in den Bereich der Sol-Gel-Chemie – bieten den Vorteil, dass man dabei Metalloxide in Form von maßgeschneiderten Morphologien erhalten kann. Diese lassen sich beispielsweise für die Beschichtung von Bauteilen einsetzen.

Bei der Sol-Gel-Synthese werden Kationen enthaltende Startverbindungen mit Alkoholen oder Wasser zur Reaktion gebracht. Diesen Vorgang nennt man Alkoholyse bzw. Hydrolyse (Abb. 1). Im Anschluss oder parallel können die entstehenden OH-Gruppen kondensieren und so ein Netzwerk ausbilden: *Es entsteht ein Sol*. Mit fortlaufender Reaktionszeit kondensiert das Netzwerk und wird unter dem Einfluss des zu Beginn eingebauten Lösungsmittels immer viskoser: *Es entsteht ein Gel*. Wenn man dieses Gel nun mit Temperaturen von mehr als 100 Grad Celsius behandelt, verliert das Netzwerk seinen Gel-Charakter, Wasser und Alkohol werden entfernt: *Es entsteht das Metalloxid*.

In den letzten Jahrzehnten haben Chemiker im Detail untersucht, welche physikalischen Parameter diese Art der Synthese beeinflussen – mit der Folge, dass sie heute in der Lage sind, die einzelnen Schritte in ihrer Geschwindigkeit zu kontrollieren. Dies ermöglicht den Einsatz der Sol-Gel-Synthese, um metastabile Strukturen, hoch geordnet-poröse Partikel, größenkontrollierte Nanopartikel und Fasern mit maßgeschneiderten Durchmessern herzustellen. Es geht dabei in vielen Bereichen der Anwendung vor allem darum, die Oberfläche mittels Nanostrukturierung zu vergrößern, wie das folgende Beispiel deutlich macht.



■ Abb. 1: Chemische Reaktionen bei der Hydrolyse und Kondensation zur Bildung eines Metall(M)oxids.<sup>1</sup>

Angenommen, ein Metalloxid in der hypothetischen Form eines Würfels hat eine Kantenlänge von 1 cm und eine spezifische Oberfläche von 6 cm<sup>2</sup>. Diese 6 cm<sup>2</sup> stehen dann für Oberflächenreaktionen zur Verfügung, zum Beispiel für katalytische Umsetzungen oder die Speicherung elektrischer Ladung in Doppelschichtkondensatoren. Wird dieser Würfel nun in 1.000 kleinere Würfel mit einer Kantenlänge von 1 mm geteilt, erhält man eine Oberfläche von 1.000 x 6 mm<sup>2</sup> = 6.000 mm<sup>2</sup> = 60 cm<sup>2</sup> (Abb. 2). Dieser Effekt der Oberflächenvergrößerung wird umso größer, je kleiner die Würfel werden. So sind Chemiker heute in der Lage, formkontrollierte „Würfel“ von wenigen Nanometern (1 Nanometer = 0,0000001 cm) einfach und schnell durch Sol-Gel-Chemie herzustellen. Würde man den Würfel in Abb. 2 in Würfel mit einer Kantenlänge von 1 Nanometer teilen, bekäme man eine Oberfläche von 60.000.000 cm<sup>2</sup>.

Die folgenden Beispiele zeigen, wie nanostrukturierte Metalloxide hergestellt werden können, die für die elektrochemische Energiespeicherung und -wandlung von besonderem Interesse sind.

Die folgenden Beispiele zeigen, wie nanostrukturierte Metalloxide hergestellt werden können, die für die elektrochemische Energiespeicherung und -wandlung von besonderem Interesse sind.

### Eisenspinelle aus der Mikrowelle

Spinelle des Eisens haben in den letzten Jahren großes Interesse für Elektroden in Lithium-Ionen-Batterien geweckt, insbesondere im Bereich der

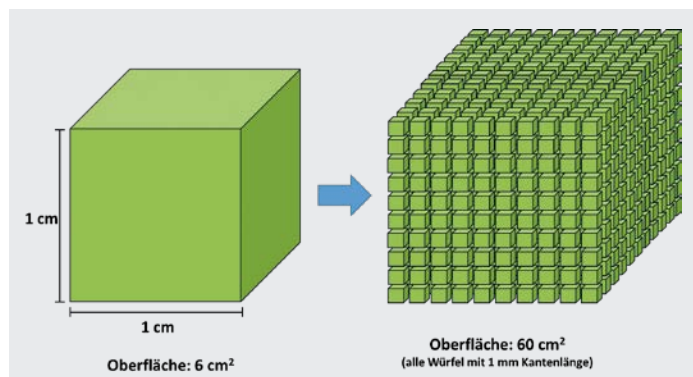
### LITERATURTIPPS

K. Kirchberg et al: Stabilization of Monodisperse, Phase-Pure MgFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Nanoparticles in Aqueous and Nonaqueous Media and Their Photocatalytic Behavior. *J. Phys. Chem. C* (2017), 121, 27126-27138. DOI: 10.1021/acs.jpcc.7b08780.

M. Einert et al.: Electrospun CuO Nanofibers: Stable Nanostructures for Solar Water Splitting. *ChemPhotoChem* (2017), 1, 326-340. DOI: 10.1002/cptc.201700050.

K. Kirchberg et al.: Mesoporous ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Photoanodes with Template-Tailored Mesopores and Temperature-Dependent Photocurrents. *ChemPhysChem* (2018), 19 (18), 2313-2320. DOI: 10.1002/cphc.201800506.

Abdruck der in diesen Publikationen des Autors enthaltenen Abb. 5, 6 und 7 mit freundl. Genehmigung der Verlage.



■ Abb. 2: Oberflächenvergrößerung durch Strukturierung (Bild: Roland Marschall).<sup>2</sup>



■ Abb. 3 und 4 (rechts): Eine Suspension von  $MgFe_2O_4$ -Nanopartikeln wird aus der Labormikrowelle genommen (Fotos: Christian Wiffler).

Konversionsanoden. Mittlerweile ist es möglich, größenkontrollierte Nanopartikel solcher ternären Eisenoxide ( $AFe_2O_4$ , A= Zn, Mg, Mn, Fe, Co, Ni) herzustellen, um damit zum Beispiel eine bessere Verteilung in der aktiven Anode zu erhalten. Mikrowellenunterstützte Synthesen eignen sich dafür besonders gut, da die Temperatur der Sol-Gel-Chemie in einer Labormikrowelle sehr effizient und schnell erreicht werden kann. In einigen Fällen benötigen darin hergestellte Metalloxide nicht den oben erwähnten anschließenden Temperaturschritt, können also zeitsparend und schnell hergestellt werden.

## „Elektrospinnen eröffnet die Möglichkeit, Elektrodenbeschichtungen direkt zu synthetisieren.“

### AUTOR



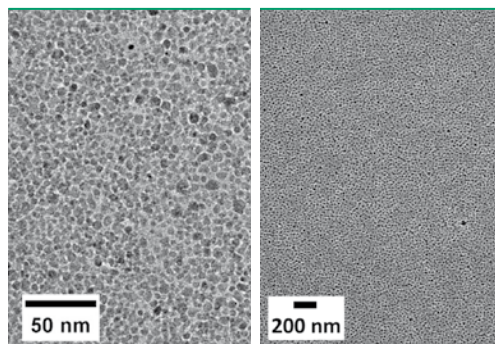
■ Prof. Dr. Roland Marschall ist Inhaber des Lehrstuhls für Physikalische Chemie III an der Universität Bayreuth.

So ist es zum Beispiel möglich, die ternären Metalloxide  $ZnFe_2O_4$  und  $MgFe_2O_4$  in einer wasserfreien Sol-Gel-Synthese in der Mikrowelle herzustellen.<sup>3</sup> Durch Kontrolle der Reaktionstemperatur können dabei kristalline Nanopartikel mit Spinellstruktur erzeugt werden, die kleiner als 10 Nanometer sind (Abb. 5). Sollte eine bestimmte Verteilung in einem Medium für die weitere Verwendung besonders wichtig sein, können die Partikel entsprechend bearbeitet werden:  $MgFe_2O_4$ -Nanopartikel lassen sich an der Oberfläche so modifizieren, dass sie in wässrigen oder organischen Dispersionen ideal verteilt werden können.

Die Ausgangslösungen einer solchen Mikrowellensynthese sind ohne Temperaturbehandlung relativ stabil: Sie reagieren nicht zur Gelbildung und zum Metalloxid ab. Daher können diese Lösungen auch zur Beschichtung von Oberflächen verwendet werden, um Dünnschicht-Elektroden des Metalloxids herzustellen. Setzt man dieser Abscheidung noch so genannte Porenbildner hinzu, erhält man poröse Dünnschicht-Elektroden (Abb. 6). Diese können in vielen Bereichen Anwendung finden, zum Beispiel für die Lithiumaufnahme in Batterien und der Photoelektrochemie.

■ Abb. 5 (links): Transmissionselektronenmikroskop-Aufnahme von  $MgFe_2O_4$  Nanopartikeln (Bild: © American Chemical Society. Erstveröffentl. in K. Kirchberg et al (2017), siehe Literaturtipps).

■ Abb. 6 (rechts): Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme eines mesoporösen  $ZnFe_2O_4$ -Dünnschichtfilms (Bild: © Wiley-VCH. Erstveröffentl. in K. Kirchberg et al. (2018), siehe Literaturtipps).



## Kupferoxid-Fasern

Kupferoxid ( $CuO$ ) ist ein hoch interessantes Material für Konversionselektroden in Natrium-Ionen Batterien<sup>4</sup> und die Photoelektrochemie, aber auch für die Sensorik giftiger Gase. Nanopartikel aus Kupferoxid lassen sich einfach herstellen, weitaus attraktiver ist aber ihre Herstellung durch Elektrospinnen. Das Verfahren stellt zwar eine besondere technische Herausforderung dar, eröffnet aber die Möglichkeit, Elektrodenbeschichtungen direkt zu synthetisieren.<sup>5</sup> Elektrospinnen ist eine einfache und skalierbare Methode zur Herstellung von Polymer- und Oxidfasern. Für  $CuO$ -Oxidfasern muss die Sol-Gel-Chemie während des Elektrospinnens kontrolliert werden, und in der anschließenden Temperaturbehandlung muss die Fasermorphologie erhalten bleiben. Das Ergebnis sind temperaturabhängige Fasermorphologien (Abb. 7), die in Batterieelektroden eingesetzt werden könnten.

Für die solare Energieumwandlung in der Photoelektrochemie ist Kupferoxid aufgrund seiner geringen Bandlücke und seines p-typischen Halbleiterverhaltens sehr interessant. Hier zeigt sich eine Abhängigkeit der photoelektrochemischen Leistung von der Morphologie. Denn aus kleineren Kristalliten bestehende Fasern besitzen eine höhere Anzahl an Korngrenzen, die für den Transfer photogenerierter Ladungsträger nachteilig sein können. In diesem Fall sind Fasern mit größeren Kristalliten das bessere Material für die photoelektrochemische Wasserspaltung.<sup>6</sup>

## Mesoporöse Protonenleiter

Protonenleitende Membranen finden in einer Vielzahl von Anwendungen ihren Einsatz, zum Beispiel in Entsalzungsanlagen, in der Photoelektrochemie und auch in der Energietechnik – allerdings nicht in Batterien, sondern in Brennstoffzellen.<sup>7</sup> Um die Stabilität und den Wasserhaushalt solcher Membranen für Temperaturen oberhalb von 100 Grad Celsius zu verbessern, werden protonenleitende Additive und poröse Protonenleiter erforscht. Insbesondere mesoporöse SiO<sub>2</sub>-basierte Partikel mit hoch geordneter Porenstruktur können mit einer großen Menge protonenleitender funktioneller Gruppen (zum Beispiel SO<sub>3</sub>H oder Imidazol) beladen werden, um in Membranen eingebaut zu werden. Diese Funktionalisierung konnte kürzlich auch aus der Gasphase erreicht werden, um so den Effekt der Porenblockierung während der Oberflächenfunktionalisierung zu vermeiden.<sup>8</sup> Hier zeigt sich insbesondere der Vorteil mesoporöser Protonenleiter mit ihren enormen spezifischen Oberflächen gegenüber unporösen Additiven, welche die Protonenleitfähigkeiten poröser Systeme nicht erreichen.<sup>9</sup> Kürzlich konnten mesoporöse Protonenleiter auch in monolithischer Form erzeugt werden.<sup>10</sup>

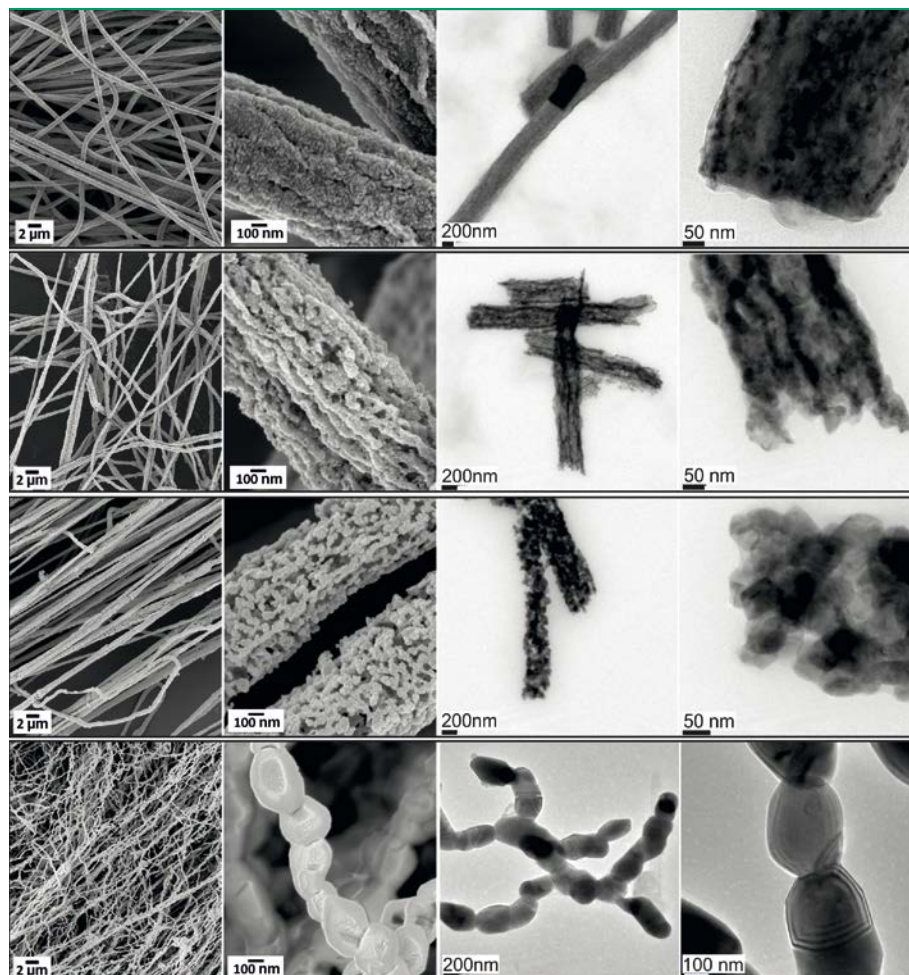
Eine Alternative zu SiO<sub>2</sub>-basierten Protonenleitern sind poröse aromatische und organische Polymere. Auch bei ihnen handelt es sich um poröse Protonenleiter, teilweise für wasserfreie Protonenleitung. Diese wurden in den letzten Jahren ebenfalls intensiv erforscht<sup>11</sup> und bieten eine große Variabilität in der Zusammensetzung für die Protonenleitung.<sup>12</sup>

## Ausblick

Funktionelle und nanostrukturierte Metalloxide können über vielfältige Methoden hergestellt und in vielen Bereichen verwendet werden. Im Bayerischen Zentrum für Batterietechnik (Baybatt) der Universität

Bayreuth wird an neuen Metalloxiden und deren Nanostrukturierung für die (photo-)elektrochemische Energiespeicherung und -wandlung geforscht.

■ Abb. 7: Mittels Elektrosponnen hergestellte CuO-Nanofasern mit unterschiedlichen Morphologien, je nach Temperaturbehandlung (von oben nach unten: 300, 400, 550 und 800 Grad Celsius). © Wiley-VCH. Erstveröffentl. in M. Einert et al. (2017), siehe Literaturtipps.



- 1 Adaptiert von N. Hüsing, U. Schubert: Aerogels – Airy Materials: Chemistry, Structure, and Properties. *Angew. Chemie Int. Ed.* (1998), 37, 22-45.
- 2 Vgl. S. Chaudhari et al.: A Review on Polymer TiO<sub>2</sub> Nanocomposites. *Int. J. Eng. Res. Appl.* (2013), 3, 1386-1391.
- 3 C. Suchomski et al.: Microwave synthesis of high-quality and uniform 4 nm ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> nanocrystals for application in energy storage and nanomagnetism. *Nanotechnol.* 2016, 7, 1350-1360, DOI: 10.3762/bjnano.7.126; K. Kirchberg et al. 2017, siehe Literaturtipps.
- 4 F. Klein et al.: Kinetics and degradation processes of CuO as conversion electrode for sodium-ion batteries: an electrochemical study combined with pressure monitoring and DEMS. *J. Phys. Chem. C* (2017), 121, 8679-8691. DOI: 10.1021/acs.jpcc.6b11149.
- 5 M. Einert et al. 2017, siehe Literaturtipps.
- 6 Ebd.
- 7 R. Marschall et al.: Protonenleitende Komposit-Membranen für zukunftsorientierte Anwendungen in Brennstoffzellen, Entsalzungsanlagen und in der Photokatalyse. *Chemie Ing. Tech.* (2011), 83, 2177-2187. DOI: 10.1002/cite.201100146.
- 8 J. Timm, R. Marschall: A Novel and Versatile Grafting Procedure: Toward the Highest Possible Sulfonation Degree of Mesoporous Silica. *Adv. Sustain. Syst.* (2018), 2, 1700170. DOI: 10.1002/adsu.201700170.
- 9 R. Marschall et al.: Nanoparticles of mesoporous SO<sub>3</sub>H-functionalized Si-MCM-41 with superior proton conductivity. *Small* (2009), 5, 854-859. DOI: 10.1002/sml.200801235.
- 10 M. von der Lehr et al.: Proton Conduction in Sulfonated Organic-Inorganic Hybrid Monoliths with Hierarchical Pore Structure. *ACS Appl. Mater. Interfaces* (2016), 8, 25476-25488. DOI: 10.1021/acsami.6b08477.
- 11 C. Klumpen et al.: Water mediated proton conduction in a sulfonated microporous organic polymer. *Chem. Communications* (2017), 53, 7592-7595. DOI: 10.1039/C7CC02117H.
- 12 C. Klumpen et al.: Anhydrous proton conduction in porous organic networks. *J. Mater. Chem. A* (2018), 6, 21542-21549.





■ Mukundan Thelakkat

# Batterien auf Kunststoffbasis

Lösungsmittelfreie Elektrolyte für die nächste Generation von Batterien

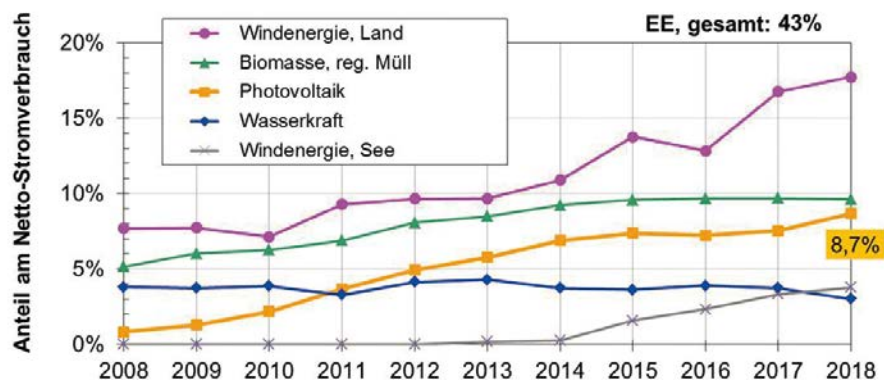
■ Alexander Krimalowski M.Sc., Doktorand in der Arbeitsgruppe für Angewandte Funktionspolymere, bei der Auswertung von Messergebnissen am Potentiostaten (Foto: Christian Wißler).

Die Produktion erneuerbarer Energie beruht auf sehr verschiedenen Energiequellen und fluktuiert mit den Tages- und Jahreszeiten. Daher sind entsprechend angepasste Formen der Energiespeicherung erforderlich, so dass die Verfügbarkeit von Energie gewährleistet ist, wann und wo immer sie benötigt wird. Zugleich führt die effiziente und weit verbreitete Umwandlung photovoltaischer Energie in Solarstrom zu einem Energieüberschuss, der gespeichert werden muss – entweder in Form von elektrochemischer Energiespeicherung oder durch Umwandlung in Brennstoffe. Im Jahr 2017 belief sich die Energie, die in Photovoltaik-Anlagen in Deutschland produziert wurde, auf rund 40 Terawattstunden und deckte damit annähernd 7,2 Prozent des hiesigen Stromverbrauchs ab. Hinzu kommt eine wachsende Nachfrage nach Energiespeicherung, damit speziell für elektrisch betriebene Fahrzeuge transportable Energie bereitsteht.

Durch diese Interessenkonstellation ist die Batterieforschung und -technologie in den letzten Jahren intensiviert und auf breiter Front vorangetrieben worden. Im Unterschied zur Verwendung von Batterien in tragbaren elektronischen Geräten wie Kameras, Laptops und Smartphones verlangt die Nutzung von Lithium-basierten Batterien in Elektrofahrzeugen mehr Sicherheit, ein größeres Anwendungstemperaturfenster, deutlich erhöhte Lebensdauer sowie eine erhöhte Energie- und Leistungsdichte.

Die Materialforschung auf diesem Gebiet konzentriert sich auf lösungsmittelfreie Batterien und neue Materialien für die Elektroden (Anode und Kathode). In der bisherigen Forschung hat man sich vor allem damit befasst, hochleitende flüssige Elektrolyte so weiterzuentwickeln, dass sie als Medium für den Lithium-Ionen-Transport in den heutigen Batterien geeignet sind. Bei diesen Flüssigelektrolyten handelt es sich in der Regel um entflammare niedermolekulare organische Carbonate, die mit Additiven kombiniert eingesetzt werden. Allerdings haben diese Forschungsarbeiten mit entflammaren Flüssig-Elektrolyten maßgeblich dazu beigetragen, Lithium-Ionen-Batterien kommerziell nutzbar zu machen – zum Beispiel dadurch, dass die Ausbildung der sogenannten Solid Electrolyte Interphase (SEI)-Schicht unter Kontrolle gebracht wurde. Eine stabile SEI-Schicht trägt maßgeblich zur Stabilität einer Batterie bei, indem sie das unkontrollierte Wachstum von Lithium-Dendriten in der Zelle verhindert. Derzeitige kommerzielle Lithium-Ionen-Batterien mit Flüssigelektrolyten benötigen darüber hinaus teure Separatormembranen, die für Lithium-Ionen durch-

lässig sind, aber jeden Kontakt der beiden Elektroden während des Betriebs verhindern.



Die gegenwärtige Batterieforschung richtet ihren Fokus zusehends auf die Elektromobilität und konzentriert sich daher vermehrt auf die Verwendung nicht-brennbarer Elektrolyte anstelle von flüssigen organischen Carbonaten. Als besonders vielversprechende Kandidaten für Lithium-Ionen-Transportmaterialien gelten lösungsmittelfreie, feste Kunststoff-Elektrolyte (Solid Polymer Electrolytes, SPE). Hierbei handelt es sich um eine Mischung aus einem festphasigen, ionenleitenden Polymer und einem geeigneten Lithiumsalz. Ein solcher SPE kann flüssige Elektrolyte mit hohem Flammbarkeitsrisiko, wie sie derzeit in kommerziellen Batterien zum Einsatz kommen, ersetzen. Unter der Voraussetzung, dass in einem SPE eine hinreichende ionische Leitfähigkeit und mechanische Stabilität gewährleistet ist, hat das SPE-Konzept zahlreiche Vorteile:

- Die Batteriesicherheit kann mit lösungsmittelfreien SPEs drastisch erhöht werden.
- SPEs können in hoher Stückzahl laminiert und gedruckt werden, um anschließend in Leichtgewicht-Batterien mit sehr hoher Energiedichte zusammengesetzt zu werden.
- Teure Separatormembranen können vermieden werden.
- In Kombination mit einem SPE kann reines Lithiummetall anstelle von Lithium-interkaliertem Graphit als Anode genutzt werden, was die Kapazität der Zellen signifikant erhöhen würde.
- Neue Kathodenmaterialien mit nochmals erhöhter Kapazität, wie zum Beispiel Schwefelkathoden, können in Verbindung mit einem SPE genutzt werden, da der Feststoff-Elektrolyt die Bildung und Auflösung von Lithium-Poly-sulphiden unterbinden kann.

■ Abb. 1: Anteil erneuerbarer Energie am Netto-Stromverbrauch in Deutschland. Datenquellen: Gesamtausgabe der Energiedaten – Datensammlung des BMWi, 12. Jan. 2016; Monatsbericht zur Entwicklung der erneuerbaren Stromerzeugung und Leistung in Deutschland, Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat), Dez. 2018; Entwicklung des Nettostromverbrauchs in Deutschland, Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW), Feb. 2018.<sup>1</sup> (Grafik: © Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE).

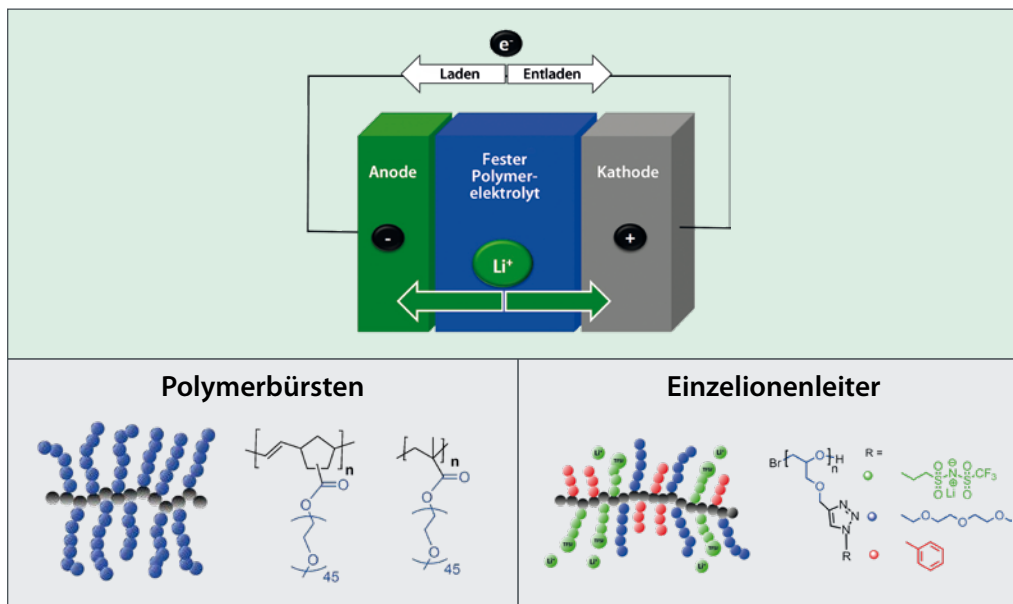
AUTOR



■ Prof. Dr. Mukundan Thelakkat ist Leiter der Arbeitsgruppe für Angewandte Funktionspolymere an der Universität Bayreuth.



■ Abb. 2: Oben: Schema einer Lithium-Ionen-Batterie mit einem festen Polymerelektrolyt als Medium für den Ionentransport. Links unten: Polymerbürste mit unterschiedlich strukturierten Teilen des Rückgrats, an das kurze Polyethylenoxid (PEO)-Ketten angehängt sind. Rechts unten: einzelenleitender fester Kunststoff-Elektrolyt, in dem sowohl das Rückgrat als auch die Seitenketten zum Lithium-Ionen-Transport beitragen (Grafik: Mukundan Thelakkat).



■ Abb. 3: ECC-Std® Elektrochemische Testzelle zur elektrochemischen Charakterisierung von Polymer-Feststoffelektrolyten (Foto: Christian Wißler).

Obwohl das Prinzip der SPE bereits im Jahr 1980 nachgewiesen wurde, hat man dieses Thema lange Zeit ignoriert. Die Batterieforschung konzentrierte sich hauptsächlich darauf, Sicherheits- und Stabilitätsprobleme in flüssigen Elektrolyt-Systemen zu lösen. Die Untersuchungen zu SPEs beschränkten sich seither im Wesentlichen auf eine einzige Polymerklasse, die Polyethylenoxide (PEO). Dabei handelt es sich um ein teilkristallines Polymer mit einer Glasübergangstemperatur von ungefähr minus 40 Grad Celsius und einem Schmelzpunkt zwischen 50 und 60 Grad Celsius. Der Ionentransport findet aufgrund der Segmentbeweglichkeit der PEO-Ketten in den amorphen Domänen des Polymers statt. Wie bereits angedeutet, gibt es in der SPE-Forschung zwei grundsätzliche Herausforderungen:

- die Leitfähigkeit der Lithiumionen innerhalb eines großen Temperaturfensters (möglichst auch bei Raumtemperatur) zu steigern
- und eine hinreichende mechanische Stabilität zu gewährleisten, ohne die ionische Leitfähigkeit dadurch zu beeinträchtigen.

versität Bayreuth innovative Lösungen finden. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf dem Design und der Synthese neuer ionenleitender Polymere. Dabei gehen die Wissenschaftler auch neue Wege, hin zu Systemen ohne PEO. Tatsächlich zeigen PEO-basierte Systeme generell eine gute Leistung: Sie verfügen als Mischungen mit gut dissoziierenden Lithium-Salzen (wie zum Beispiel LiTFSI) über eine ionische Leitfähigkeit im Bereich zwischen  $10^{-3}$  und  $10^{-4} \text{ S} \cdot \text{cm}^{-1}$ , falls der SPE eine sehr niedrige Glasübergangstemperatur hat (unterhalb von 0 Grad Celsius) und komplett amorph vorliegt. Diese gute ionische Leitfähigkeit wird allerdings auf Kosten der mechanischen Stabilität erreicht. Die Bayreuther Forscher verfolgen deshalb das Ziel, die mechanische Stabilität zu erhalten, Kristallisationsprozesse zu vermeiden und dabei eine möglichst hohe ionische Leitfähigkeit im Material zu bewahren.

Ausgangspunkt neuer ionenleitender Polymere ist dabei unter anderem die Architektur von Bürstenpolymeren. Das Rückgrat dieser Polymere kann genutzt werden, um daran kurze PEO-Seitenketten anzuhängen. In diesem Fall weist das System eine geringer ausgeprägte Tendenz zur Kristallisation auf.<sup>2</sup> Eine Bürstenarchitektur ermöglicht die einfache Synthese von Polymeren mit einem sehr hohen Molekulargewicht, das sich sowohl über die Länge des Rückgrats als auch über die Länge der Seitenkette einstellen lässt.

Zusätzlich kann das Rückgrat in einigen Fällen durch Wärmebehandlung vernetzt werden, damit sich die mechanische Stabilität verbessert. Darüber hinaus

LITERATURTIPP

A. Kralowski, M. Thelakkat: Sequential Co-click Reactions with Poly(glycidyl propargyl ether) toward Single-ion Conducting Electrolytes, *Macromolecules* (2019), 52 (11), 4042-4051. DOI: 10.1021/acs.macromol.9b00206.

“Als besonders vielversprechende Kandidaten für Lithium-Ionen-Transportmaterialien gelten lösungsmittelfreie, feste Kunststoff-Elektrolyte.“

Neue ionenleitende Polymere

Für diese Herausforderungen will die Arbeitsgruppe für Angewandte Funktionspolymere an der Uni-

wird in Bayreuth das etablierte Konzept der Mikrophasentrennung eines Diblockcopolymers verwendet. Dabei sorgt einer der Blöcke (in der Regel die weichere Phase) für den Ionentransport und der zweite (in der Regel die härtere Phase) für die mechanische Stabilität. Ein solches mikrophasensepariertes System kombiniert also zwei gegensätzliche Eigenschaften in einem Polymer: Weichheit in der einen und mechanische Stabilität in der anderen Domäne. Die meisten der bislang vorgestellten Konzepte lassen sich auf sogenannte Single-Ion-Conductor-Systeme übertragen, in denen die Anionen örtlich fixiert vorliegen. Dadurch tragen allein Lithium-Ionen zum Ladungstransport bei.<sup>3</sup>

Zudem greift die Arbeitsgruppe für Angewandte Funktionspolymere die bewährte Idee der Fluorierung organischer Moleküle auf. Das Ziel ist es, teilfluorierete SPEs zu entwickeln, um die Entflammbarkeit des Elektrolyten noch stärker zu unterdrücken. In Raumfahrzeugen ist dies bereits gelungen.<sup>4</sup>

### Hightech-Infrastruktur in Bayreuth

Im Keylab für Device Engineering, das an der Universität Bayreuth unter dem Dach des Bayerischen Polymerinstituts (BPI) aufgebaut wurde, verfügt die Arbeitsgruppe für Angewandte Funktionspolymere über eine vollständige elektrochemische Test- und Mess-Station. Hier ist ein mehrkanaliger Potentiostat in Kombination mit einer Thermostat-Kammer für temperaturabhängige elektrochemische Impedanzspektroskopie und für die Messung von Strom-Spannungskurven installiert. Auf der Grundlage dieser Infrastruktur bauen und entwickeln die Wissenschaftler Batterie-Prototypen in der Knopfzell-Geometrie. Sie untersuchen dabei die ionische Leitfähigkeit, die elektrochemische Stabilität sowie die Lithium-Transportzahl (diese entspricht dem tatsächlich durch Lithium-Ionen erfolgten Ladungstransport). Bei Zyklisierungsversuchen werden die Kapazität, die Aufladegeschwindigkeit und die Zuverlässigkeit von Batterien über einen langen Zeitraum mit vielen Auf- und Entladevorgängen untersucht. Neu hergestellte Elektrolytmaterialien können somit direkt innerhalb der Arbeitsgruppe für Angewandte Funktionspolymere hinsichtlich ihrer Eignung im realen Batterie-Anwendungsfall getestet werden.

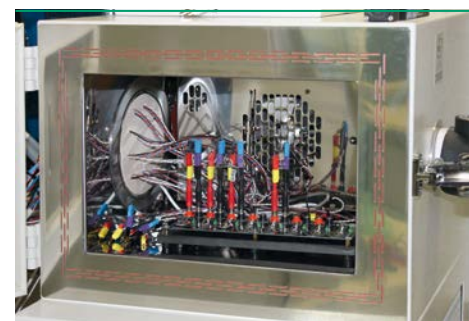
■ Abb. 6: Dominic Rosenbach M.Sc., Doktorand in der Arbeitsgruppe für Angewandte Funktionspolymere, und Jannik Petry B.Sc. an der Glovebox bei der Herstellung von Batterieknopfzellen (Foto: Christian Wißler).



■ Abb. 4: Klimakammer mit Knopfzellen-Halter zur temperaturabhängigen Messung elektrochemischer Parameter von Polymer-Feststoffelektrolyten.

■ Abb. 5: Blick in die Klimakammer.

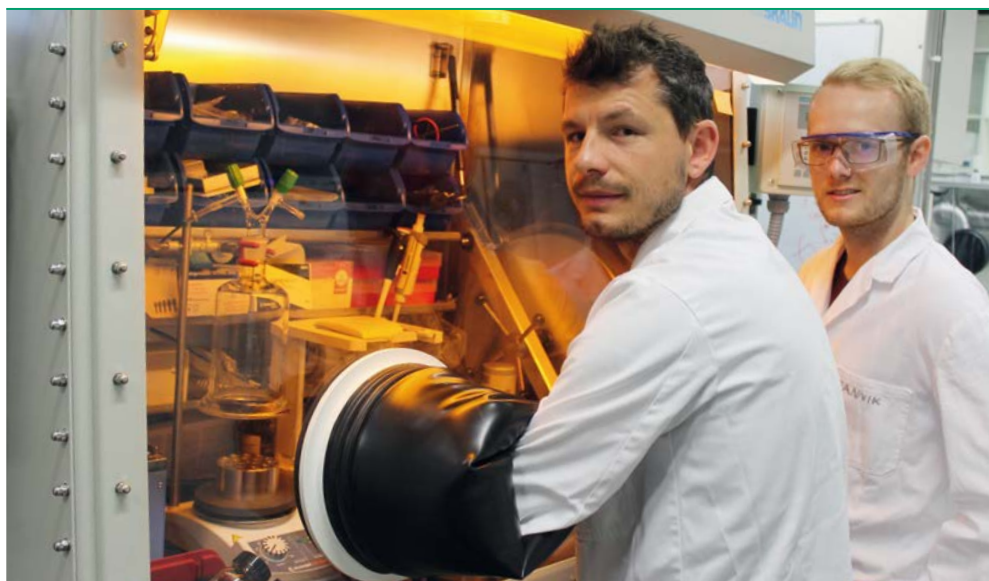
(Fotos: Christian Wißler).



Im Rahmen des BayBatt kooperiert die Arbeitsgruppe mit dem Lehrstuhl für Elektrische Energiesysteme. Zusammen werden die elektrochemischen Prozesse analysiert, die innerhalb des festen Elektrolytmaterials sowie an dessen Grenzflächen ablaufen. Hierfür wird aus den elektrochemischen Impedanzmessungen die Verteilungsfunktion der Relaxationszeiten (Distribution of Relaxation Times, DRT) berechnet, um daraus genauere Aussagen über die Vorgänge innerhalb des Batteriesystems abzuleiten.

In Zukunft sollen Fragestellungen der Elektrolytforschung und der Elektrodenforschung miteinander kombiniert werden. Das Ziel ist dabei ein grundlegendes Verständnis für elektrochemische Prozesse in SPE-Systemen, um nachhaltige und technologierelevante Konzepte in der Batterieforschung zu realisieren.

- 1 Grafik aus Fraunhofer ISE: Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. Freiburg, 29. Mai 2019. [www.pv-fakten.de](http://www.pv-fakten.de).
- 2 D. Rosenbach et al.: Synthesis and Comparative Studies of solvent-free Solid Polymer Electrolytes based on polymer brushes. *ACS Appl. Energy Mater.* (2019), 25, 3373-3388. DOI: 10.1021/acsaem.9b00211.
- 3 A. Kralowski, M. Thelakkat in *Macromolecules* (2019), s. Literaturtipp.
- 4 H. Burchardt-Tofaute, M. Thelakkat: Fluorination effect on the polymerization of oligo ethylene glycol ethenesulfonate monomers, *Polym. Chem.* (2018), 9, 4172. DOI: 10.1039/C8PY00623G.





■ Sebastian Weiß  
Josef Breu

# Lithium- Ionen- Batterien

Herausforderungen der  
aktuellen Technologie

■ Salzsee in der Atacama-Wüste in Chile. In dieser Region wird Lithium gewonnen, indem Sole aus dem Boden in flache Verdunstungsbecken gepumpt wird und in der heißen Wüstensonne zu lithiumhaltigen Salzen trocknet (sst).

**L**ithium-Ionen-Batterien (LIB) wurden kurz nach der Einführung Anfang der 90er Jahre zur treibenden Kraft der globalen Revolution in der Verbraucherelektronik, Energiespeichersystemen und anderen wichtigen Anwendungen. Innerhalb weniger Jahrzehnte wurden Energie- und Leistungsdichte, Zykluslebensdauer, Ratenfähigkeit und Zelldesign signifikant verbessert und neue Horizonte für den Ökoenergiemarkt eröffnet. Um eine effektive und angemessene Substitution fossiler Energieträger zu ermöglichen, ist jedoch eine weitere Verbesserung der Zelleistung solcher stationären Energiespeicher zwingend notwendig.

Spätestens seit dem Dieselskandal und den „Fridays for Future“-Demonstrationen ist die Anwendung der LIB-Technologie in Elektrofahrzeugen in den Vordergrund gerückt. In diesem Anwendungsfeld kommt benötigtem Bauraum und Gewicht eine ungleich größere Bedeutung zu als bei stationären Energiespeichern. Moderne Batteriezellen können 260 Wh/kg und 780 Wh/L gravimetrische bzw. volumetrische Energiedichte liefern. Dies ist lediglich ausreichend, um mit Mittelklassewagen Reichweiten im Bereich von 150 bis 300 Kilometern zu erzielen. Um Anforderungen des Fernverkehrs gerecht zu werden, reicht dies jedoch nicht aus. Will man mit modernen Verbrennungsmotoren vergleichbare Leistungsdaten erzielen, werden größere Batterien benötigt. Diese sind schwerer und erfordern mehr Bauraum als die übliche Summe aus Motor und Tank. Ein höheres Transportgewicht bedingt aber wieder einen höheren Strom- und Ressourcenverbrauch, was die Ökobilanz belastet.

Folglich sind effizientere und nachhaltigere Lösungen gefragt<sup>1</sup> und bedingen einen enormen Forschungsbedarf. Hierzu leistet der Freistaat Bayern mit dem Aufbau des Bayerischen Zentrums für Batterietechnik nun einen ersten überschaubaren Beitrag.

### Möglichkeiten und Grenzen der aktuellen LIB-Technologie

Eine kommerziell erhältliche Lithium-Ionen-Batterie ist typischerweise aus mehreren Komponenten aufgebaut und enthält kein Lithium-Metall, sondern lediglich Li<sup>+</sup>-Ionen.<sup>2</sup> Um hohe Leistungen zu erzielen, also in kurzer Zeit viel Strom aus der Batterie entnehmen bzw. speichern zu können, müssen die Li<sup>+</sup>-Ionen sich möglichst schnell zwischen Anoden- und Kathoden-Kammern hin und her bewegen können, wobei die Richtung davon abhängt, ob die Batterie gerade geladen oder entladen wird. Damit dies gewährleis-

tet wird, ist die Zelle typischerweise mit einem flüssigen, organischen Lösungsmittelgemisch gefüllt.<sup>3</sup>

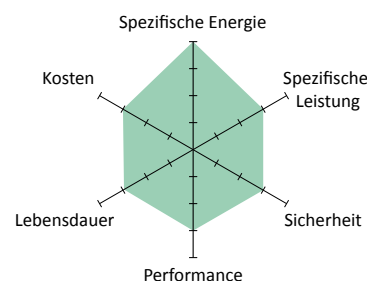
Für E-Mobilität sind Kapazität und abrufbare Leistung die wichtigsten Parameter, das Feld wird von NMC- und NCA-Kathoden dominiert. Je nach Einsatzbereich (tragbare elektronische Geräte, stationärer Speicher, Flugzeugbau) nehmen aber auch andere Spezifika wie Kosten, Sicherheit und Lebensdauer einen wesentlich höheren Stellenwert ein (Abb. 1). Die verschiedenen kommerziellen Materialien haben daher alle ihre Nische und ihre Berechtigung. Es wird vermutlich nie „die LIB-Zelle“ geben, sondern immer mehrere anwendungsspezifische Technologien.

Die leistungslimitierende Komponente der modernen LIB ist die Kathode. Diese bestimmt wesentlich die Kapazität und die Leistung der Zelle. Zu den gebräuchlichsten kommerziellen Kathodenmaterialien gehören LiCoO<sub>2</sub> (LCO, ~140 mAh/g), LiMn<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (LMO, ~120 mAh/g), LiFePO<sub>4</sub> (LFP, ~140 mAh/g), LiNi<sub>0,33</sub>Co<sub>0,33</sub>Mn<sub>0,33</sub>O<sub>2</sub> (NCM, ~160 mAh/g) und LiNi<sub>0,80</sub>Co<sub>0,15</sub>Al<sub>0,05</sub>O<sub>2</sub> (NCA, ~160 mAh/g). Die Kapazität korreliert bei der E-Mobilität direkt mit der Reichweite und indirekt mit der verfügbaren Leistung („PS“). Hinsichtlich der Leistungsdaten sind hier keine disruptiven Entwicklungssprünge zu erwarten. Vielmehr werden mit kleinen Innovationen in den kommenden Jahren moderate Steigerungen der Energiedichte und der Sicherheit von Lithium-Ionen-Akkus realisiert werden.

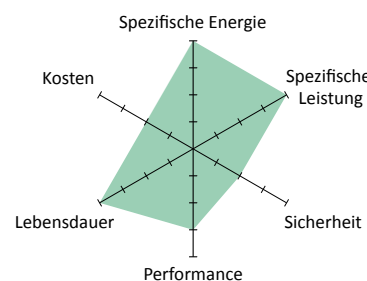
### Sicherheit

Mit den existierenden elektroaktiven Materialien sind die Lade- und Entladeprozesse leider nicht ideal reversibel. Man muss beim Laden mehr Energie investieren, als beim Entladen wieder entnommen werden kann. Die verlorene Energie wird dabei als Abwärme freigesetzt. In Kombination mit dem verwendeten organischen Lösungsmittel, dem niedrigen Schmelzpunkt des derzeit verwendeten polymeren Separators und der damit verbundenen Kurzschlussgefahr stellt diese Wärmefreisetzung folglich ein Sicherheitsrisiko dar. Daher ist es nötig, die Leistung von Elektrofahrzeugen elektronisch zu limitieren, damit eine solche Kettenreaktion unterbunden wird. Durch eine Erhöhung der Reversibilität könnte dieses Risiko passiv verringert werden. Anode und Kathode bestehen vorzugsweise aus Schichtmaterialien, weil dann die mit dem Ladevorgang verbundene Aufnahme und Abgabe von Li<sup>+</sup>-Ionen vergleichsweise schnell mit kleiner Aktivierung zwi-

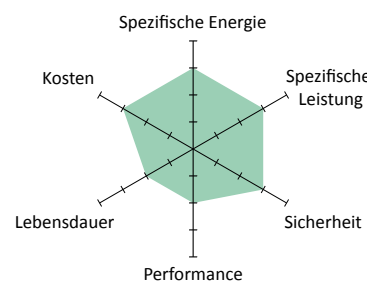
#### Lithium-Nickel-Cobalt-Mangan (NCM)



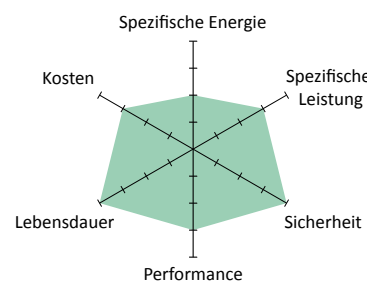
#### Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium (NCA)



#### Lithium-Mangan Spinell (LMO)



#### Lithium-Eisen Phosphat (LFP)



■ Abb. 1: Vergleich verschiedener kommerzieller Kathodenmaterialien (Grafik: BCG).<sup>4</sup>



„Es wird vermutlich nie ‚die LIB-Zelle‘ geben, sondern immer mehrere anwendungsspezifische Technologien.“

AUTOREN



Sebastian Weiß ist Mitarbeiter am Lehrstuhl für Anorganische Chemie I.



Prof. Dr. Josef Breu ist Inhaber des Lehrstuhls für Anorganische Chemie I an der Universität Bayreuth.

schen die Schichten erfolgen kann. Eine Forschungsgruppe der Anorganischen Chemie unter der Leitung von Prof. Dr. Josef Breu wird hier einen Ansatz verfolgen, der die mit der Ein-/Auslagerung von Li<sup>+</sup>-Ionen verbundene Aktivierungsenergie und damit die Hysterese weiter verringert, indem der Spalt zwischen den Schichten durch Abstandshalter offengehalten („gepillert“) und damit die Volumenänderung minimiert wird.

Ressourcenverfügbarkeit

Der Umstieg auf E-Mobilität macht nur Sinn, wenn die Verfügbarkeit der notwendigen Ressourcen (Materialien) nachhaltig und zu einem wirtschaftlich sinnvollen Preis gesichert werden kann. Alle etablierten Elektroautohersteller setzen momentan auf Cobalt-haltige Schichtverbindungen, die im Vergleich zu anderen verfügbaren Batterievarianten die höchste Energiedichte und Lebensdauer aufweisen. Angesichts der ambitionierten E-Mobilitäts-Pläne vieler Autohersteller werden bei der Produktion dieses Typs von Batteriezellen massive Rohstoffengpässe bei Lithium und vor allem Cobalt erwartet. Spezifisches Gewicht, Toxizität, Preis und Verfügbarkeit limitieren die Auswahl von chemischen Elementen, die prinzipiell für Batterien in Frage kommen, auf wenige Vertreter (Abb. 2). Diese sind zudem auf wenige abbauwürdige Lagerstätten konzentriert. Die Konzentration von kritischen Rohstoffvorkommen auf solch begrenzten Raum impliziert immer auch Unsicherheiten hinsichtlich langfristiger Verfügbarkeit.<sup>6</sup>

Lithium ist der zentrale Bestandteil von LIBs, und die Verfügbarkeit ist Schätzungen zufolge ausreichend, um selbst die optimistischsten Nachfragen zu decken. Der Hunger der Weltwirtschaft nach die-

sem Metall impliziert aber schon heute erkennbare sozioökologische und ökonomische Probleme, die mit dem Abbau verbunden sind. Lithiumsalze sind gut löslich und Lithium-haltige Mineralien haben sich daher über geologische Zeiträume primär in den ariden Gebieten der Hochanden von Chile und Argentinien angereichert. Gleichzeitig werden für die Lithiumgewinnung große Mengen Wasser benötigt, die aus in dieser Gegend wertvollen Grundwasservorkommen entnommen werden. Um diese Ressource konkurriert die Lithiumindustrie mit der indigenen Bevölkerung, die damit der Grundlage für die seit Jahrtausenden auf diese speziellen Lebensbedingungen angepasste Lebens- und Wirtschaftsweise beraubt werden. Ferner kommt es zu politischen Spannungen, da der Staat für die Erschließung zu Enteignungen und Vertreibungen der indigenen Bevölkerung greift. Steigende Nachfrage vor dem Hintergrund dieser Unsicherheiten machen sich im Preis bemerkbar, der unter enormen Fluktuationen von ca. 4.000 Dollar/Tonne im Jahr 2000 auf 12.000 Dollar/Tonne im Jahr 2018 gestiegen ist.<sup>7</sup>

Mehr als die Hälfte der Weltproduktion bzw. Reserven an Cobalt (Co) kommt aus der Demokratischen Republik Kongo, die in den letzten Jahren vom Bürgerkrieg verwüstet wurde. Die Kontinuität der Cobalt-Versorgung wird daher immer wieder in Frage gestellt und belastet die Berechenbarkeit der Märkte. Diese politische Instabilität ist der Grund von starken Preisfluktuationen und Zweifeln an der Nachhaltigkeit der Versorgung mit diesem kritischen Element. Cobalt ist in erhöhten Mengen toxisch und kann um den Abbau herum zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen führen, was die häufig anzutreffende Kinderarbeit in den Minen noch problematischer erscheinen lässt.<sup>8</sup> Cobalt ist mit einer mittleren Konzentration in der Erdkruste von 25 ppm zwar nicht extrem selten wie Gold (4·10<sup>-3</sup> ppm), aber deutlich seltener als die Nachbarelemente Mangan (Mn, 950 ppm), Eisen (Fe, 56·10<sup>3</sup> ppm) und Nickel (Ni, 84 ppm).<sup>9</sup> Die relative Knappheit und die Unsicherheit der Versorgung resultieren in einem stark

- Für Batterien geeignet ■
- Toxisch ■
- Radioaktiv ■
- Schwer ■
- Teuer ■
- Nicht geeignet wegen anderer Gründe ■

|    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| H  |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | He |
| Li | Be |    |    |    |    |    |    |    |    |    | B  | C  | N  | O  | F  | Ne |    |
| Na | Mg |    |    |    |    |    |    |    |    |    | Al | Si | P  | S  | Cl | Ar |    |
| K  | Ca | Sc | Ti | V  | Cr | Mn | Fe | Co | Ni | Cu | Zn | Ga | Ge | As | Se | Br | Kr |
| Rb | Sr | Y  | Zr | Nb | Mo | Tc | Ru | Rh | Ag | Pd | Cd | In | Sn | Sb | Te | I  | Xe |
| Cs | Ba | La | Hf | Ta | W  | Re | Ir | Os | Pt | Au | Hg | Tl | Pb | Bi | Po | At | Rn |
| Fr | Ra | Ac |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |

Abb. 2: Übersicht über die Eignung bzw. Nachteile von Elementen für die Anwendung in Batterien (Grafik: Sebastian Weiß / Christian Göppner).<sup>5</sup>

steigenden Preis, der von 30.000 Dollar/Tonne im Jahr 2000 auf bis zu 94.000 Dollar/Tonne im Jahr 2018 gestiegen ist. Dies wirft die zentrale Fragestellung auf, welcher Anteil der weltweiten Fahrzeugflotte mit Cobalt-basierten Batterien ausgestattet werden kann/sollte.

Ein zentrales Ziel des bereits genannten Forschungsprojektes im BayBatt wird daher die Entwicklung Cobalt-freier, Eisen-basierter Kathodenmaterialien sein. Eisen ist gut verteilt, weltweit in unbegrenzter Menge verfügbar und zudem gesundheitlich völlig unbedenklich. Im Gegensatz zu dem bereits kommerzialisierten Lithium-Eisen-Phosphat sollen aber durch eine gepillerte Schichtstruktur Kapazitäten im Bereich der NMC- und NCA-Materialien erreicht werden, wie sie für E-Mobilität benötigt werden.

### Ökobilanz

Um die langfristigen Ziele zur CO<sub>2</sub>-Emissionsenkung zu erreichen, setzen Politik und Wirtschaft verstärkt auf Elektromobilität. Im Gegensatz zu Autos mit Verbrennungsmotoren können diese lokal emissionsfrei fahren. Jedoch ist zu berücksichtigen, dass auch die Produktion des Wagens, der Batterie und vor allem des Stroms mit CO<sub>2</sub>-Emission verbunden ist. Schwere Fahrzeuge bzw. höher motorisierte Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren besitzen unter Umständen sogar eine bessere Umweltbilanz als Elektrofahrzeuge. Daher kann eine pauschale, Fahrzeugklassen übergreifende Aussage über die Umweltfreundlichkeit von Antrieben nicht getroffen werden. In Kleinwagen mit schwacher Motorisierung sind typischerweise kleine Batterien verbaut. Deren CO<sub>2</sub>-Ausstoß ist über die Lebensdauer aufsummiert klar positiv und wird immer besser, je höher der regenerative Anteil am Strommix ist. Wenn der Strom vollständig durch erneuerbare Energien bereitgestellt werden kann, ist der Betrieb von Elektrofahrzeugen emissionsfrei, Klima und Umwelt werden weder mit CO<sub>2</sub> noch mit Stickoxiden belastet. Aktuell birgt Elektromobilität aber nur klare Vorteile, wenn leichte und niedrig motorisierte Klein- und Mittelklassewagen im Nahverkehr eingesetzt werden können und auf vollständig erneuerbare Energien zurückgegriffen werden kann.

### Fazit

Das Elektroauto wird gerne als Hoffnungsträger gepriesen, der die Klimakrise lösen kann, ohne dass Einschränkungen bei der lieb gewordenen Individual-

mobilität hingenommen werden müssen. E-Mobilität ist aber immer nur so sauber bzw. CO<sub>2</sub>-emissionsarm wie die Ökobilanz der Batterieproduktion und der länderspezifischen Stromproduktion/-verteilung – und das Ganze eingerahmt in den Stromverbrauch pro gefahrenen Kilometer. Die derzeit bei Autokunden gefragten SUV-Luxusmobile mit schweren und großen Batteriepaketen und enormer Motorleistung werden viel Fahrspaß vermitteln, aber keinen nennenswerten Beitrag zum Klimaschutz leisten können.

Dieselfahrer sind Reichweiten von über 1.000 Kilometern bei Leistungen von über 100 Kilowatt und Motorlaufleistungen jenseits von 300.000 Kilometern gewohnt. Auch wenn diese Spezifikationen für die große Mehrheit der Kunden nicht wirklich essentiell sind, stellen die eingeschränkten Reichweiten, die sich aus der geringen Energiedichte und dem hohen Preis von Batterien ergeben, ein ernstes Problem für den Markteintritt dar. Leistung und Dynamik sind momentan die überzeugendsten Verkaufsargumente, verschlechtern aber die Ökobilanz dramatisch. Ohne eine Anpassung der Erwartungen an das emotional besetzte Produkt Auto wird beim Stand der Batterietechnik keine ökologische Revolution der Mobilität gelingen.

Abbau und Gewinnung für die Batterie essentieller kritischer Metalle ist zudem auf wenige Gebiete konzentriert, die zudem als sozioökologisch problematisch eingestuft werden müssen. Wenn Klimaschutz und Luftreinheit in Europas Städten bezahlt werden mit Kinderarbeit, gesundheitsgefährdenden Arbeitsbedingungen, der Destabilisierung empfindlicher Ökosysteme oder dem Risiko der Destabilisierung schwacher, politisch instabiler, staatlicher Strukturen, ist der globale Nutzen fragwürdig.

Die Superbatterie mit hoher Energiedichte, die bei kleinem Bauraum eine hohe Speicherkapazität und damit Reichweite erlaubt, ist auch im BayBatt erst einmal nicht in Sicht. Der Fokus liegt hier vielmehr auf dem Ersatz kritischer durch günstige, weltweit verfügbare Rohstoffe und einer Erhöhung der Sicherheit.

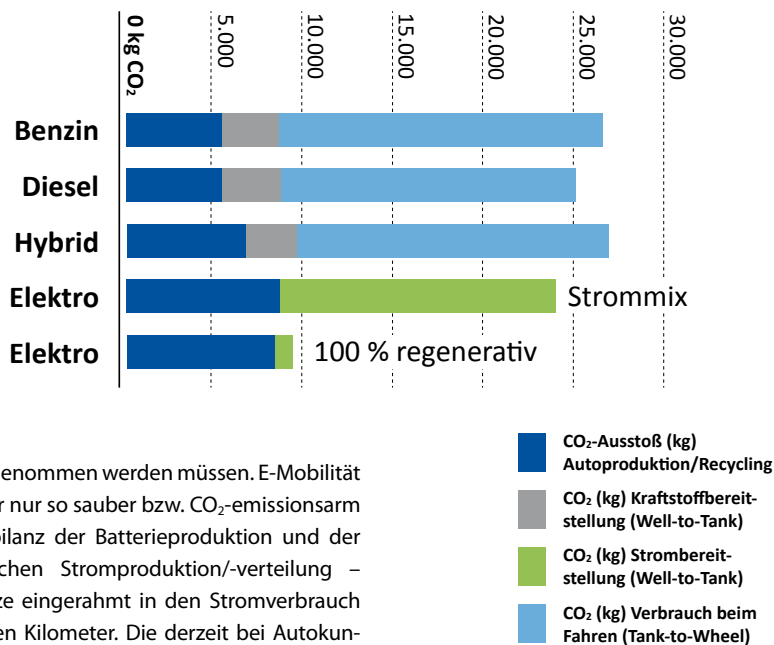


Abb. 3: Klimabilanz von Kleinwagen mit rund 150.000 Kilometern Laufleistung (Infografik: ADAC e.V., www.adac.de © 2018).<sup>10</sup>

- 1 W. Lee, et al.: Advances in the Cathode Materials for Making a Breakthrough in the Li Rechargeable Batteries. *Angew. Chem. Int. Ed.* (2019). DOI: 10.1002/anie.201902359.
- 2 Zum Aufbau und zur Funktionsweise von LIB siehe den Beitrag von Prof. R. Moos, S. 18-21.
- 3 Die Lösemittel sind brennbar und stellen daher ein Sicherheitsrisiko dar. Ein Ersatz durch feste ionenleitende Materialien ist Gegenstand intensiver Forschung. Siehe hierzu die Beiträge von Prof. M. Thelakkat, S. 26-29, und von Prof. R. Moos, S. 18-21.
- 4 The Boston Consulting Group: Batteries for Electric Cars. Challenges, Opportunities, and the Outlook to 2020. BCG 2010.
- 5 Vgl. auch C. Liu, et al.: Understanding electrochemical potentials of cathode materials in rechargeable batteries. *Mater. Today* (2016), 19 (2), 109-123. DOI: 10.1016/j.mattod.2015.10.009.
- 6 V. Zepf, et al.: Materials critical to the energy industry. An introduction. London 2015.
- 7 Preisentwicklungen bezogen von London Metal Exchange, Handelsblatt.
- 8 France24: Amnesty: Cobalt mined by DR Congo children could be used in smartphones. Jan. 19, 2016.
- 9 Lumen Learning (o.J.): Abundance of Elements in Earth's Crust.
- 10 ADAC: Die Ökobilanz unserer Autos: Elektro, Gas, Benzin, Diesel & Hybrid. 20. März 2018.





■ Michael Danzer

# Batteriemodellierung

Wege zum Verständnis und Design elektrochemischer Energiespeicher

■ Eröffnungsfeier des Bayerischen Zentrums für Batterietechnik auf dem Campus der Universität Bayreuth am 6. September 2018, von links: Prof. Dr.-Ing. Michael Danzer, Inhaber des Lehrstuhls für Elektrische Energiesysteme (EES) und Leiter des BayBatt; Dr. Markus Zanner, Kanzler der Universität Bayreuth; Prof. Dr. Marion Kiechle, Bayerische Staatsministerin für Wissenschaft und Kunst (Foto: Peter Kolb).

Als das Bayerische Zentrum für Batterietechnik (BayBatt) am 6. September 2018 festlich eröffnet wurde, fiel der symbolische Startschuss mittels einer Batterie. Die Bayerische Wissenschaftsministerin Prof. Dr. Marion Kiechle betätigte einen Hebel, drückte einen Metallstempel auf die Batterie – und schon leuchtete ein Schild, das den offiziellen Start des neuen Forschungszentrums auf unserem Campus signalisierte. Aus Gründen der Optik und der Sicherheit haben wir lediglich ein Modell einer Batterie verwendet, um den elektrischen Kontakt zu schließen. Wer genau hinschaute, konnte erkennen, warum das Modell nie als Batterie hätte funktionieren können: Es bestand aus einem hohlen Metallzylinder, die Pole lagen auf dem gleichen Potential, und eine elektrische Spannung wäre niemals abgreifbar gewesen. Dennoch glaubten viele Zuschauer, es handle sich tatsächlich um eine Batterie, und haben diese Konstruktion eingehend inspiziert.

### Was macht ein Modell zu einem Modell, und was definiert ein Modell in der Wissenschaft?

Das Batteriemodell der Eröffnungsfeier ist ein gegenständliches Modell, eine veranschaulichende Ausführung, ein Abbild, das Ähnlichkeiten in Form, Beschaffenheit, Gewicht und Größe mit einer realen Batterie aufweist. Ansonsten unterscheidet es sich vor allem in seinen Eigenschaften, in seiner Struktur und vor allem in seiner Funktion von seinem elektrisch aktiven Vorbild.



Mit den äußerlichen Ähnlichkeiten des Batteriemodells haben wir unsere Gäste getäuscht, quasi hinters Licht geführt. In der Wissenschaft verfolgen wir mit Modellen aber gerade das Gegenteil, wir wollen Licht ins Dunkel bringen. Der Modellierung kommt im wissenschaftlichen Erkenntnisprozess eine entscheidende Bedeutung zu. Modelle dienen dazu, komplexe Strukturen, Prozesse und Zusammenhänge zu vereinfachen, zu idealisieren und sie eben dadurch unserer Anschauung erst einmal zugänglich machen. Mit den Mitteln der Abstraktion und der Reduktion, der Analogie und der Konstruktion sollen Modelle uns helfen, die komplexe Wirklichkeit besser zu verstehen und letztlich zu einer Erkenntnis der Welt, zumindest aber zu einem tieferen und umfassenderen Verständnis eines bestimmten Ausschnitts der Welt zu gelangen. Modelle sind Vehikel, die uns in die Lage versetzen, reale Objekte,

Eigenschaften, Beziehungen und Zusammenhänge zu erforschen und technisch nutzbar zu machen.

Ein bekanntes gegenständliches Modell in der Wissenschaft ist die Doppelhelix der Desoxyribonukleinsäure (DNS), mit der Francis Crick und James Watson deren Molekularstruktur entdeckten. 1962 wurden sie dafür mit dem Nobelpreis für Medizin geehrt. Ein relevantes Beispiel aus der Energietechnik ist das Erklärungsmodell der Photovoltaik: Wenn wir Licht nicht als Welle beschreiben, sondern als Photon und damit als Teilchen, das in der Lage ist, in einem Halbleiter ein gebundenes Elektron aus dem Valenzband in das Leitungsband zu heben – dann verstehen wir anschaulich, dass wir an den Klemmen einer Solarzelle elektrischen Strom abgreifen können.

Es sind vielfältige Ziele, mit denen in der Wissenschaft Modellbildung betrieben wird:

- *Analysemodelle* werden entworfen, um Materialeigenschaften oder innere Strukturen von Prozessen aufzuklären.
- *Simulationsmodelle* werden in Computern implementiert, um Prozesse mit Hilfe von Simulationen statt mit Experimenten zu untersuchen.
- *Entwurfs- oder Synthesemodelle* dienen der beschleunigten Musterentwicklung (rapid prototyping), der sensorischen Überwachung oder der gezielten Beeinflussung technischer Systeme mit Hilfe der Methoden der modellbasierten Regelungstechnik.

**„Die Modellbildung in einem Forschungszentrum muss einem konzertierten Ansatz folgen, der die spezifischen Modelle der einzelnen Größenordnungen verbindet und Skalen überbrückt.“**

Jede Wissenschaftsdisziplin hat dabei ihre eigenen Modellsystematiken. Sie spricht in der Modellierung eine eigene Sprache mit einem eigenen Wortschatz und eigener Grammatik. Um interdisziplinär zwischen Physik, Chemie, Materialwissenschaft, Ingenieurwissenschaft und Informatik zusammenarbeiten zu können, um über den eigenen Tellerrand hinauszublicken und den Erkenntnishorizont zu erweitern, ist an den Schnittstellen der Disziplinen jeweils ein gegenseitiges Verständnis und eine beiderseitige Sprechfähigkeit, gegebenenfalls eine Übersetzung notwendig. Auf dem Campus der Universität Bayreuth haben solche interdisziplinären Kooperationen eine mehr als vier Jahrzehnte lange Tradition, die auch das neue Zentrum für Batterietechnik befruchten wird.

#### AUTOR



■ Prof. Dr.-Ing. Michael Danzer ist Inhaber des Lehrstuhls für Elektrische Energiesysteme (EES) und Leiter des Bayerischen Zentrums für Batterietechnik (BayBatt) an der Universität Bayreuth.

■ Abb. 1: Modell einer Batterie (Foto: Michael Danzer).

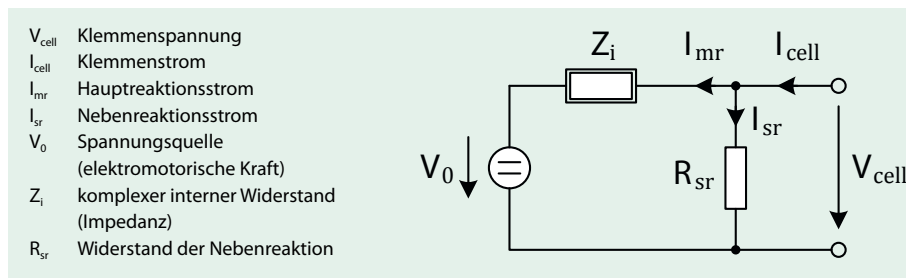
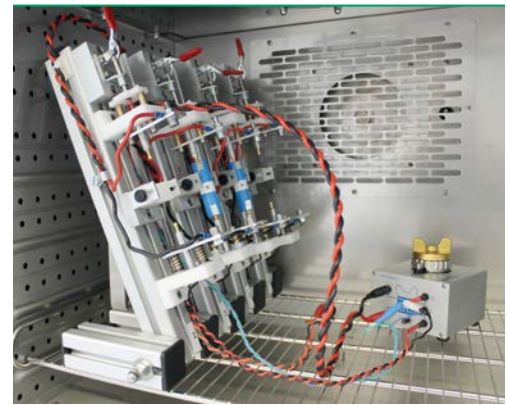


■ Abb. 2: Zellhalter für einen elektrischen Test von Experimental- und Rundzellen in einer Klimakammer (Foto: Christian Wißler).

■ Abb. 3: Das Ersatzschaltbild zeigt rechts im Modell die Klemmenspannung eines Energiespeichers. Der Hauptreaktionsstrom trägt zur Energiespeicherung bei, Nebenreaktionsströme führen zur Selbstentladung oder zur Alterung der Batterie. Die Struktur des Modells ist auf viele andere Technologien übertragbar (Bild: Michael Danzer).

Ansätze der Modellbildung für Batterien erstrecken sich über viele Skalen und Größenordnungen. Sie reichen

- vom Atom über das Molekül bis zum Partikel (Primärstruktur),
- von der Elektrode und dem Elektrolyt über Grenzflächen bis zur Elektroden-Elektrolyt-Einheit (Sekundärstruktur),
- von der Einzelzelle über den Zellverbund (Modul) bis zum Batteriesystem,
- vom Batteriesystem bis zur Integration in ein Energiesystem.



- 1 E. Peled: The Electrochemical Behavior of Alkali and Alkaline Earth Metals in Nonaqueous Battery Systems – The Solid Electrolyte Interphase Model. *Journal of the Electrochemical Society* (1979), Vol. 126, No. 12, 2047-2051.
- 2 M. Doyle, T. F. Fuller, J. Newman: Modeling of Galvanostatic Charge and Discharge of the Lithium/Polymer/InsertionCell. *Journal of the Electrochemical Society* (1993), Vol. 140, No. 6, 1526-1533.
- 3 G. L. Plett: Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs Part 2. Modeling and identification. *Journal of Power Sources* (2004), Vol. 134, 262-276.

Die Modellbildung in einem Forschungszentrum muss daher einem konzertierten Ansatz folgen, der die spezifischen Modelle der einzelnen Größenordnungen verbindet und Skalen überbrückt (Multiskalenmodelle). Zielorientierte, innerhalb der eigenen Disziplingrenzen entworfene Modelle mit klar abgegrenzten Randbedingungen sind zu erweitern, Erkenntnisse auf einer niedrigeren Skala sind auf der nächsthöheren nutzbar zu machen, Anforderungen der übergeordneten Skala sind auf die darunterliegende zu übertragen. Mitunter werden Wissenschaftler dabei den eigenen Wohlfühlbereich verlassen und Neuland betreten.

### Ecksteine der Modellierung

Die heute in Wissenschaft und Technik vorherrschende Lithium-Ionen-Batterie (LIB) ist eine vergleichsweise junge Technologie, die kommerziell noch keine 30 Jahre verfügbar ist. Sony hat die Technologie zu Beginn der 1990er Jahre für tragbare Elektronikgeräte vorgestellt. Seitdem haben Lithium-Ionen-Batterien einen unglaublichen Siegeszug hingelegt und sind heute in Uhren, Smartphones, Notebooks, Akkuschraubern, Elektrofahrzeugen sowie in großen stationären Speichern zu finden. Begleitet wurde diese rasante Entwicklung durch Analyse-, Simulations- und Entwurfsmodelle auf der Material- und auf der Systemebene. Drei Ecksteine

der Modellierung sollen hier besonders hervorgehoben werden:

■ Die Funktion von Lithium-Ionen-Batterien basiert auf der Einlagerung (Interkalation) von Lithiumionen in die Gitterstruktur eines Wirtsmaterials. Als Aktivmaterial für die negative Elektrode wird meist Graphit eingesetzt, obwohl dieses aufgrund der verwendeten organischen Elektrolyte nicht stabil ist. Es findet eine chemische Reaktion statt, die dauerhaft Lithiumionen bindet und damit die Kapazität der Batterie verringert. Emanuel Peled hat bereits 1979 ein Modell einer Solid Electrolyte Interphase (SEI) – also einer Zwischenphase oder Deckschicht zwischen einem Feststoff und einem flüssigen Elektrolyten – vorgestellt.<sup>1</sup> Zudem hat er ein mathematisches Modell für das Wachstum der Dicke  $d$  der SEI mit der Zeit  $t$  präsentiert:  $d = c \cdot \sqrt{t}$ . Für Lithium-Ionen-Batterien erklärt sein SEI-Modell, dass das Aktivmaterial nicht in direktem Kontakt mit dem Elektrolyten steht und dadurch eine beachtliche Langlebigkeit erreicht. Durch die beschriebene Gesetzmäßigkeit lässt sich der Kapazitätsverlust einer LIB tatsächlich analysieren und vorhersagen.

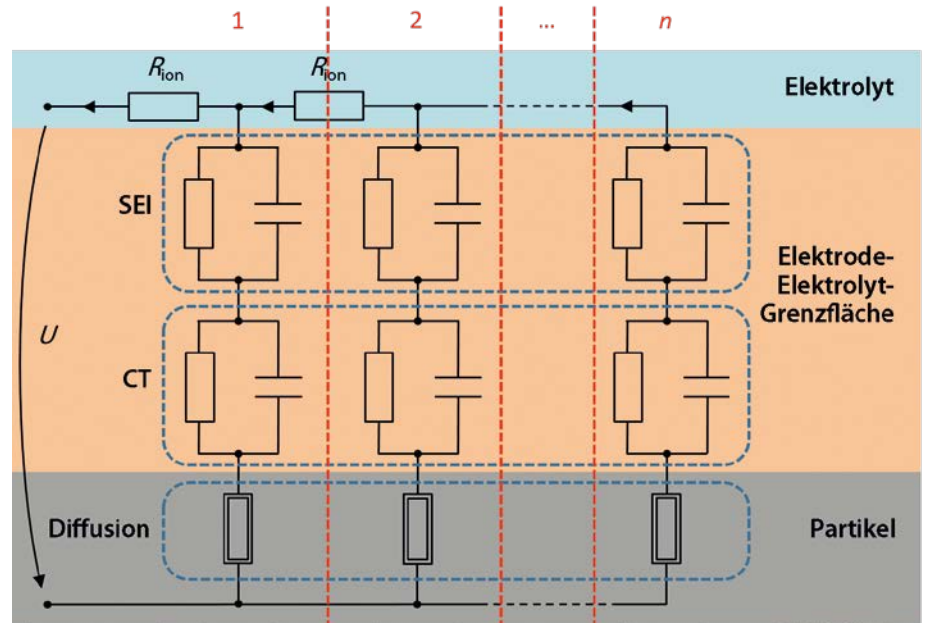
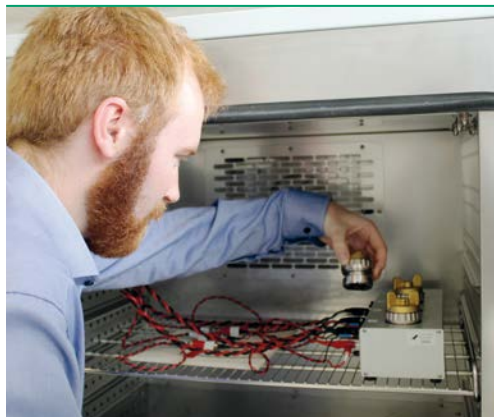
■ Ein Meilenstein der Modellierung von elektrochemischen Prozessen und Transportprozessen in Batterien ist das Newman-Modell von 1993, das auch als Theorie poröser Elektroden bekannt ist.<sup>2</sup> Die entscheidende Idee dieses Modellierungsansatzes ist es, die in einer Batterie stattfindenden physikochemischen Prozesse anhand ihrer Grundgleichungen (first principle models) ortsaufgelöst effizient zu rechnen. Die komplexe Geometrie einer dreidimensionalen Elektrode wird dabei durch Abstraktion auf zwei (Pseudo)-Dimensionen reduziert. Die eine Dimension ist die Flächennormale der Elektrode, die zweite der Radius eines sphärischen Partikels. Anhand von Gleichungen für Migration, Diffusion und Ladungstransfer lässt sich heute das elektrochemische Verhalten

### LITERATURTIPP

S. Schindler, M. A. Danzer: A novel mechanistic modeling framework for analysis of electrode balancing and degradation modes in commercial lithium-ion cells. *Journal of Power Sources* (2017), Vol. 343, 226-236. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2017.01.026.

komplexer Zellgeometrien mittels Finite-Elemente-Methoden (FEM) simulieren. Dabei lassen sich Struktur und Morphologie der Elektroden einfach variieren.

■ Der Ladezustand (state of charge, SOC) einer Lithium-Ionen-Batterie ist nicht direkt messbar – im Unterschied zur Blei-Säure-Batterie, deren Ladezustand über die Säurekonzentration ermittelt werden kann. Zudem fehlt der LIB-Technologie jegliche Überladetoleranz, wie sie der Bleiakku besitzt. Der Ladezustand einer Lithium-Ionen-Batterie muss daher penibel überwacht werden. Dies bedeutet, dass der SOC kontinuierlich und exakt bestimmt werden muss, Grenzwerte müssen strikt eingehalten werden. Gregory Plett hat 2004 ein Standardwerk zur modellbasierten Ladezustandsschätzung verfasst.<sup>3</sup> Das Entwurfsmodell für die Online-Diagnose ist ein elektrisches Ersatzschaltbildmodell des Ein-/Ausgangsverhaltens der messbaren Größen Strom und Spannung an den Klemmen der Batteriezelle. Das Modell ist durch elektrische Tests an realen Zellen parametrierbar und weist eine hohe Vorhersagegenauigkeit auf. Schätzalgorithmen nutzen diese Modellbeschreibung, um in der Anwendung den Ladezustand während des Betriebs aus den Messgrößen präzise zu rekonstruieren.



- U Spannung
- $R_{ion}$  ionischer Widerstand
- SEI Grenzschrift zwischen Elektrode und Elektrolyt (Solid Electrolyte Interphase)
- CT Ladungstransfer (Charge Transfer)

**Fazit**

Zusammenfassend ist festzuhalten: Modelle spielen eine entscheidende Rolle für die Entwicklung neuer Speicherkonzepte und den Betrieb von Batteriesystemen. Durch Analysemodelle erweitern wir unser Verständnis der gewünschten elektrochemischen Prozesse, aber auch der unerwünschten parasitären oder gar zerstörerischen Reaktionen. Durch Simulationsmodelle lassen sich Speicherkonzepte und Zeldesigns intensiv und umfangreich untersuchen, ohne dass es dafür nötig ist, mit hohem Aufwand Zellen zu fertigen. Durch Entwurfsmodelle lassen sich modellbasierte Methoden für Batteriemanagementsysteme entwickeln, die für einen leistungsfähigen, langlebigen und sicheren Betrieb von Batterien sorgen.

■ Abb. 4: Erweitertes, orts aufgelöstes, elektrochemisches Modell einer Elektrode als elektrisches Netzwerk des elektrischen und ionischen Ladungstransports. Elektrodenprozesse laufen in parallelen Zweigen und abhängig von lokalen Zuständen und Größen ab (Bild: Markus Hahn).

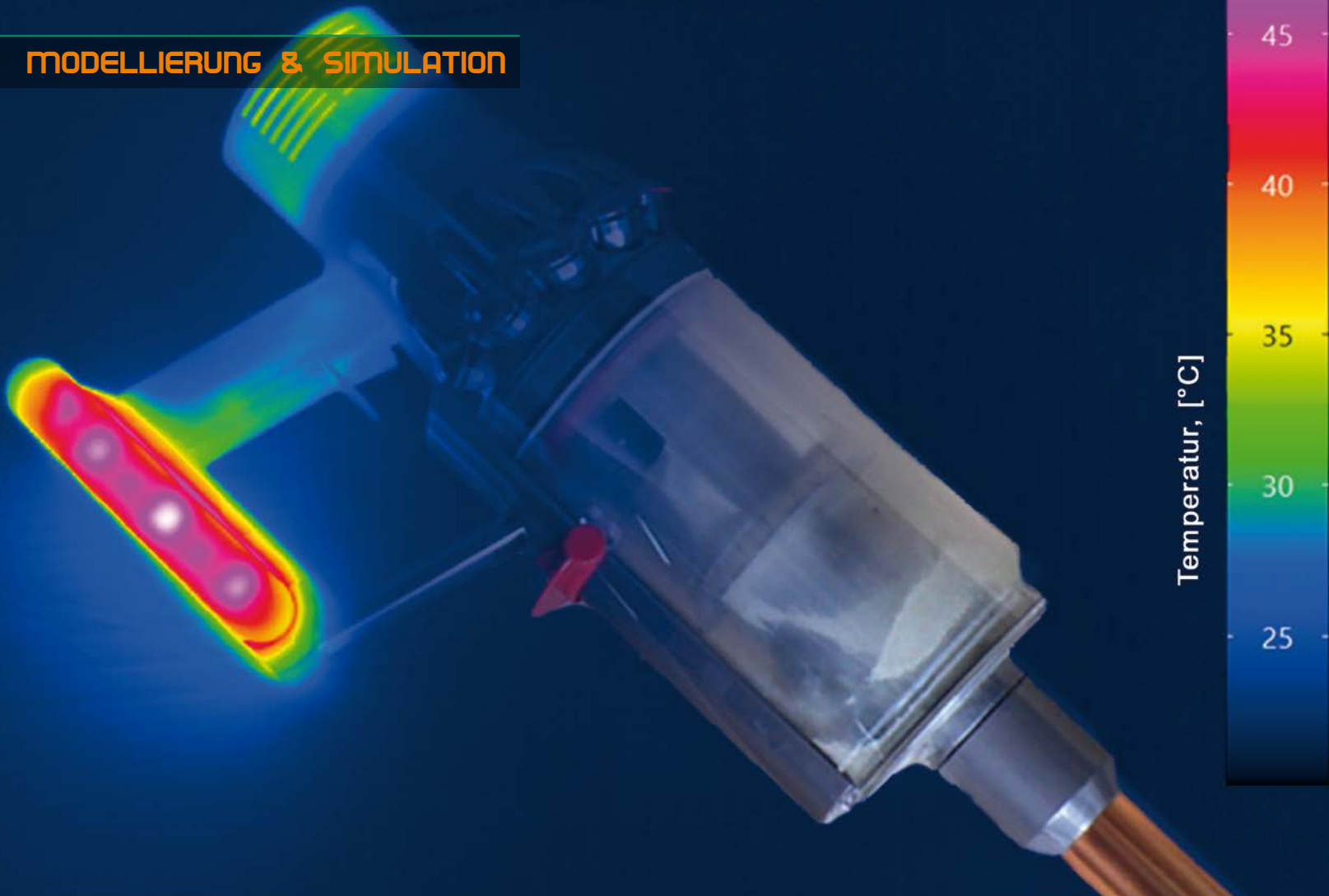
■ Abb. 5 (links): Experimentzellen zur Untersuchung von Batterieelektroden mit Referenzelektroden (Foto: Christian Wiffler).

■ Abb. 6 (links): Einlegen einer Experimentzelle in einen Zellhalter (Foto: Christian Wiffler).

**Batteriemodellierung im Studium**

An der Universität Bayreuth werden Studierende der Materialwissenschaft und der Energietechnik mit den vielseitigen Anforderungen und Implikationen der Modellierung auf unterschiedlichen Skalen vertraut gemacht. Dabei lernen sie, über die einzelnen Disziplinengrenzen hinweg kommunikationsfähig zu sein. Im Modul „Modellbildung und Simulation Elektrochemischer Speicher (MSES)“ werden unterschiedliche Konzepte der Batteriemodellierung vorgestellt, die von den Studierenden anschließend in einem intensiven Programmierpraktikum eigenhändig umgesetzt werden. Das Modul ist ein Angebot des Lehrstuhls Elektrische Energiesysteme (EES), der dabei vom Lehrstuhl Physikalische Chemie I unterstützt wird.





■ Markus Retsch  
Kai Herrmann  
Flora Bitterlich

# Wärmemanagement in Batterien

Erhöhte Sicherheit durch thermische Analysen und Simulationen

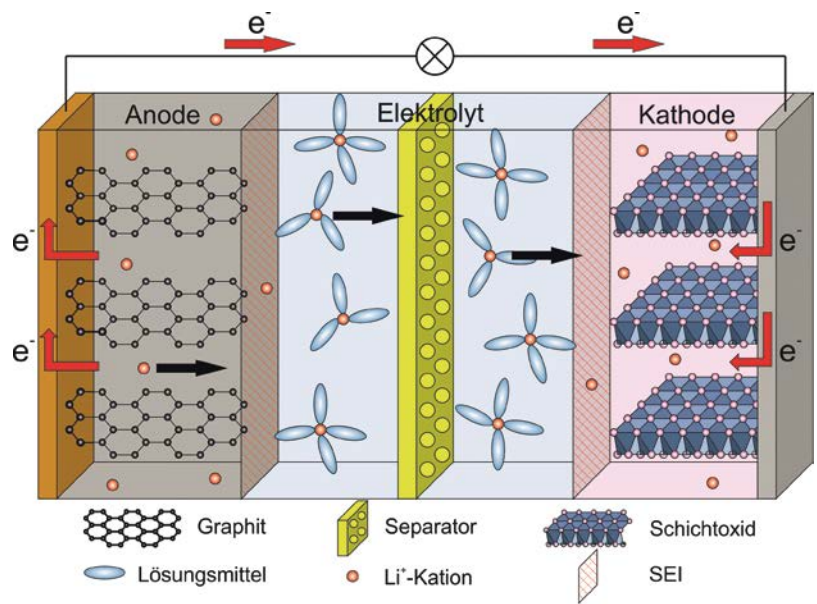
■ Eine Wärmebildkamera macht die Temperaturunterschiede sichtbar, die der Kopf eines batteriebetriebenen Handstaubsaugers nach vollständiger Entladung aufweist (Bild: Markus Retsch).

Energiespeicherung und Stromversorgung werden in unserer zunehmend digitalisierten Welt immer wichtiger. Zu diesem Zweck wurden verschiedenste Technologien zur Energiespeicherung entworfen, die sich bezüglich ihrer Effizienz und Leistung, aber auch hinsichtlich der Herstellungskosten und ihrer Lebensdauer stark unterscheiden. Die am meisten verbreitete Form mobiler Energiespeicherung und selektiver Energiefreisetzung sind Batterien. Unter der Vielzahl an Batterietypen sticht besonders die Lithium-Ionen-Batterie (LIB) hervor. Im Vergleich zu anderen wiederaufladbaren Batterien (Natrium-Ionen-Batterie, Nickel-Metallhydrid-Batterie) besitzt sie eine erhöhte Energiedichte, zudem bleibt ihre Leistungsfähigkeit auch nach mehreren tausend Lade- und Entladezyklen annähernd gleich. Dennoch kommt es auch bei LIBs zu Problemen. So musste zum Beispiel das Samsung Note 7 im Jahr 2016 zurückgerufen werden, da vermehrt Brände auftraten. Dies ist nur *ein* Fall von LIBs, in denen es aufgrund von schlechtem Wärmemanagement in der Batterie zu einem Brand oder sogar zu einer Explosion der Batterie kam.

Warum ist die Wärmeverteilung innerhalb einer Batterie so wichtig? Die Lade- und Entladevorgänge in einer Batterie beruhen auf elektrochemischen Prozessen, genauer gesagt: einer Kombination aus Reaktionen innerhalb der Batterie und einem Ladungstransport in Form von Lithiumionen und dabei freiwerdenden Elektronen. Diese Prozesse sind stark temperaturabhängig. Zusätzlich wird in jeder Batterie durch den erzeugten Stromfluss Hitze erzeugt, was als Joulesche Erwärmung bezeichnet wird. Kommt es durch unvorhergesehene Einflüsse – zum Beispiel eine erhöhte Umgebungstemperatur, mechanische Beschädigung oder Alterung – zu einer lokalen Temperaturerhöhung, so kann diese eine Vielzahl an teilweise unauffaltbaren Folgereaktionen auslösen. Im besten Fall verringern diese Folgereaktionen nur die Funktionalität der Batterie, im schlechtesten Fall entsteht ein Brand.

### Kontrollverlust in der Batterie

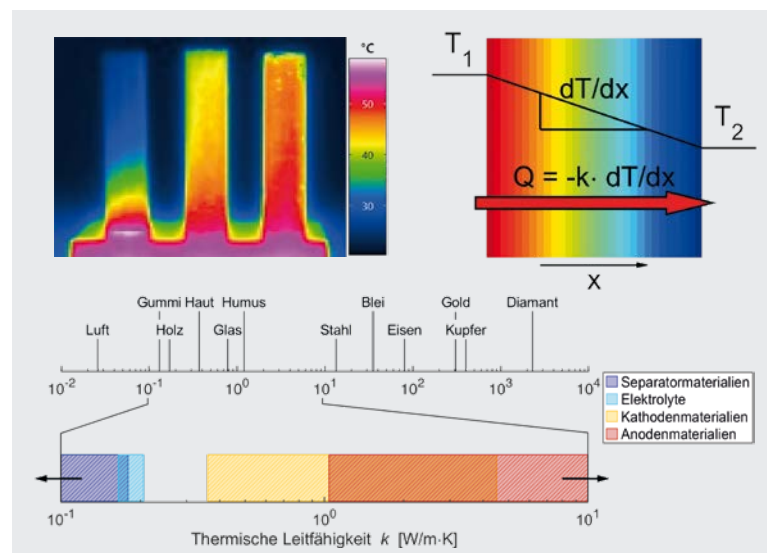
Wie kann die Entwicklung einer solchen thermischen Kettenreaktion vermieden werden? Zunächst ist eine genaue Kenntnis über den Aufbau einer Batterie nötig. Eine Lithium-Ionen-Batterie (Abb. 1) besteht im Normalfall aus einer Lithiumverbindung als Kathode und einer kohlenstoffbasierten Anode, meist Graphit. Die Elektroden sind zur Vermeidung eines Kurzschlusses durch eine dünne Polymermembran,



den Separator, getrennt. Dieser ist durchlässig für Lithiumionen. Um den Transport der Lithiumionen zu erleichtern, ist die Batterie mit einem flüssigen Elektrolyt gefüllt, der die Ionen koordiniert und für einen schnellen Ladungstransport sorgt. Meist handelt es sich hierbei um Lithiumsalze, die in organischen Lösungsmitteln gelöst sind. Die Funktion der Lithium-Ionen-Batterie beruht hauptsächlich auf reversiblen Reaktionen an den Elektroden. Dabei werden Lithiumionen eingelagert bzw. wieder freigesetzt. Die hierbei generierten Elektronen werden durch eine Aluminiumschicht auf der Kathode und eine Kupferschicht auf der Anode zum äußeren Stromkreis weitergeleitet. Für die meisten kommerziellen An-

■ Abb. 1: Schematischer Aufbau einer Lithium-Ionen-Batterie. Der Elektronen- und der Ionenfluss sind für den Entlade-Prozess gezeigt (Grafik: Markus Retsch / Kai Herrmann).

■ Abb. 2: Links oben: Temperaturverteilung in Stäbchen aus unterschiedlichen Materialien auf einer Heizplatte. Rechts oben: Definition der Wärmeleitfähigkeit über den Temperaturgradient nach Fourier. Unten: Einordnung der Wärmeleitfähigkeit typischer Batteriematerialien im Vergleich zu anderen Materialien (Abbildungen: Kai Herrmann).



## „Ein gezieltes Temperaturmanagement benötigt vor allem Kenntnisse über die thermischen Eigenschaften der Materialien.“

### AUTOREN



■ Prof. Dr. Markus Retsch ist Inhaber des Lehrstuhls für Physikalische Chemie I an der Universität Bayreuth.



■ Kai Herrmann M.Sc. ist Doktorand am Lehrstuhl für Physikalische Chemie I.



■ Flora Bitterlich B.Sc. ist Masterstudentin am Lehrstuhl für Physikalische Chemie I.

■ Abb. 3: Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mittels Light-Flash-Analyse (Foto: Markus Retsch).

wendungen werden mehrere solcher Batteriezellen zu einem Batteriemodul zusammengefügt.

Wo liegen nun die Schwachpunkte bezüglich des Wärmemanagements? Die Batterie erzeugt durch den Stromfluss Wärme, sowohl während des Ladeals auch während des Entladeprozesses. Zusätzlich wird durch die ablaufenden Reaktionen Hitze erzeugt. Im Normalzustand ist dies nicht problematisch. Gerät die Temperatur jedoch außer Kontrolle, wird eine thermische Kettenreaktion ausgelöst. Dieser Prozess kann in drei Stufen unterteilt werden:

- Am Anfang steht eine lokale Temperaturerhöhung. Diese kann zum Beispiel durch mechanische Beschädigung oder einen inneren Kurzschluss ausgelöst werden. In diesem Stadium wechselt die Batterie zu einem abnormalen Zustand, die innere Temperatur beginnt zu steigen.
- Jetzt beginnt die Überhitzung. Die Grenzschicht zwischen Anode und dem Elektrolyt (SEI) beginnt sich aufzulösen. Sobald der Elektrolyt direkten Kontakt zu der Anode hat, reagiert das Lithium in der Anode mit den organischen Lösungsmitteln im Elektrolyt. Dabei werden leicht entzündliche Kohlenwasserstoffe freigesetzt, wodurch sich sowohl der Druck als auch die Temperatur in der Batterie erhöhen. Ab etwa 130 Grad Celsius schmilzt der Separator. Dies führt zu einem Kurzschluss zwischen Kathode und Anode. Je nach Kathodenmaterial kann bei dessen Zersetzung zusätzlich Sauerstoff freigesetzt werden.
- Damit ist die dritte Phase erreicht. In der Batterie hat sich eine hochentzündliche Mischung bei erhöhter Temperatur und erhöhtem Druck angereichert, die durch Brand oder Explosion abreagiert.

Zur Vermeidung einer thermischen Kettenreaktion ist vor allem die Temperaturkontrolle im Normalbetrieb entscheidend. Diese kann extern durch äußere Kühlung des gesamten Batteriemoduls erreicht werden. Aber auch das interne Design einer einzelnen Batteriezelle kann zur Vermeidung lokaler Überhitzung beitragen. Mögliche Ansätze hierfür sind das gezielte Design der Grenzflächen zwischen den Batteriekomponenten sowie ein anisotroper Aufbau der Batterie, damit die entstehende Wärme besser abgeführt wird. Hierfür sind die Materialien der einzelnen Komponenten und deren Wärmeleitfähigkeiten entscheidend. Gleichzeitig sind diese Komponenten aus sehr dünnen oder uneinheitlich strukturierten

Materialien aufgebaut. Ein gezieltes Temperaturmanagement benötigt somit vor allem Kenntnisse über die thermischen Eigenschaften dieser Materialien. Dabei müssen die verschiedenen Längenskalen und Grenzflächen innerhalb einer Batterie berücksichtigt und aufeinander abgestimmt werden.

### Thermische Charakterisierung

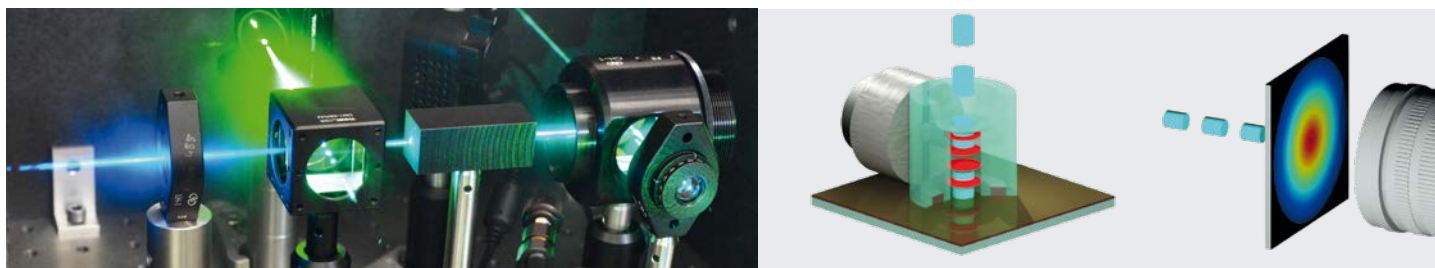
Um verschiedene Materialien bezogen auf ihre thermischen Eigenschaften einzuordnen und zu vergleichen, wird meist die thermische Leitfähigkeit als Kenngröße verwendet. Diese ist analog zur elektrischen Leitfähigkeit ein Maß dafür, wie gut ein Material Wärme leitet.

Zur Quantifizierung dieser Eigenschaft hat Joseph Fourier bereits im Jahr 1822 ein Gesetz formuliert, das für einfache Anwendungen und zur Erklärung in einer eindimensionalen Form verwendet werden kann. Es gibt an, dass die lokale Wärmestromdichte  $Q$  proportional zum Temperaturgradient  $\frac{dT}{dx}$  in Richtung des Wärmeflusses ist. Die Proportionalitätskonstante stellt dabei die thermische Leitfähigkeit  $k$  dar. Die Wärmeleitfähigkeit lässt sich zum Beispiel durch die Temperaturverteilung entlang dreier Stäbchen aus verschiedenen Materialien mit Hilfe einer Infrarotkamera darstellen (Abb. 2). Den stärksten Temperaturgradient zeigt dabei das Polymerstäbchen auf der linken Seite mit der geringsten Wärmeleitfähigkeit.

Die thermische Leitfähigkeit verschiedener Materialien erstreckt sich über mehrere Größenordnungen, wobei für Batterien relevante Materialien lediglich einen kleinen Bereich umfassen. Erwähnenswert ist die hohe thermische Leitfähigkeit von Graphit, die bei mehreren hundert Watt pro Meter und Kelvin liegt. Da Graphit







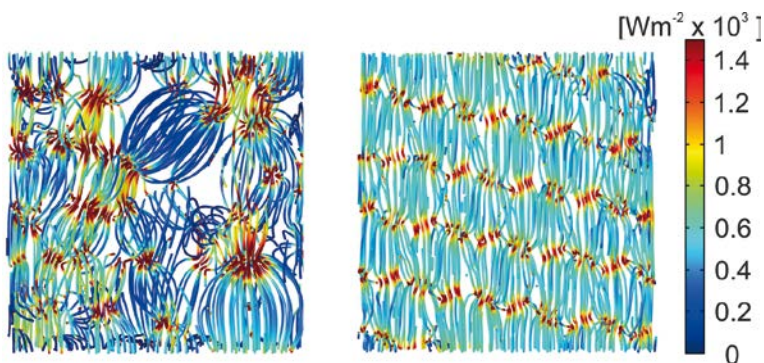
ein zweidimensionales Material darstellt, ergibt sich je nach Richtung des Wärmeflusses eine unterschiedliche thermische Leitfähigkeit. Fließt Wärme innerhalb der zweidimensionalen Flächen, so liegt eine hohe Wärmeleitfähigkeit vor. Fließt sie jedoch senkrecht dazu, ist die thermische Leitfähigkeit drastisch verringert. Eine solche Richtungsabhängigkeit der untersuchten Eigenschaft wird Anisotropie genannt.

Mit den Methoden, die in der Physikalischen Chemie der Universität Bayreuth etabliert sind, ist es möglich, solche anisotropen Materialien zu charakterisieren. Entscheidend ist dabei die thermische Diffusivität. Sie ist eng mit der Wärmeleitfähigkeit verknüpft und stellt ein Maß für die Geschwindigkeit der Temperaturausbreitung innerhalb eines Materials dar. Um die thermische Diffusivität in einem großen Temperaturbereich bestimmen zu können, ist ein Laser-Flash-Gerät vorhanden, mit dem bei Temperaturen bis zu 1.250 Grad Celsius gemessen werden kann (Abb. 3). Die Messung beruht dabei auf einer Erwärmung der unteren Seite der freistehenden Probe durch einen Lichtpuls, während die auf der Oberseite ankommende Temperatur zeitabhängig mithilfe eines Infrarot-Detektors aufgenommen wird. Bei Materialien mit hoher Dicke und geringer Diffusivität liegt eine große Zeitverzögerung vor, während bei dünnen Materialien mit hoher Diffusivität die Zeitverzögerung sehr gering ist.

Zur Charakterisierung von anisotropen Materialien können die photo-akustische Methode sowie die Lock-In-Thermographie eingesetzt werden (Abb. 4). Bei beiden Methoden wird ein modulierter Laser als periodische Wärmequelle genutzt. Bei der photo-akustischen Messmethode dringt die erzeugte Wärme vor allem senkrecht in das Material ein. Dabei wird in einem über der Probe liegenden abgeschlossenen Volumen ein akustisches Signal erzeugt. Im Gegensatz dazu wird die Lock-In Thermographie verwendet, um die thermischen Eigenschaften in der Ebene – also parallel zur Probenoberfläche – zu messen. Das auf der Probenoberfläche entstehende radiale Temperaturprofil kann mit einer hochauflösenden Wärmebildkamera aufgenommen und anschließend ausgewertet werden. Indem man die durch beide

Methoden bestimmten Eigenschaften vergleicht, ist es möglich, die vorliegende Anisotropie zu bewerten. Da viele Batteriesysteme in einem Schichtaufbau realisiert werden, liegen auch dort oftmals anisotrope thermische Eigenschaften vor.

In der Bayreuther Forschungsgruppe besteht jedoch nicht nur die Möglichkeit zur experimentellen thermischen Charakterisierung, sondern auch zur Simulation verschiedenster Fragestellungen. Hierbei wird die Software COMSOL® Multiphysics eingesetzt, wodurch gekoppelte physikalische Vorgänge simuliert werden können. So lässt sich unter anderem der Einfluss von erzwungener Konvektionskühlung oder der Kühlleistung eines Moduls einschätzen. Man kann damit aber auch Details sichtbar machen, die sich einer direkten Messung entziehen. Abb. 5 zeigt beispielsweise den Wärmefluss durch eine heterogene, partikuläre Struktur. Das Größenverhältnis der verwendeten Partikel hat hierbei einen enormen Einfluss auf den Pfad des Wärmetransports.



### Zukunftsperspektiven

Um die Batteriesicherheit durch gezieltes Design der verwendeten Materialien zu erhöhen, ist die thermische Charakterisierung der einzelnen Materialien unabdingbar. Nur so lassen sich Ansätze zur Problemlösung bereits innerhalb der Zelle identifizieren. In Kombination mit verbesserten Simulationen können sich auf diese Weise neue Möglichkeiten für die Materialauswahl und den Zellaufbau für Batterien ergeben, die mit steigender Leistungsdichte zugleich eine erhöhte Sicherheit aufweisen.

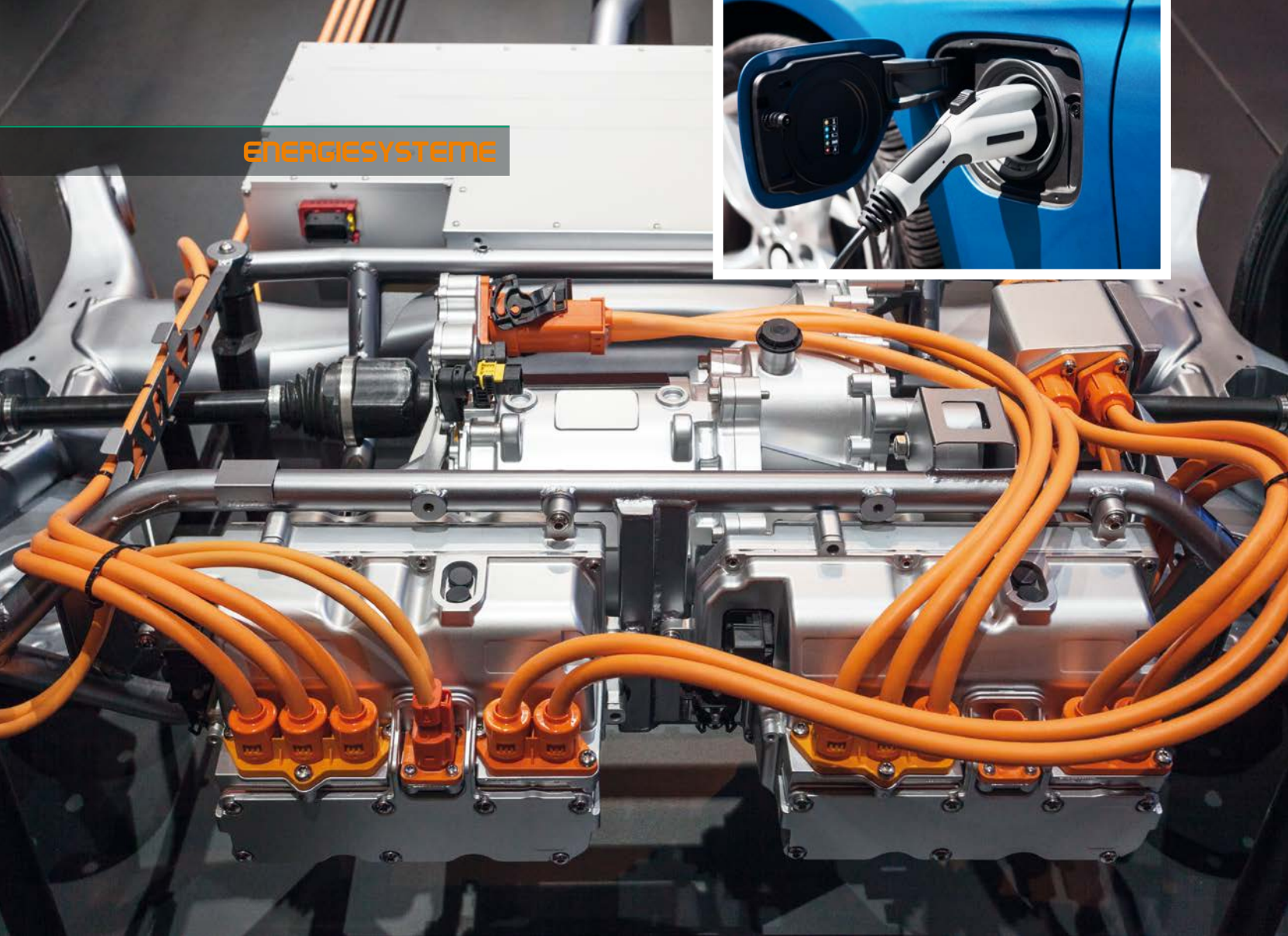
■ Abb. 4: Verschiedene Methoden erlauben die Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit in dünnen und anisotropen Proben. Links: Laseraufbau im Labor, Mitte und rechts: Schematische Darstellung der photoakustischen Messmethode und der Lock-in-Thermographie (Foto und Abbildungen: Kai Herrmann).

### LITERATURTIPPS

F. A. Nutz et al.: Low Thermal Conductivity through Dense Particle Packings with Optimum Disorder. *Advanced Materials* (2018), Vol. 30, Issue 14. DOI:10.1002/adma.201704910.

P. Ruckdeschel, A. Philipp and M. Retsch: Understanding Thermal Insulation in Porous, Particulate Materials. *Adv. Funct. Mater.*, 2017, 27, DOI: 10.1002/adfm.201702256.

■ Abb. 5: Computergestützte Simulationen erlauben es, die Ausbreitung von Wärme in ungeordneten und geordneten Materialien sichtbar zu machen (vgl. F. A. Nutz, et al., Literaturtipps) (Abbildungen: Markus Retsch).



■ Mark-M. Bakran  
Michael Gleißner  
Teresa Bertelshofer

# Batterien und elektrische Antriebe

Systembetrachtungen für die Elektromobilität

■ Getriebe eines Plug-In-Hybridfahrzeugs (sst).  
Kleines Foto: Aufladung eines Plug-In-Hybridfahrzeugs (sst).



Wohl jedem fällt bei der Elektromobilität sofort das Thema Batterie als prägend ein. Die Batterie bestimmt die Reichweite, ganz wesentlich die Mehrkosten und auch das Mehrgewicht gegenüber einem Verbrennerfahrzeug. Aus der Sicht des Fahrzeugantriebes ist die Batterie allerdings nur eine von vielen Komponenten des elektrischen Antriebsstranges. Als eine solche Systemkomponente muss die Batterie ganz andere Fragen beantworten als zum Beispiel aus Sicht der Elektrochemie.

Die Systemauslegung eines Fahrzeuges hat die Aufgabe, alle nur denkbaren Systemzustände eines Fahrzeuges mit verschiedensten Fahrzyklen bei unterschiedlichsten Bedingungen wie Temperaturen oder Laderegime zu betrachten und jeweils das elektrische und thermische Verhalten zu berechnen. Sie soll auch die zu erwartende Lebensdauer prognostizieren. Die Herausforderung ist dabei, dass die Modellierung über mehrere Größenordnungen in der Zeitskala erfolgen muss. Bei der Charakterisierung der Batteriezelle findet sie oft im Frequenzbereich statt. Die Systemauslegung ist hingegen auf ein im Zeitbereich anwendbares Modell angewiesen. Außerdem muss die Modellierung das elektrische und thermische Verhalten verkoppelt betrachten.

Der Lehrstuhl für Mechatronik, der am Zentrum für Energietechnik (ZET) der Universität Bayreuth mitwirkt, betrachtet die Batterie aus der Perspektive der Leistungselektronik. Diese ist bei jedem elektrisch angetriebenen Fahrzeug der Vermittler zwischen Batterie und Antriebsmotor. Hier werden die verstellbaren Spannungen für die Drehzahlsteuerung der Maschine erzeugt, aber auch die gepulsten Ströme, welche die Batterie belasten. Die Leistungselektronik ist damit bestimmend für die Batteriebelastung zum Beispiel mit hochfrequenten Strömen; gleichzeitig ist die Spannungsantwort der Batterie bestimmend

für die Antriebsauslegung, so auch für das erreichbare Drehmoment und die Drehzahl des Fahrmotors.

Diese spezielle Sicht auf die Batterie führt dazu, dass die Leistungselektronik angepasste elektrische und thermische Modelle der Batterie einsetzen muss, welche bei den besonderen Belastungsprofilen Gültigkeit besitzen.

### Elektrischer Antriebsstrang in einem Fahrzeug

Reine Elektrofahrzeuge (Battery Electric Vehicles, BEV) werden allein mit einer Batterie betrieben. Hybridfahrzeuge (Hybride Electric Vehicles, HEV) haben hingegen neben einem Elektromotor mindestens einen weiteren Antrieb. Ob ein Fahrzeug als Mild-, Full- oder Plug-In-Hybrid ausgeführt ist oder auch ein reines Elektrofahrzeug ist, bestimmt zwar wesentlich die Leistungsklasse des elektrischen Antriebes und auch die zu installierende Energie der Batterie, führt aber immer zu einer fast identischen elektrischen Antriebsstruktur (Abb. 2). Und sollte die Brennstoffzelle als Energielieferant interessant werden, so gilt auch dann, dass die elektrische Antriebsstruktur wie bei einem seriellen Hybridfahrzeug aussieht.



Abb. 1: Dipl.-Ing. Teresa Bertelshofer und Dr.-Ing. Michael Gleißner bei Messungen an einem Wechselrichter in der Versuchshalle des Lehrstuhls für Mechatronik (Foto: Christian Wiffler).

„Da bei einem batterieelektrischen Fahrzeug die Batterie die teuerste Einzelkomponente ist, lohnen sich hier Maßnahmen zur Wirkungsgradsteigerung extrem.“

Die zur Verfügung stehende elektrische Spannung an den Batterieklemmen ist Schlüsselgröße und Problem zugleich, denn der Fahrer verlangt auch noch volle Performance bei Kälte und schwacher Batterie.

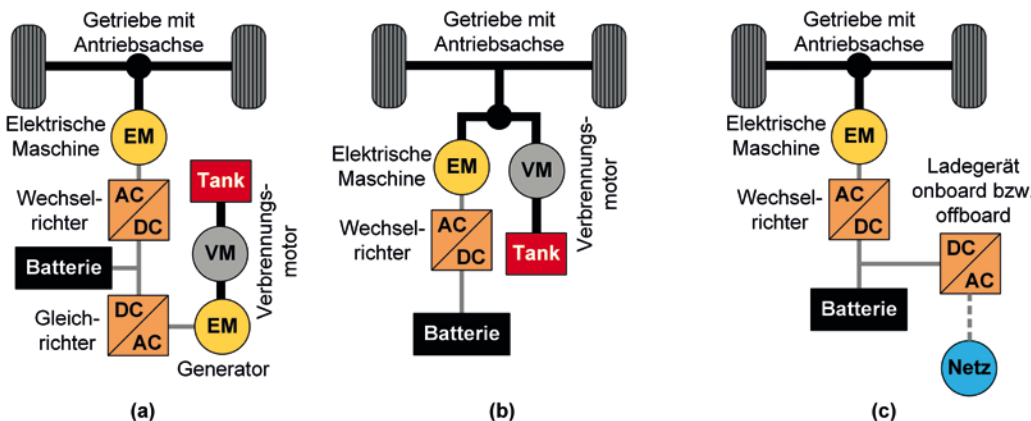
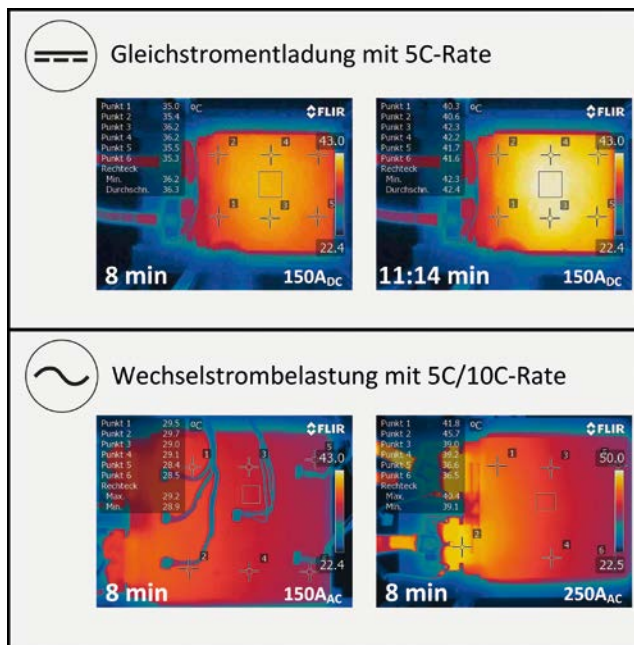
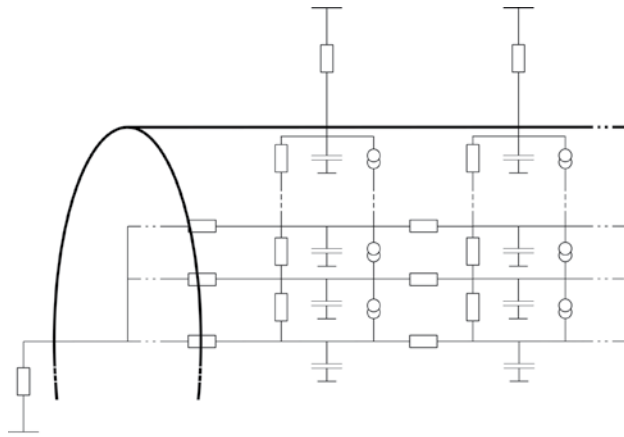


Abb. 2: Elektrische Antriebsstruktur eines a) Serial Hybrid Electric Vehicle, b) Parallel Hybrid Electric Vehicle, c) Battery Electric Vehicle (Grafik: Mark-M. Bakran / Michael Gleißner).



■ Abb. 3: Thermische Systemmodellierung: a) Repräsentatives thermisches Modell eines Batteriesystems, b) Messungen an einer Batterie mit AC- und DC-Belastung (Grafik und Bilder: Mark-M. Bakran / Michael Gleißner).



vielen Einflussgrößen und am Ende mit einem Ziel, nämlich möglichst kosteneffizient eine Funktion zu realisieren. Man muss also zum Beispiel die Frage beantworten: Soll eine kalte Batterie für bessere Performance erwärmt werden, und – wenn ja – soll dies extern geschehen oder durch die aktive Belastung der Batterie? Eine ähnliche Frage gilt für den anderen Fall, nämlich der zu warmen Batterie: Soll hier die Kühlung verbessert oder die Belastung reduziert werden (Abb. 3)? Und jeweils ist dabei zu beachten, was der Fahrer akzeptiert und was er als starke Einschränkung sieht. So könnte er sich beispielsweise in seinem gewohnten Fahrstil behindert fühlen, wenn sich das Fahrzeug nicht in der erwarteten Weise beschleunigen lässt.

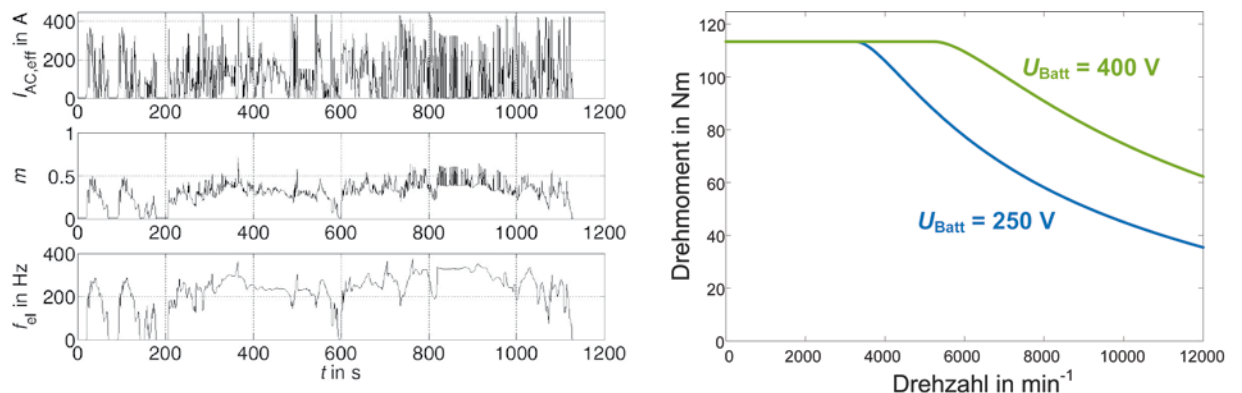
Von der Belastung der Batterie, welche typisch beim Zellhersteller zur Charakterisierung verwendet wird, unterscheidet sich das reale Fahrprofil eines Elektroautos deutlich. Man sieht zeitlich schnell veränderliche Vorgänge, Abb. 4 zeigt typische elektrische Einflussgrößen. Es ist deutlich erkennbar, dass die Strombelastung der Batterie höchst ungleichmäßig sein kann. Auf der anderen Seite erkennt man, dass das zur Verfügung stehende Antriebsmoment stark von der Batterie beeinflusst wird. Diese Momentencharakteristik ist gleichzeitig die große Stärke des Elektroautos, weil das volle Moment konstant und sofort zur Verfügung steht, bis die maximale Leistung erreicht ist. Daraus resultiert die beeindruckende Performance, wobei ein Elektroauto die meisten viel stärker motorisierten Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor an der Ampel locker stehen lässt.

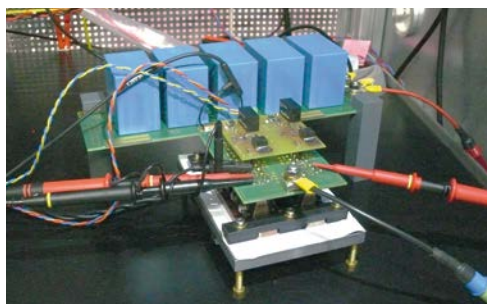
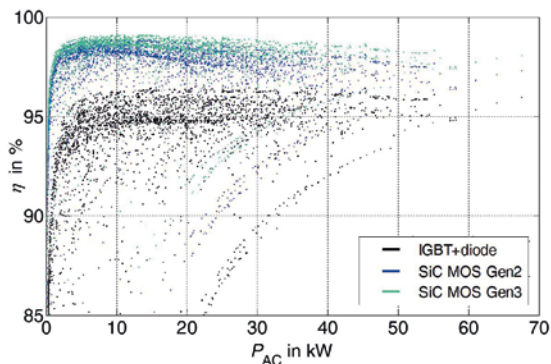
Die Systemauslegung hat also das Problem zu lösen, dass einerseits die maximale Batteriespannung die höchste elektrische Belastung für die Leistungselektronik darstellt, andererseits die minimale Batteriespannung die erreichbare Leistungsfähigkeit bestimmt. Damit sind wir bei einem typischen Problem im Ingenieursbereich, der Systemoptimierung mit

### Optimierung der Leistungselektronik für batterieelektrische Fahrzeuge

Ein weiteres grundsätzliches Thema der Systemauslegung unter Einbeziehung der Batterie ist die Effizienz. Auch wenn der Wirkungsgrad eines elektrischen

■ Abb. 4: Einflussgrößen auf die Batterieauslegung in Elektrofahrzeugen. Links: Strombelastung im Fahrspiel, rechts: Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie des Fahrmotors (Grafiken: Mark-M. Bakran / Michael Gleißner).

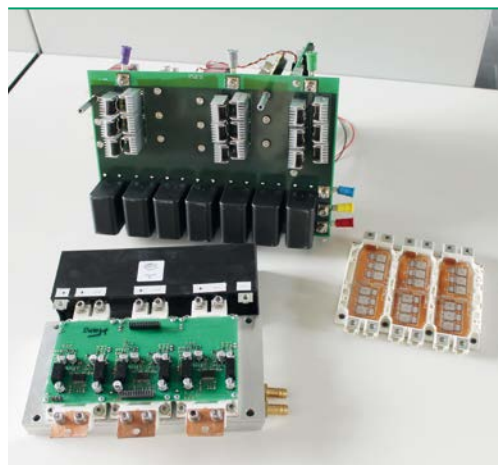




■ Abb. 5: Links: Wirkungsgradvergleich eines konventionellen Wechselrichters und eines Siliziumkarbidwechselrichters, rechts: Charakterisierungsmessplatz für einen SiC-Halbleiter (Grafik und Foto: Mark-M. Bakran / Michael Gleißner).

Antriebsstranges sehr hoch ist, entstehen natürlich auch Verluste. Hier gilt plakativ: Je weiter hinten im Antriebsstrang, also in Richtung Fahrmotor, die Verluste entstehen, desto kostspieliger sind sie. Denn die jeweils davor befindlichen Systemkomponenten müssen eine entsprechende zusätzliche Leistung zur Verfügung stellen, und dabei entstehen auch wiederum Verluste. Da bei einem batterieelektrischen Fahrzeug die Batterie die teuerste Einzelkomponente ist, lohnen sich hier Maßnahmen zur Wirkungsgradsteigerung extrem: So senkt beispielsweise ein um drei Prozent erhöhter Wirkungsgrad im Antrieb die Kosten für die Batterie um eben drei Prozent. Die Forschungsschwerpunkte in diesem Bereich konzentrieren sich aktuell vor allem auf den Einsatz neuer Halbleiter in der Leistungselektronik.

Bauelemente etwa nur noch 1/10 so dick sein müssen. Diese dünneren Bauelemente ermöglichen dann wiederum eine deutliche Reduktion der Verluste bei der Stromführung. Am Lehrstuhl für Mechatronik der Universität Bayreuth werden diese Bauelemente untersucht und auch komplette Wechselrichter für den Antrieb entwickelt. Hier kann mit realen Fahrprofilen nachgewiesen werden, um wie viel der Wirkungsgrad verbessert werden kann (Abb. 5).



■ Abb. 6: Kleine Wechselrichter für den Einsatz in der Batterieforschung (Foto: Christian Wiffler).

Hier verspricht das sogenannte Wide-Band-Gap-Material Siliziumkarbid deutliche Vorteile. „Wide Band Gap“ steht dabei für den größeren Bandabstand gegenüber normalen Silizium. Dieser erhöht die Belastbarkeit des Bauelementes mit Spannung, weshalb die

### Das schnelle Laden von Batterien in Elektrofahrzeugen

Diskussionen über kürzere Ladezeiten von Elektroautos sind auch in den Medien zunehmend ein Thema. Dabei wird dann schnell von Ladeleistungen deutlich oberhalb von 150 Kilowatt gesprochen. Schon bei den heute erreichbaren Ladeleistungen von rund 100 Kilowatt ist die Batterie das limitierende Systemelement. Deshalb muss die Ladeleistung bei höherem Ladezustand stark reduziert werden, um die Batterie nicht zu schädigen.

Bei noch höheren Leistungen kommt die Herausforderung hinzu, dass diese nur bei höheren Spannungen erreicht werden können. Das heißt: Die Spannung muss von rund 400 Volt Gleichspannung, wie sie heute typisch ist, auf 800 Volt gesteigert werden, um überhaupt die dazu notwendigen Ströme über das Ladekabel noch führen zu können. Wo schon heute für ein Batteriesystem eine Serienschaltung von etwa 100 Einzelzellen notwendig ist, steigert sich diese dann auf 200. Damit steigt auch der Aufwand für den Ausgleich der Ladungsunterschiede in den einzelnen Batteriezellen, die Zellsymmetrierung, denn jede Batteriezelle hat natürlich fertigungstechnisch bedingte Toleranzen. Soll nun nicht die schwächste Zelle die gesamte Leistungsfähigkeit begrenzen, so muss mit Hilfe von Leistungselektronik symmetriert werden (Abb. 7a).

### AUTOREN



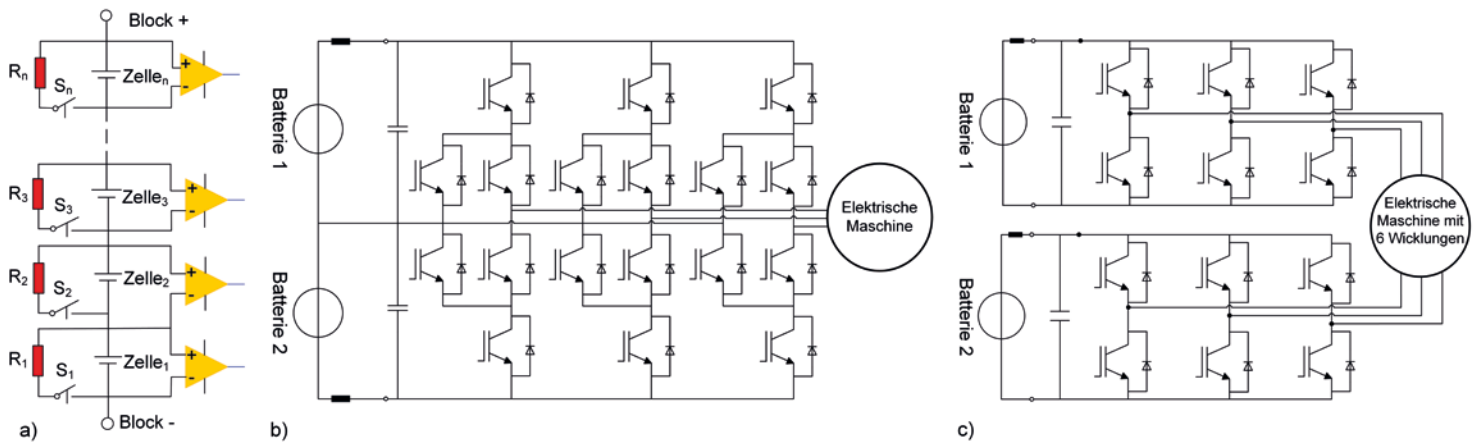
■ Prof. Dr.-Ing. Mark-M. Bakran ist Inhaber des Lehrstuhls für Mechatronik an der Universität Bayreuth.



■ Dr.-Ing. Michael Gleißner ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Mechatronik.



■ Dipl.-Ing. Teresa Bertelshofer ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Mechatronik.



■ Abb. 7: Schema der Zellschaltung mit Symmetrierung durch Widerstände (a); Schema einer aufgeteilten Batterie mit Multilevelwechselrichter (b) und mit mehrphasiger Maschine (c) (Grafiken: Mark-M. Bakran / Michael Gleißner).

Auch hier muss das Zusammenspiel aus Batterie und System sehr genau charakterisiert werden, denn zu viel vorhandene Symmetrierleistung erhöht die Gesamtkosten und verringert die Effizienz. Hingegen erhöht ein zu hoher Anspruch an die Fertigungsqualität wiederum die Kosten pro Zelle. Eine Bewertung ist auch hier wieder nur aus einer Systemperspektive möglich, durch die man zu einer vorgegebenen Fertigungstoleranz ermitteln kann, welche Symmetrierleistung vorgehalten werden muss. Auch aus der Systemperspektive muss dieses Verfahren mit alternativen Ansätzen verglichen werden. In diesem Fall wäre das zum Beispiel die Aufteilung der Komplett-Batterie in zwei Teilbatterien.

Ein solcher Ansatz ist wiederum nur möglich, wenn die Struktur des Antriebssystems entsprechend angepasst wird. Dabei gibt es wiederum zwei exemplarische Vorgehensweisen:

- Entweder man greift auf eine angepasste Leistungselektronik zurück, die in der Lage ist, eine Maschine aus zwei Teilbatterien zu speisen (Abb. 7b),
- oder man verwendet eine besondere elektrische Ausführung der Maschine, die mehrere Wicklungssysteme einsetzt (Abb. 7c).

Im ersten Fall setzt man sogenannte 3-Level- oder Mehrlevel- Wechselrichter ein, welche ein zusätzliches Potenzial bieten, den Wirkungsgrad zu erhöhen. Im zweiten Fall erreicht man ein Antriebskonzept, welches auch nach einem Fehler in einem Teilsystem in der Lage ist, den Fahrbetrieb aufrecht zu erhalten.

## Zusammenfassung

Diese beispielhafte Darstellung von Themen rund um das elektrische Antriebssystem eines Fahrzeugs hat gezeigt, dass es keine Komponente gibt, die nicht Rückwirkungen auf das gesamte Antriebssystem hat, und dass es kaum eine Systemscheidung gibt, die nicht eine Rückwirkung auf die Batterie als Systemkomponente hat. Ein Verständnis der Batterie aus der Systemperspektive ist damit der Schlüssel zum Erreichen des Gesamtoptimums. Und von diesem Optimum profitiert am Ende jeder, der künftig ein elektrisch angetriebenes Fahrzeug fährt.



■ Abb. 8: Der Lehrstuhl für Mechatronik unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Mark-M. Bakran hat auch 2019 wieder das Elefant Racing-Team der Universität Bayreuth bei der Konstruktion eines elektrisch betriebenen Rennautos unterstützt (Foto: © Elefant Racing).



■ Philipp Wetzlar und Felix Krohn

# Mit Elektroantrieb voll im Rennen

Elefant Racing e.V., eine Studentische Initiative der Universität Bayreuth, hat bereits Tradition: Seit 2004 nimmt sie alljährlich mit einem selbstgebauten Rennwagen an einer weltweiten Rennserie, der „Formula Student“, teil. Schon oft hat sie dabei international sichtbare Erfolge erzielen können. Mittlerweile sind es knapp 50 Studierende aus den Ingenieurwissenschaften, der BWL und der Informatik, die mit innovativen technischen Ideen gegen studentische Teams anderer Universitäten aus dem In- und Ausland antreten.

Im Jahr 2011 hat Elefant Racing als eines der ersten „Formula Student“-Teams den Umstieg auf die Elektromobilität gewagt. Seitdem entsteht jedes Jahr auf dem Bayreuther Campus ein neues Rennauto mit elektrischem Antrieb. Die Studierenden haben sich damit einen großen Wissens- und Erfahrungsvorsprung erarbeitet. Hier ist unter anderem das Akku-packaging-Konzept zu nennen, das 2019 – aufgrund der Einführung eines Allradantriebs – grundlegend verändert werden konnte: Die bislang zweiteiligen Lithium-Polymer-Akkumulatoren wurden durch einen großen Akku im Fahrzeugumpf ersetzt. Diese Umstellung auf ein neues Batteriekonzept führt nicht nur zu einer weiteren Gewichtsreduktion, son-

dern auch zu einer erhöhten Sicherheit. Außerdem konnten die Zellen dieses Jahr erstmalig unter Rennbelastung getestet werden.

Das Rennauto aus Bayreuth wiegt nur noch 200 Kilogramm und kann in knapp 2,5 Sekunden aus dem Stand auf 100 km/h beschleunigen. Seine Spitzengeschwindigkeit erreicht es bei 125 km/h.



■ Abb. 1: Der Rennwagen „FR 19 Loki“ des Elefant Racing-Teams 2019 (Foto: © Elefant Racing).

■ Abb. 2: Einbau der Batterie in den Rennwagen (Foto: © Elefant Racing).

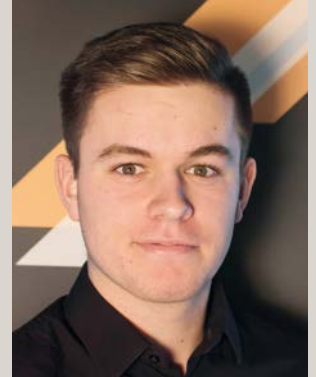
## FACT SHEET

- Zellen in 6 „Cellpacks“ gegliedert.
- 280 Zellen (Pouch-Cells) 140S2P.
- 6,84 Kilowattstunden.
- 420-588 Volt.
- Entladestrom >200 Ampere.
- Ladestrom ~100 Ampere.
- Im Sicherheitssystem trennen Relais den Plus vom Minuspol des Akkus. Der Zustand der Relais wird überwacht.
- Eigenes Batteriemanagementsystem.
- IMD (Insulation-monitoring-device)-Platine zur Isolationsüberwachung zwischen High- und Low-Voltage.
- LV-System wird über zwei isolierte Spannungswandler aus dem HV-System versorgt.
- Akku wird luftgekühlt durch 6 integrierte Lüfter (~100W) und zusätzlich durch einen Sicherheitsautomatismus gesichert, der im Fehlerfall die zusätzlichen Lüftungsschlitze im Akkukasten verschließt.

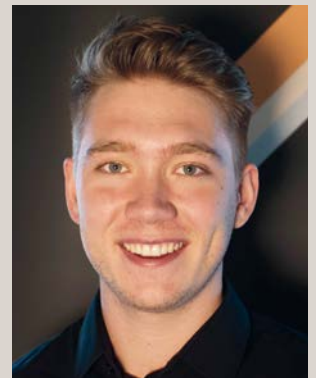
Auch 2019 erhielt das Elefant Racing-Team sowohl beim Bau als auch beim Testen des Rennwagens wieder Unterstützung von namhaften High-Tech-Unternehmen. Und ohne die enge Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Mechatronik unter der Leitung von Prof. Dr. Mark.-M. Bakran wäre der Umstieg auf den Allrad-Antrieb nicht möglich gewesen. Über die selbstentwickelten Radnabenmotoren, mit denen dieser Antrieb realisiert werden konnte, haben zwei Mitglieder des Bayreuther Teams ihre ingenieurwissenschaftlichen Masterarbeiten verfasst.

Das in Bayreuth entwickelte Konzept des neuen Elektro-Rennwagens auf ein „normales Straßenauto“ zu übertragen, ist wegen der auf den Rennbetrieb ausgelegten und dadurch sehr geringen Speicherkapazität der Batterie nicht sinnvoll. Doch ein Rückblick auf die enormen technischen Fortschritte, die seit der ersten Teilnahme an der Formula Student vor 15 Jahren erzielt wurden, stimmt optimistisch. Elektromobilität hat Zukunft, und Elefant Racing wird sie weiterhin mit kreativen Konstruktionsideen vorantreiben.

## AUTOREN



■ Felix Krohn, 1. Vorstand von Elefant Racing e.V.



■ Philipp Wetzlar, 2. Vorstand von Elefant Racing e.V.



■ Dieter Brüggemann  
Florian Heberle  
Sebastian Kuboth

# Smart Homes

Wärme und Strom für unser künftiges Wohnen

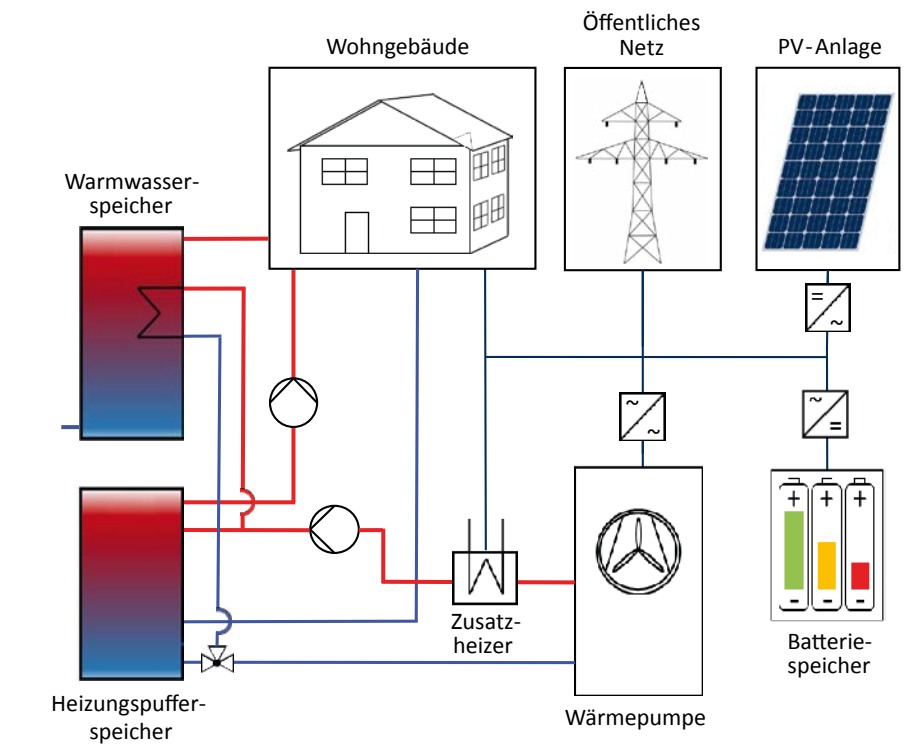
■ Zukunftsvision: Das gesamte Energiesystem eines Smart Home wird per Fernbedienung gesteuert (sst).



Mit dem Anblick des Sonnenaufgangs durch bereits geöffnete Jalousien, dem Klang der eingeschalteten Lieblingsmusik und dem Duft des frisch gebrühten Kaffees – so etwa stellt man sich das künftige Aufwachen in einem „Smart Home“ vor. Neben Annehmlichkeiten dieser Art sollen intelligente Systeme aber vor allem eine effizientere Energieversorgung und Lastregelung unserer Wohngebäude bewirken. So lässt sich der Stromverbrauch von Waschmaschine, Gefrierschrank und anderen Haushaltsgeräten auf die Erzeugungsspitzen im öffentlichen Netz abstimmen. Zudem wird derzeit untersucht, inwieweit private Batteriespeicher das Energienetz entlasten können. Ein wichtiges Ziel ist es hierbei, die Lebensdauer von Batterien zu steigern, ihre Kosten zu senken und so einen wirtschaftlichen Betrieb zu erreichen.

### Die Wirtschaftlichkeit von Batteriespeichern

In Privathaushalten werden die wiederaufladbaren, als Akkumulatoren bekannten Sekundärbatterien derzeit vor allem in Kombination mit Photovoltaik-Anlagen eingesetzt. Anstatt den selbst erzeugten Solarstrom in das öffentliche Netz einzuspeisen, um ihn später für den etwa dreifachen Preis wieder von dort zu beziehen, wird er in einer Batterie zwischengespeichert und später abgerufen, um den Haushalt zu versorgen. Dieser erhöhte Eigenverbrauch verbessert somit die Wirtschaftlichkeit. Ein weiterer Vorteil resultiert daraus, dass bei hoher PV-Leistung vertragsbedingt meistens nicht mehr als 70 Prozent der maximalen Anlagenleistung in das öffentliche Netz eingespeist werden dürfen. Durch die Verwendung einer Batterie speichert man den Überschussstrom,



■ Abb. 1: Schematischer Aufbau eines modernen Energiesystems in Wohngebäuden (Grafik: Sebastian Kuboth).

anstatt die Anlagenleistung „abzuregeln“ – das heißt sie so zu verringern, dass ihre Kapazität nicht voll genutzt wird.

Die Vergütung von Photovoltaikstrom, der in das öffentliche Netz eingespeist wird, sinkt stetig. So lag die für 20 Jahre gewährleistete EEG-Vergütung bei Inbetriebnahme einer Dachanlage, die eine Spitzenleistung von maximal 10 Kilowatt erbringt, im Juli 2018 noch bei 12,2 Cent pro Kilowattstunde. Mittlerweile ist dieser Wert aber weiter gesunken und betrug im Juli 2019 nur noch 10,6 Cent pro Kilowattstunde. Künftig ist mit weiter sinkenden Vergütun-



■ Abb. 2: Aufladen eines Elektroautos in der Garage. Die Ladestation wird mit recycelten EV-Batterien betrieben (sst).





■ Abb. 3: Volumenstromsensor der Versuchsanlage für Wärmepumpen (Foto: Christian Wißler).

gen zu rechnen. Daher wird es zunehmend attraktiv, die hauseigene PV-Anlage mit einem elektrischen Energiespeicher zu kombinieren.

Allerdings sind Investitionen in elektrische Energiespeicher, die selbst erzeugten Solarstrom für den Eigenverbrauch vorrätig halten, trotz stetig fallender Preise noch mit beachtlichen Kosten verbunden. Daher reicht die Kapazität oft nicht aus, um überschüssige Energie an sonnigen Tagen vollständig einzuspeichern. Deshalb werden am Zentrum für Energietechnik (ZET) der Universität Bayreuth innovative Konzepte untersucht, um die direkte Stromspeicherung in Batterien mit der Umwandlung elektrischer Energie in andere Formen nutzbarer Energie zu kombinieren. Dabei ist zu berücksichtigen, dass ein Großteil des Energiebedarfs von Privathaushalten in Form von Wärme anfällt. Deshalb geht es bei den integrierten Systemen für Wohngebäude, wie sie am ZET erforscht werden, insbesondere darum, Batterietechniken mit Power to Heat-Techniken – also der effizienten Umwandlung elektrischer in thermische Energie – zu verbinden.

### Batterien und Luft/Wasser-Wärmepumpen steigern die Autarkie von Wohngebäuden

Eine effiziente Methode, elektrische Energie in Wärme umzuwandeln, ist der Einsatz von Wärmepumpen. Diese beziehen neben der elektrischen Antriebsener-

gie Wärme aus der Luft, dem Wasser oder dem Erdreich der Umgebung. So können sie im Jahresmittel oftmals das Vierfache der eingesetzten elektrischen Energie als Wärme zur Verfügung stellen. Aus thermodynamischen Gründen wird dieses Verhältnis, die Arbeitszahl, hauptsächlich durch die Temperaturen der Wärmequelle (z.B. der Umgebungsluft) und der Wärmesenke (des Heizungswassers) bestimmt: Je geringer die Temperaturdifferenz zwischen Heizwasser und Wärmequelle ist, desto effizienter kann die Wärmepumpe arbeiten. Insbesondere bei Luft/Wasser-Wärmepumpen kann sich die Temperatur der Umgebungsluft aber um bis zu 20 Grad Celsius innerhalb von 24 Stunden ändern. Eine standardmäßige Wärmepumpenregelung ist normalerweise nicht in der Lage, auf diese Schwankungen ausreichend zu reagieren. In der Regel basiert diese auf einer für das jeweilige Gebäude vorkonfigurierten und von der Außentemperatur abhängenden Heizkurve, welche den Sollwert der Vorlauftemperatur festlegt, um den momentanen Wärmebedarf des Gebäudes abzudecken. Bei dieser Regelungsart muss die Wärmepumpe somit umso mehr Wärme erzeugen, je kälter die Umgebungsluft wird. Dies wirkt sich allerdings negativ auf die Arbeitszahl und den Eigenverbrauch des Solarstroms aus.

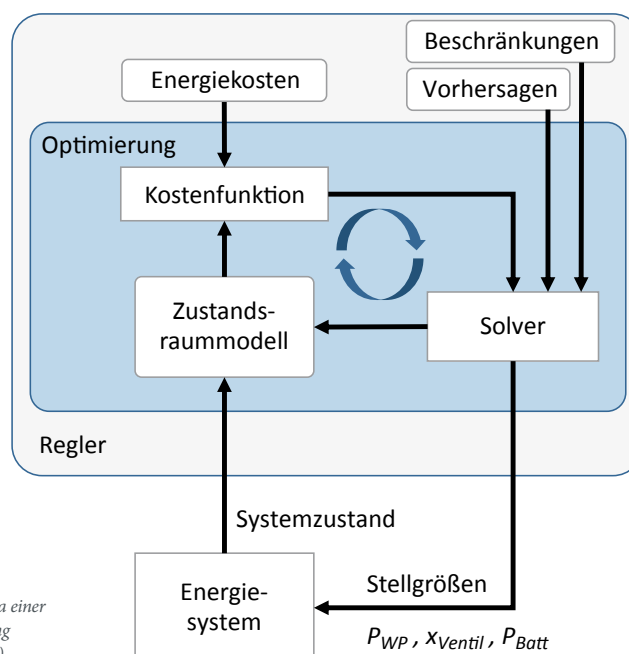
### Integrierte Energiesysteme: Flexibel durch modellprädiktive Regelung

Die Kombination von Wärmepumpen und Batterien führt heute dazu, dass der Energieautarkiegrad, also

#### LITERATURTIPPS

S. Kuboth, A. König-Haagen, F. Heberle, D. Brüggemann: Model predictive control of air-to-water heat pump heating systems with thermal energy storage. Proceedings of the 13th International Renewable Energy Storage Conference and Exhibition (IRES 2019). Düsseldorf, 2019.

S. Kuboth, F. Heberle, A. König-Haagen, D. Brüggemann: Economic model predictive control of combined thermal and electric residential building energy systems. Applied Energy (2019), Vol. 240, 372-385. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.01.097.



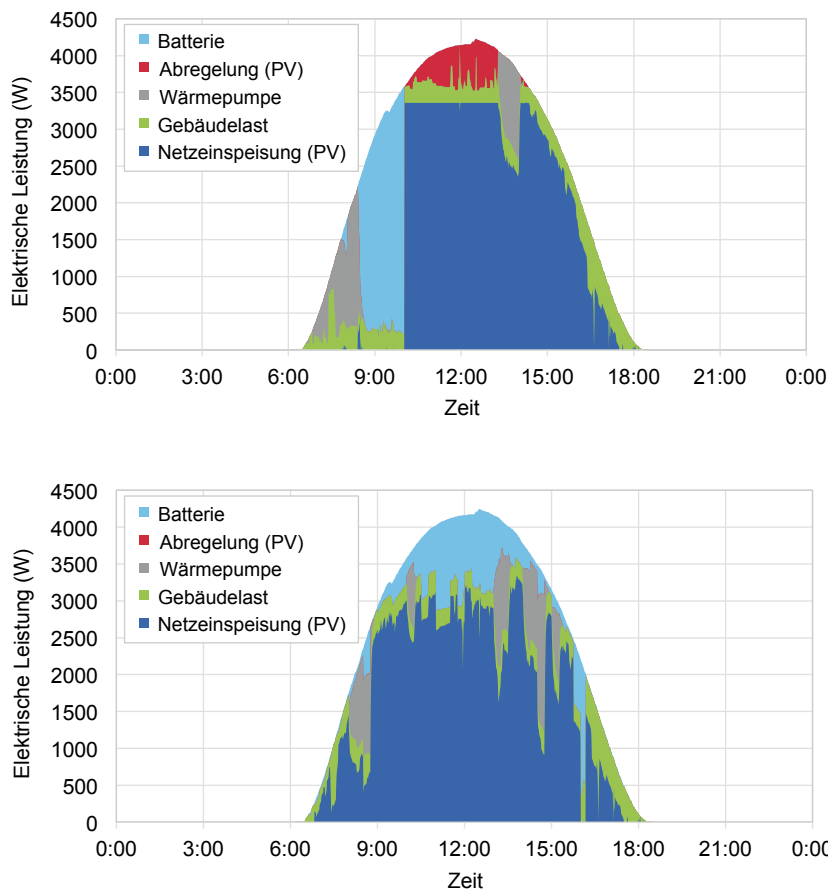
■ Abb. 4: Funktionsschema einer modellprädiktiven Regelung (Grafik: Sebastian Kuboth).

die eigenständige Energieversorgung mit Wärme und Strom, stark erhöht wird. Damit diese integrierten Energiesysteme sowohl energieeffizient als auch wirtschaftlich arbeiten, sollten sie sich möglichst flexibel wechselnden äußeren Einflüssen anpassen können. Ein besonders vielversprechender Ansatz ist die „modellprädiktive Regelung“. Mit dem Ziel, die Vorteile dieser Methode zu nutzen, entwickelt und testet der Lehrstuhl für Technische Thermodynamik und Transportprozesse (LTTT) Konzepte für integrierte Gebäudeenergiesysteme. Die Herausforderung besteht darin, die Vielfalt der Einflussfaktoren und physikalischen Zusammenhänge vorausschauend zu berücksichtigen. Neben der Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit ist der Komfort für die Bewohner ein weiteres wichtiges Kriterium – zum Beispiel eine ausreichende, aber nicht zu hohe Raum- und Brauchwassertemperatur.

Grundlage für die modellprädiktive Regelung von Smart Homes ist eine 24-stündige Prognose des Wetters am Ort des Gebäudes. Daraus lassen sich der zu erwartende Energiebedarf und die Menge sowie der zeitliche Verlauf des erzeugten Solarstroms ableiten. Aufgrund dieser Vorhersage werden kurzfristige Zukunftsszenarien berechnet und mit einer Kostenfunktion evaluiert, so dass es möglich ist, den Anlagenbetrieb mittels mathematischer Algorithmen gezielt zu optimieren. Dabei werden Wetterdaten – wie etwa die Außentemperatur und die Globalstrahlung – unter anderem durch Neuronale Netzwerke, eine Art von künstlicher Intelligenz, vorhergesagt; Lasten wie der Warmwasserverbrauch können prognostiziert werden. Indem der Regelungsvorgang mehrfach wiederholt wird, erhält man einen stabilen Regler, der auch auf unerwartete Wetteränderungen oder Verbräuche reagiert. Dieser ist zu jedem Zeitpunkt in der Lage, die Speicherung elektrischer Energie in der Batterie und die Speicherung thermischer Energie als mögliche Optionen gegeneinander abzuwägen und beide aufeinander abzustimmen. Die Zukunft des Smart Homes liegt somit in der flexiblen Koordinierung verschiedener Teilsysteme für die Energieversorgung.

### Smart Home-Systeme in der Simulation: Sinkende Kosten, längerlebige Batterien

Um integrierte Energiesysteme für Smart Homes entwickeln und optimieren zu können, ist es wichtig, die unterschiedlichen Szenarien zu verstehen, die sich aus wechselnden Tageszeiten und Wettereinflüssen ergeben. Für detaillierte Untersuchungen dieser Szenarien bieten sich Simulationen



■ Abb. 5: Oben: Tagesprofil der Leistung einer Photovoltaikanlage und Verwendung der elektrischen Energie im Standardfall. Unten: Tagesprofil der Leistung einer Photovoltaikanlage. Modellprädiktive Regelung entscheidet flexibel darüber, wie der erzeugte Solarstrom verwendet wird. Im Unterschied zur Standardanlage kommt es hier nicht zu einer Abregelung der PV-Anlage (Grafik: Sebastian Kuboth).

## Graduiertenkolleg „Energieautarke Gebäude“

In der TechnologieAllianzOberfranken (TAO) haben sich die Universitäten Bayreuth und Bamberg sowie die Hochschulen für Angewandte Wissenschaften Coburg und Hof zusammengeschlossen. Das Zentrum für Energietechnik (ZET) der Universität Bayreuth bildet dabei den Kern des gemeinsamen Graduiertenkollegs „Energieautarke Gebäude“. Die Forschungsarbeiten der Doktorandinnen und Doktoranden betreffen insbesondere die Bereitstellung und Speicherung von Energie für Gebäude. In diesem Zusammenhang wird derzeit auch ein Konzept für eine auf die neuen Anforderungen zugeschnittene modellprädiktive Regelung erarbeitet.

## AUTOREN



■ Prof. Dr.-Ing. Dieter Brüggemann ist Inhaber des Lehrstuhls für Technische Thermodynamik und Transportprozesse (LTTT) und Direktor des Zentrums für Energietechnik (ZET) an der Universität Bayreuth.



■ Dr.-Ing. Florian Heberle ist Akademischer Rat am LTTT.



■ Sebastian Kuboth M.Sc. ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am LTTT.

an. Deshalb haben die Bayreuther Ingenieure ein dynamisches Simulationsmodell erstellt, das auf physikalischen Modellen und daraus abgeleiteten empirischen Zusammenhängen basiert. Die Ergebnisse waren eindrucksvoll: In einem modernen Einfamilienhaus mit Fußbodenheizung, einer mittleren PV-Anlage mit 4,8 Kilowatt Spitzenleistung und einem Lithium-Ionen-Batteriespeicher mit einer Speicherkapazität von vier Kilowattstunden können die Energiekosten deutlich gesenkt werden. Verglichen mit einer standardmäßigen Regelung ermöglicht die modellprädiktive Regelung eine jährliche Senkung der Energiekosten um 16,2 Prozent.

Die Kostenersparnis setzt sich dabei aus mehreren Faktoren zusammen:

- Die Kapazität der PV-Anlage kann jederzeit genutzt und muss nicht heruntergefahren werden. Es entstehen daher keine Abregelungsverluste.
- Der Stromverbrauch durch die Wärmepumpe sinkt um 11 Prozent.
- Die Menge des Solarstroms, die für den Eigenverbrauch eingesetzt wird, steigt um 63 Prozent.

Hinzu kommt ein weiterer finanzieller Vorteil: Auf den Einsatz einer elektrischen Zusatzheizung kann weitgehend verzichtet werden. Zudem steigert die vorausschauende Betriebsweise auch den Nutzerkomfort.

Weil der Eigenverbrauch des erzeugten Solarstroms durch die Wärmepumpe steigt, wird die Batterie weniger zur vorübergehenden Energiespeicherung in Anspruch genommen. Deshalb stellt sich die Frage, ob die Kopplung von Batterie und Wärmepumpe überhaupt sinnvoll ist. Die Bayreuther Forschungsarbeiten haben gezeigt, dass dies tatsächlich der Fall ist. Denn im Vergleich zu einem Energiesystem, in dem diese Komponenten separat genutzt werden, ergibt sich ein höherer Gesamteigenverbrauch und damit ein höherer Autarkiegrad. Zudem verlängert sich die Lebensdauer der Batterie. Eine Ursache hierfür ist, dass ihr durchschnittlicher Ladezustand sinkt. Im Normalfall geschieht dies, ohne dass sich die Anzahl der Lade-/Entlade-Zyklen oder die insgesamt ein- und ausgespeicherte Energie verringert. Hier spielt es eine wichtige Rolle, dass die an sonnenreichen Tagen vormittags erzeugte Energie unterhalb der Einspeisegrenze in das öffentliche Netz eingespeist wird, so dass die Batterie in dieser Zeit nur teilweise oder gar nicht betrieben wird. Über die Mittags- und Nachmittagszeit wird sie dann vollge-



laden. Dabei ergibt sich in der Bilanz aus Ein- und Ausspeichern kein Unterschied zum Referenzfall, bei dem durchgehend versucht wird, die Batterie mit maximaler Leistung zu be- oder entladen. Kennt man die leistungsabhängigen Wirkungsgrade des Batterieinverters sowie der Batterie selbst, ist es möglich, durch eine gezielte Be- und Entladung den Wirkungsgrad des Batteriesystems gezielt zu erhöhen. Bei Kenntnis des Wärmepumpenbetriebs der kommenden Stunden ist es hierbei möglich, die Batterie gezielt zur gleichzeitigen Versorgung der Wärmepumpe und des Gebäudes einzusetzen, da der Wirkungsgrad des Batteriewechselrichters bei zu niedriger Entladeleistung schlecht ist.





Die Bayreuther Forschungsarbeiten zu integrierten Energiesystemen liefern somit wichtige Beiträge, damit das eigene Haus zum „Smart Home“ wird – mit sinkenden Kosten, größerer Autarkie, verringertem Energieverbrauch und einer höheren Lebensdauer von Systemkomponenten, zum Beispiel der Batterien und Wärmepumpen. Die hierfür entwickelten flexiblen und intelligenten Regelungskonzepte lassen sich – indem sie entsprechend angepasst werden – auf andere Energiesysteme übertragen. Sie können beispielsweise auch in Industriebetrieben und kommunalen Anlagen Anwendung finden.

■ Abb. 6 (Mitte): Dr.-Ing. Florian Heberle und Sebastian Kuboth M.Sc. steuern die Versuchsanlage für Wärmepumpen im Zentrum für Energietechnik (ZET) der Universität Bayreuth (Foto: Christian Wißler).



■ Abb. 7: Wärmepumpe auf dem Campus der Universität Bayreuth, die im ZET für die Untersuchung von Energiesystemen in Wohngebäuden eingesetzt wird (Foto: Christian Wißler).



■ Abb. 8: Plattenwärmeübertrager, der exakt berechnete Wärmemengen an das Kältenetz der Universität Bayreuth abführt (Foto: Christian Wißler).

## Von der Simulation zur Versuchsanlage

Untersuchungen in einer Versuchsanlage am Zentrum für Energietechnik (ZET) haben die Simulationsergebnisse bestätigt. Diese Anlage koppelt reale Wärmepumpen, Speicher und Hydraulik mit einem simulierten Gebäude und einer simulierten PV-Anlage. Hier ist es in „Hardware-in-the-Loop“-Tests gelungen, den elektrischen Energiebedarf um knapp 20 Prozent und den Wärmepumpenbetrieb um etwa 30 Prozent zu verbilligen. Die Versuchsanlage wurde dabei über mehrere Tage hinweg mit einer baugleichen Referenzanlage verglichen, die eine Standardregelung einsetzt.

**„Die Kombination von Wärmepumpen und Batterien führt heute dazu, dass die Energieautarkie von Wohngebäuden in Reichweite rückt.“**

A vertical rack of industrial energy systems. At the top, a grey panel is labeled 'ENERGIESYSTEME'. Below it, several shelves hold various components: a terminal block with yellow and blue wires, a white 'emeraCS' device, a white power supply, a terminal block with red and blue wires, a white power outlet, a row of yellow battery modules, and a terminal block with red and blue wires. At the bottom, a large black metal tray is partially open, revealing a silver metal cabinet with a control panel. The control panel has a small display and several indicator lights.

ENERGIESYSTEME

■ Gerhard Fischerauer  
Tobias Kull

# Industrielle und kommunale Anlagen

Energieoptimierter Betrieb  
mithilfe intelligenter  
Batteriesteuerung

■ Intelligenter Energieknoten (IEK) / Modul für unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) der Fa. Richter R&W Steuerungstechnik in Ahorntal (Foto: Bernd Zeilmann).



Heute sind zahlreiche Energiesysteme verfügbar, die einzeln für sich mehr oder weniger gut charakterisiert sind, deren optimales funktionales Zusammenwirken in einem heterogen integrierten Gesamtsystem aber noch nicht Stand der Technik ist. So kommt es in der Gebäudetechnik vor, dass sich Heizungsregelung und Lüftung gegenseitig „bekämpfen“. Oder Photovoltaik-(PV)-Anlagen werden abgeschaltet, weil ihnen kein aufnahmebereiter Speicher Energie abnehmen kann.

Das Zentrum für Energietechnik (ZET) arbeitet, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie und in Kooperation mit Unternehmen, allen voran der Fa. Richter R&W Steuerungstechnik, an Lösungsstrategien für die effiziente Bereitstellung, Verteilung und Speicherung von Energie in industriellen und kommunalen Anlagen. Ein verbessertes Gesamtverhalten des Systems aus Energiequellen und Verbrauchern lässt sich dadurch erreichen, dass man die Kopplung zwischen den Systemteilen durch eine übergeordnete Leiteinrichtung steuert. Die Erzeugung, Interpretation und Nutzung verdichteter Informationen führt zu einem fast schon intelligent anmutenden Systemverhalten. Wenn verschiedene Systemteile im privaten Wohnbereich vernetzt und gesteuert werden, ist heute der Begriff „Smart Home“ gebräuchlich (vgl. S. 48 bis 53). Bei Produktions- oder Versorgungseinrichtungen spricht man allgemein von einem „Smart Energy System“. Dessen Leiteinrichtung wird hier als „Smart Controller“ oder auch als „Intelligenter Energieknoten (IEK)“ bezeichnet.

## Energiesystemsteuerung im industriellen und kommunalen Bereich

Eine übergeordnete Leiteinrichtung kann die Energiekosten einer größeren Anlage auf vielfältige Weise beeinflussen, indem sie beispielsweise

- vorausschauende Analysen wie Wetterprognosen, Verbrauchs- und Tarifdaten aus intelligenten Messsystemen (Smart-Meter-Daten) oder Fuhrparkdaten berücksichtigt,
- die Energieentnahme aus verschiedenen Energiequellen sowie die Energieabgabe an Speicher und Verbraucher steuert oder
- Transformationsverluste zwischen Netzebenen vermeidet.

Im industriellen und kommunalen Bereich sind beim Einbau eines IEK allerdings gegenüber Anwendungen in privaten Haushalten zusätzliche Anforderungen zu beachten. So verlangt die Integration eines IEK in bereits vorhandene Anlagen die Kompatibilität mit industrietypischer Hardware. Dabei kommen üblicherweise speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) zum Einsatz. In dieser IT-Umgebung stehen nicht dieselben Ressourcen und Programmiersprachen zur Verfügung wie bei normalen PCs.

Auch Fragen der funktionalen Sicherheit (Gefährdung der Umgebung durch das System) und des Schutzes (Gefährdung des Systems durch die Umgebung) spielen eine viel wichtigere Rolle als im privaten Haushalt. Wenn ein privater PC durch eine

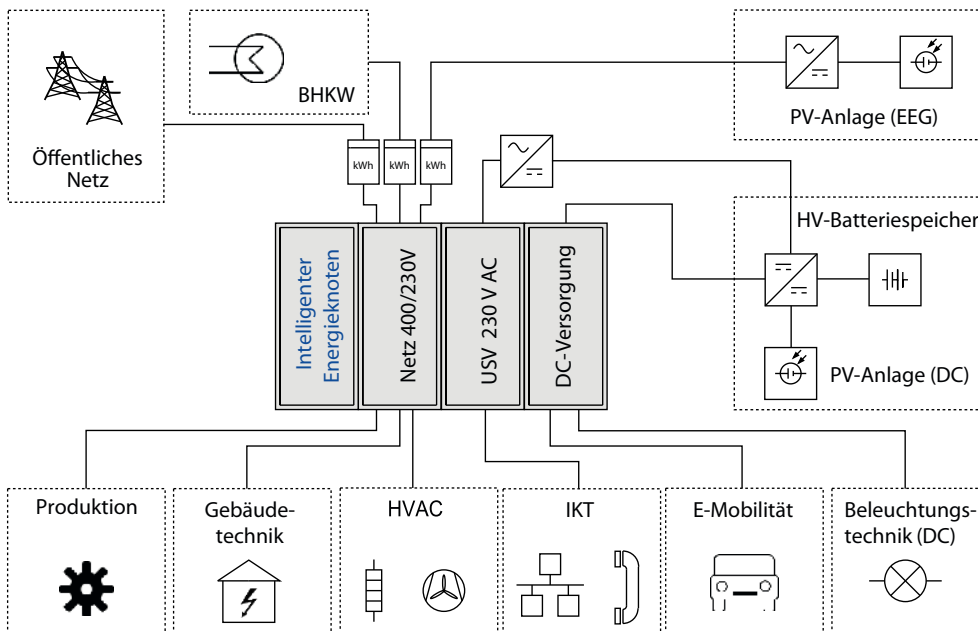
### AUTOREN



■ Prof. Dr.-Ing. Gerhard Fischer-auer ist Inhaber des Lehrstuhls für Mess- und Regeltechnik und stellvertretender Direktor des Zentrums für Energietechnik (ZET) der Universität Bayreuth.

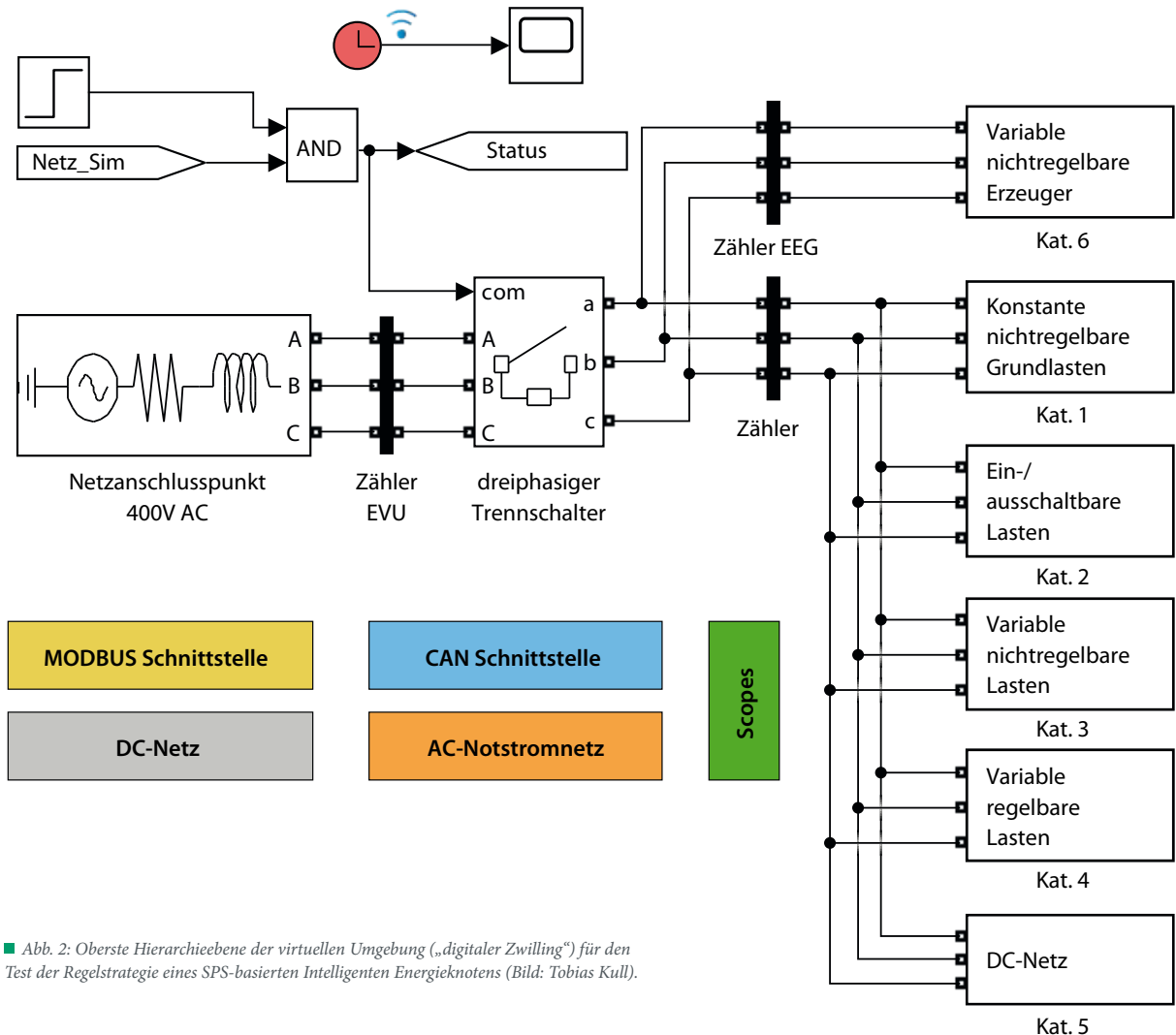


■ Tobias Kull M.Sc. ist wissenschaftlicher Mitarbeiter und Doktorand am Lehrstuhl für Mess- und Regeltechnik.



■ Abb. 1: Blockschaltbild des realen Energiesystems in der Demonstrationsanlage (Bild: Tobias Kull / Richter R&W Steuerungstechnik).





■ Abb. 2: Oberste Hierarchieebene der virtuellen Umgebung („digitaler Zwilling“) für den Test der Regelstrategie eines SPS-basierten Intelligenen Energieknotens (Bild: Tobias Kull).

Microsoft-Aktualisierung oder durch Schadsoftware lahmgelegt wird, ist dies ärgerlich. Wenn die Steuerung eines Klärwerks blockiert wird und dadurch zum Beispiel unvollständig aufbereitete Abwässer in die natürlichen Gewässer gelangen, können die Folgen gravierend sein. Aus diesem Grund basieren die verwendeten SPS auf Linux statt Windows und werden nicht direkt mit dem Internet verbunden.

### Methodik der virtuellen Inbetriebnahme

Unter Sicherheits- und Schutzaspekten kann man einen neu entwickelten Intelligenen Energieknoten nicht in der realen Anwendungsumgebung testen. Vielmehr muss man dem IEK die Welt, in die er später eingebettet werden soll, vorgaukeln. Bestandteile dieser Welt sind etwa eine Photovoltaik-Anlage, ein Batteriespeicher oder ein Verbraucher. Die IEK-

Hardware wird also in eine Testumgebung eingebettet, die alle zu steuernden Systemteile umfasst und einen „digitalen Zwilling“ der späteren realen Anwendungsumgebung darstellt. Man spricht hier auch von einem *Hardware-in-the-Loop*-Konzept. Um Fehler bei der technischen Kommunikation auszuschließen, muss der IEK mit dem digitalen Zwilling über industrietypische Peripherie und Schnittstellen interagieren.

Im Zentrum für Energietechnik der Universität Bayreuth (ZET) wurde eine Laborumgebung aufgebaut, in der ein SPS-basierter Intelligenen Energieknoten über industrielle Bussysteme (Modbus TCP und CAN) mit einem PC interagiert. Hier ist der digitale Zwilling der Anwendungsumgebung in dem von Ingenieuren häufig genutzten Programm Matlab/Simulink implementiert. So gelingt es, Stellbefehle des Regelalgorithmus auf dem IEK in den PC einzu-

### LITERATURTIPP

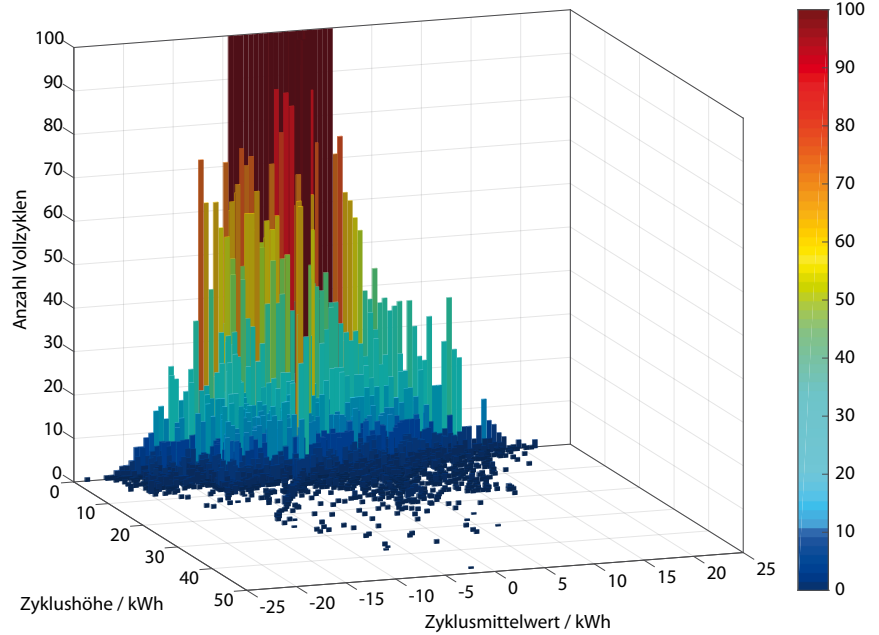
T. Kull, B. Zeilmann, G. Fischer-aauer: Hardware-in-the-loop Test Concept for an Energy-optimized Process Control, in: R. Tutsch, A. Schütze (ed.): Tagungsband 20. GMA/ITG-Fachtagung Sensoren und Messsysteme 2019. Wunstorf 2019, S. 789-793. DOI: 10.5162/sensoren2019/P3.8.

lesen („Speise Verbraucher A aus dem Batteriespeicher und trenne Verbraucher B vom Netz“), die Reaktionen des Energiesystem-Modells auf diese Stellbefehle zu berechnen („Batterie wird entladen“) und dem IEK berechnete oder tatsächlich gemessene Reaktionen auf seine Befehle zurückzumelden.

Auf diese Weise kann man die grundsätzliche Funktion eines IEK-Algorithmus testen und Fehler aufspüren. Einer der größten Vorteile liegt darin, dass man im Vergleich zur realen Welt auf beschleunigter Zeitskala testen kann. Man stelle sich etwa vor, die Funktionalität des IEK im Sommer (Hitze, viel PV-Leistung) und im Winter (Kälte, wenig PV-Leistung) könnte nur in der Realität getestet werden. Abgesehen von Sicherheitsfragen, würden diese Tests Monate oder Jahre in Anspruch nehmen. Hingegen macht es die Methodik der virtuellen Inbetriebnahme möglich, verschiedene Leistungsszenarien und das Verhalten eines IEK-Algorithmus in Tagen durchzuspielen.

### Systemauslegung auf Basis bisheriger Daten

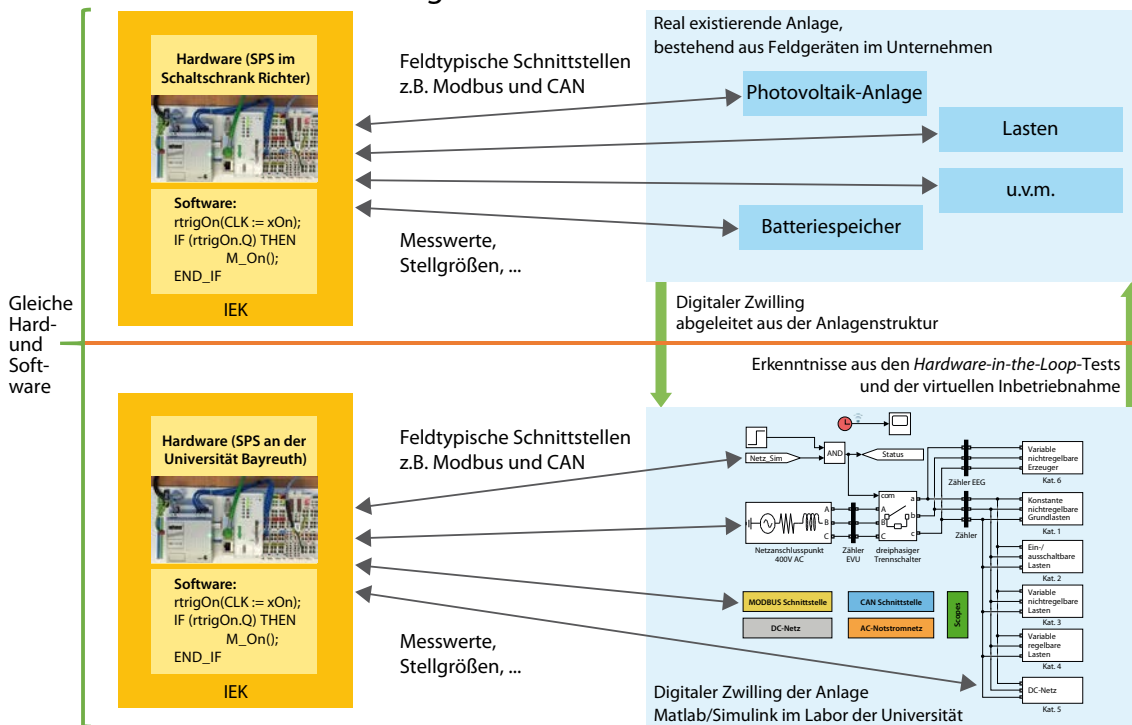
Ein IEK muss seine Regelstrategie an die Details des von ihm geführten Energiesystems anpassen. Wenn es sich um größere und heterogene Systeme han-



■ Abb. 3: Das Rainflow-Histogramm zeigt das Laden/Entladen des Batteriespeichers in der Referenzanlage für den Zeitraum vom 18. August 2018 bis 16. Januar 2019. Dabei ist die Anzahl geschlossener Zyklen als Funktion der Leistungsfuktuation und des mittleren Ladezustands aufgetragen, sie ist aus darstellerischen Gründen nach oben bei 100 abgeschnitten. Offenbar dominieren hier Zyklen mit geringer Leistungsfuktuation und geringem Leistungsmittelwert. Mit diesen Informationen lässt sich der Batteriespeicher optimal dimensionieren (Bild: Tobias Kull).

delt, steht die Bestandsaufnahme des zeitabhängigen Energieverbrauchs am Anfang jeder Regelstrategie und auch jeder Systemerweiterung, etwa um PV-Anlagen oder Batteriespeicher. Im Rahmen seiner Kooperation mit der Fa. Richter R&W Steuerungstechnik verfügt das ZET über eine Referenzanlage, die jederzeit eine Bestandsaufnahme ermöglicht,

### Richter R&W Steuerungstechnik



### Universität Bayreuth / Zentrum für Energietechnik (ZET)

■ Abb. 4: Das reale Energiesystem der Fa. Richter R&W Steuerungstechnik und der ‚digitale Zwilling‘ auf dem Campus der Universität Bayreuth (Grafik: Tobias Kull / Christian Göppner).

■ Abb. 5: IEK / DC-Modul (Gleichspannungsnetz) (Foto: Bernd Zeilmann).

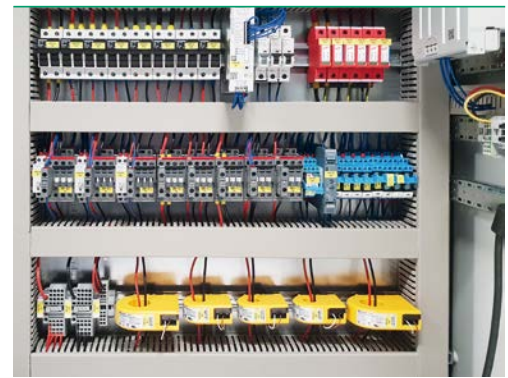
■ Abb. 6: Differenzstrommessungen im DC-Modul (Foto: Bernd Zeilmann).

indem sie alle erforderlichen Daten seit August 2018 aufzeichnet. Dabei werden die Ausgangsleistungen zweier PV-Anlagen, die aus dem Netz bezogene Leistung und die Summe der Verbraucherleistungen registriert. Erwartungsgemäß würde ein zusätzlicher Batteriespeicher die Energiekosten verringern helfen, weil er temporäre PV-Überschussleistung aufnehmen könnte.

Die Frage nach der optimalen Größe der Batterie ist allerdings nicht trivial. Eine Batterie mit hoher Kapazität wäre teuer, würde aber nur wenige vollständige Lade-/Entladezyklen pro Zeiteinheit durchmachen und daher länger halten (jede Batterie hält nur eine bestimmte Anzahl von Zyklen). Eine kleine Batterie wäre preisgünstiger, würde aber häufiger geladen und entladen und daher schneller altern.

In welchem Zeitraum sich die aktuellen Kosten eines Batteriespeichers amortisieren, hängt stark von der Nutzungsweise und von den jeweiligen finanziellen Randbedingungen wie der Einspeisevergütung für PV-Leistung ab. Bei der Referenzanlage verhält es sich so, dass sich eine kleine Batterie unter günstigen Marktbedingungen schon nach fünf Jahren, eine große Batterie unter ungünstigen Marktbedingungen aber erst nach 33 Jahren rechnet. Derzeit sind daher in wirtschaftlicher Hinsicht nur klein dimensionierte Speicher zu rechtfertigen. Nur durch eine Mehrfachverwendung für Notstromversorgung, Lastspitzenvermeidung und netzdienliche, mit Lastflexibilisierung einhergehende Flexibilitätsdienstleistungen (sofern diese vergütet werden) kann sich die Investition in einen Batteriespeicher in kürzeren Zeiträumen amortisieren.

■ Abb. 7: Bernd Zeilmann, Geschäftsführer der Fa. Richter Re-W Steuerungstechnik, Tobias Kull M.Sc. und Prof. Dr.-Ing. Gerhard Fischerauer in der Fabrikationshalle der Fa. Richter (v.l.) (Foto: Christian Wisfler).



## Regelung auf der Grundlage von aktuellen und künftigen Messdaten

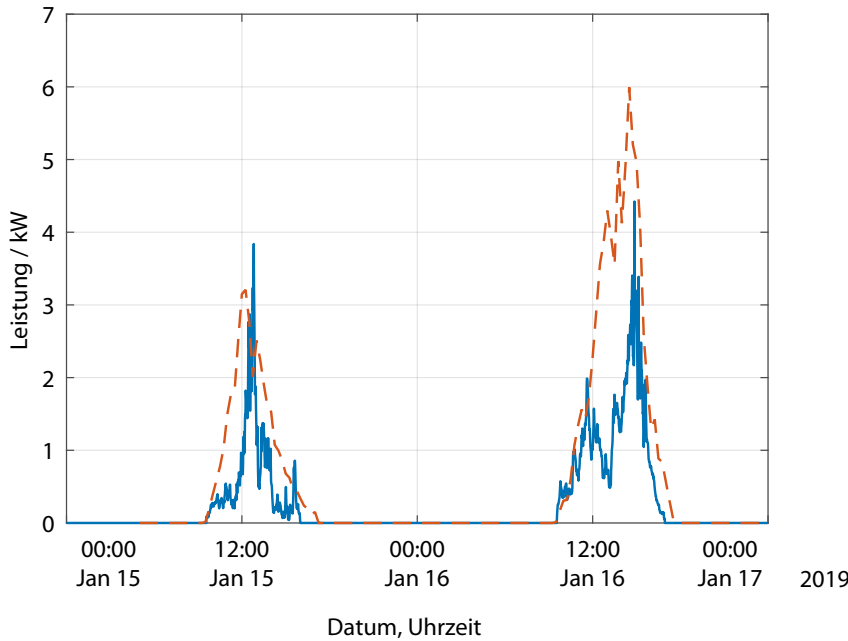
Ein mit der Methodik der virtuellen Inbetriebnahme entwickelter IEK muss sowohl in der Entwicklungs- und Testphase als auch später in der realen Anwendungsumgebung mit Informationen über den Zustand seiner Energiequellen und -verbraucher versorgt werden. Wie bei jedem Regelkreis dienen dazu Messgeräte, hier vor allem Leistungsmessgeräte. Typisch für professionelle Anwendungen ist dabei, dass es keine einheitlichen Schnittstellen und Datenformate gibt, sondern dass man sehr heterogene Datenquellen miteinander verknüpfen muss. Die aktuellen Arbeiten am Lehrstuhl für Mess- und Regeltechnik der Universität Bayreuth sind dabei insofern bundesweit führend, als sie technische Entwicklungen einbeziehen, die noch nicht abgeschlossen sind und sich im ständigen Wandel befinden. Beispiele hierfür sind die Kommunikation mit Smart-Meter-Gateways und mit Ladestationen für Elektrofahrzeuge.

Energiesysteme mit PV-Anlagen und Batteriespeichern weisen die Besonderheit auf, dass man das Verhalten des Gesamtsystems durch prognostizierte Messwerte der PV-Ausgangsleistung optimieren kann. Denn wenn morgen die Sonne scheint, kann man die Batterie jetzt entladen und morgen erneut laden; wenn es aber morgen regnet, kann man die Batterie schonen und stattdessen beispielsweise weniger wichtige Verbraucher abschalten. Natürlich kennt man die PV-Leistung von morgen nicht. Man kann sie aber schätzen, indem man Wetterprognose





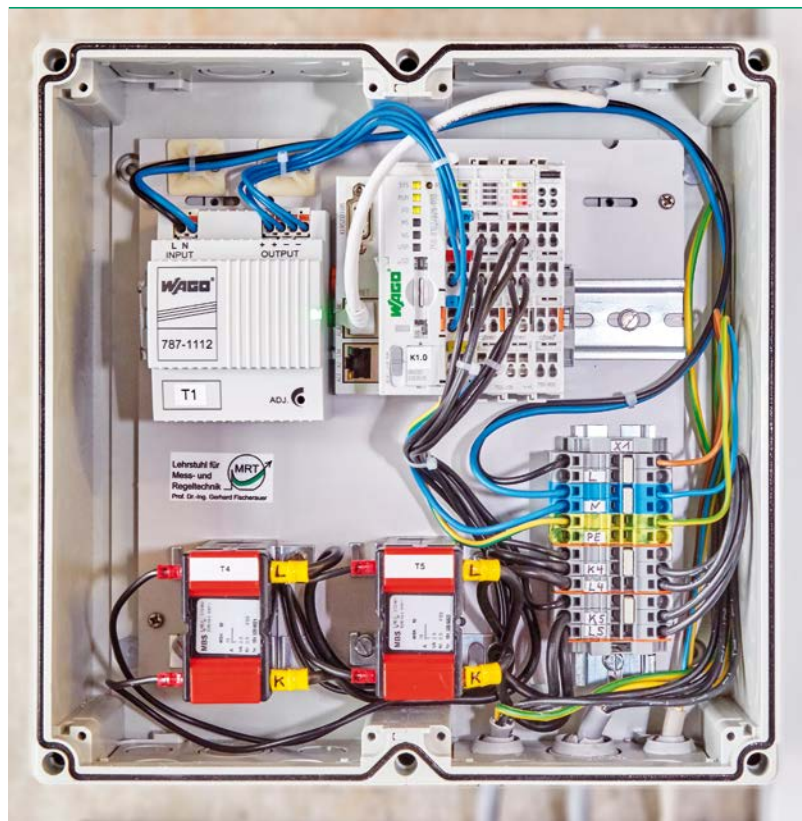
„Energiesysteme mit PV-Anlagen und Batteriespeichern weisen die Besonderheit auf, dass man das Verhalten des Gesamtsystems durch prognostizierte Messwerte der PV-Ausgangsleistung optimieren kann.“



■ Abb. 8: Gemessene (blaue Kurve) bzw. vorhergesagte (rote Kurve) Ausgangsleistung einer realen Photovoltaik-Anlage. Die Grafik zeigt eine Vorhersage mit einem Horizont von 45 Stunden, basierend auf dem Wetterprognosemodell des Deutschen Wetterdienstes, den Kennwerten der PV-Anlage und der PV-Modellbibliothek PVLIB Python (Bild: Tobias Kull).

sen und die Kenndaten der PV-Anlage zugrunde legt. Dies funktioniert nicht perfekt (auch Wettervorhersagen irren sich), aber doch recht gut. Daher erhält man, wenn prognostizierte PV-Leistungen in das Energiesystemmanagement einbezogen werden („modellprädiktive Regelung“), im statistischen Mittel bessere Ergebnisse, als wenn künftige Wetterbedingungen unberücksichtigt bleiben. Eine der im ZET gelösten Herausforderungen besteht darin, dass man die Wetterprognosen zwar aus dem Internet beziehen kann, der IEK aber aus Schutzgründen nicht direkt mit dem Internet verbunden werden darf.

Die Integration von Batteriespeichern in Energieanlagen hat zunächst den Vorteil, dass ein höherer Anteil der in der PV-Anlage erzeugten Energie für den Eigenverbrauch genutzt wird. Das prognosebasierte Laden trägt darüber hinaus entscheidend dazu bei, das Problem der tageszeitabhängigen Belastung der Stromnetze zu lösen. Auf Basis der Prognosen kann die Spitzenleistung der PV-Anlagen im Netz zur Mittagszeit in Batteriespeicher aufgenommen werden. Damit werden die Netze durch geringere Einspeisung entlastet. All das macht das Einbinden eines intelligent gesteuerten Batteriespeichers fast schon obligatorisch.



■ Abb. 9: Messdatenerfassung an einer Photovoltaik-Anlage (Foto: Tobias Kull).





NACHHALTIGKEIT

■ Bernd Koch  
Marco Krasser

# Energiezukunft gemeinsam gestalten

Wie regionale Partner die  
Energiewende vorantreiben

■ *Blick auf die Innenstadt von Wunsiedel  
(Luftaufnahme: Franz X. Bogner).*



Die Stadtwerke im oberfränkischen Wunsiedel, die SWW Wunsiedel GmbH, verfolgen ein ambitioniertes Ziel: Bis 2030 wollen sie gemeinsam mit Partnern aus Wirtschaft und Forschung ein unabhängiges Versorgungsgebiet schaffen, das auf erneuerbare Energien baut. Auf diesem Weg hin zu einer regionalen und nachhaltigen Energieversorgung wurden bereits wichtige Schritte zurückgelegt: Seit 2011 konnte die Stadt 144.000 Tonnen CO<sub>2</sub> einsparen und zusätzlich, neben der Einspeisung des Grünen Stroms in das eigene Netz, Überschüsse auf dem Energiemarkt verkaufen. Grundlage für innovative Projekte, die alle auf das gemeinsame Ziel einer nachhaltigen Energiezukunft ausgerichtet sind, bildet die 2003 erarbeitete Unternehmensstrategie, die 2008/2009 als Roadmap und Vision unter dem Titel „WUNSiedler Weg – Energie“ veröffentlicht wurde.

Die Strategie konzentriert sich auf fünf Kernbereiche, in denen bis 2030 zukunftsweisende Vorhaben realisiert werden sollen:

- Nutzung erneuerbarer Energien
- Errichtung von Energiespeichern
- Digitale Vernetzung
- Steigerung der Energieeffizienz
- Innovative Mobilitätskonzepte

Darüber hinaus wird der Einsatz geeigneter Marktmodelle thematisiert. Um sektorübergreifende und vernetzte Lösungen zu gewährleisten, wurde bei der Strategieentwicklung von vornherein Abstand von singulären und siloartigen Projektansätzen genommen.

Im Zuge der Digitalisierung der Energieinfrastruktur wird auch die Kommunikation in Zukunft immer wichtiger. Daher errichtet die SWW Wunsiedel GmbH seit 2011 eine flächendeckende Glasfaserinfrastruktur.

### Der Energiespeicher SIESTORAGE – Pilotprojekt einer Technologiepartnerschaft

Seit 2015 wird die SWW Wunsiedel GmbH durch die Siemens AG bei der Umsetzung ihrer Vision unterstützt. Im Jahr 2016 konnten die beiden Unternehmen nicht nur den Vertrag über SIESTORAGE – das derzeit größte Batteriespeichersystem im kommunalen Verbund – unterzeichnen, sondern in diesem Rahmen zugleich den Beginn einer Technologiepartnerschaft bekannt geben. Neben dem Lithium-Ionen-Großspeicher mit 8,4 Megawatt und 10,05 Megawattstunden wurden seitdem zahlreiche weitere

Projekte konzipiert und umgesetzt. Der Fokus liegt und lag dabei immer auf wirtschaftlichen Projekten, die in den Kontext des „WUNSiedler Weg – Energie“ passen. Eine wesentliche Rolle spielen dabei sektorübergreifende Ansätze aus den Bereichen elektrischer Energie, Wärme und Mobilität.



Das 2018 eröffnete „Haus der Energiezukunft“ trägt maßgeblich zur Erfolgsgeschichte der Festspiel- und Energiestadt Wunsiedel bei. Hier haben die Einwohner der Stadt, Interessierte aus benachbarten Regionen und ebenso Vertreter aus Politik, Wirtschaft und Wissenschaft die Möglichkeit, sich über die Vision der SWW Wunsiedel GmbH und der Stadt Wunsiedel genauer zu informieren. Dabei können sie auch das Zusammenspiel der bereits umgesetzten Projekte besser verstehen – was zu einer Erhöhung der öffentlichen Akzeptanz beiträgt. Anhand einer IT-Anwendung auf der Basis von *Siemens MindSphere* präsentiert der „Showroom“ ein Abbild der Netz- und Infrastruktur und stellt überdies die Zusammenhänge der verschiedenen Netze (Stromnetz 0,4 Kilovolt und 20 Kilovolt, Wärmenetz und Gasnetz) anschaulich dar. In einem nächsten Schritt können auf Basis von hinterlegten Szenarien verschiedene Netzzustände sektorübergreifend simuliert werden. So lassen sich beispielsweise Auswirkungen sichtbar machen, die der Ausbau der Elektromobilität auf das Stromnetz haben wird.

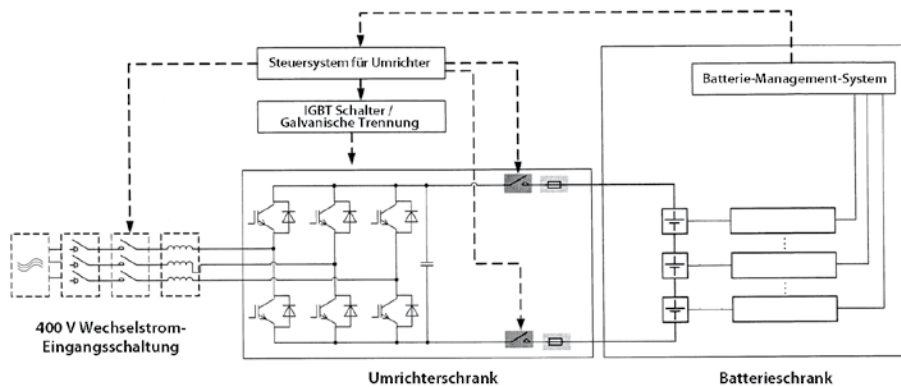
### Die Primärregelleistung – Grundlage einer „Win-Win-Kooperation“

Der Siemens-Großspeicher SIESTORAGE ist das bisher größte gemeinsam realisierte Vorhaben. Das auf

■ Abb. 1: Batteriecontainer des modularen Energiespeichersystems SIESTORAGE (Foto: © Siemens AG).

Der „WUNSiedler Weg – Energie“ bietet ein großes Potenzial für die weitere Gestaltung der Energiezukunft. Das jüngste Vorhaben ist eine *Power-to-Gas*-Anlage. In Zusammenarbeit mit der SWW Wunsiedel GmbH, der Gasversorgung Wunsiedel, dem Landratsamt Wunsiedel sowie kommunalen Vertretern aus Politik und Wirtschaft wurde am 21. Mai 2019 der Grundstein für die überregionale „Wasserstoff Initiative Wunsiedel“ gelegt.





■ Abb. 2: Schematische Darstellung des Batterie-Aufbaus (Grafik: © Siemens AG).

einem speziellen Leasing-Vertrag (*Managed Service*) basierende Kooperationsmodell finanziert sich über die Erlöse aus der Primärregelleistung. Hierbei handelt es sich, was das Abrufprinzip und die zeitliche Aktivierung betrifft, um die qualitativ anspruchsvollste Regelleistung. Sie ist deshalb erforderlich, weil nur soviel Energie in das Stromnetz eingespeist werden darf, wie ihm gleichzeitig entnommen wird. Nur auf diese Weise lässt sich im bundesdeutschen Stromnetz eine stabile Frequenz von 50 Hertz gewährleisten. Die Primärregelleistung (PRL) – sie wird auch als Primärreserve bezeichnet – hat dabei die Aufgabe, Schwankungen zwischen der Einspeisung und der Entnahme elektrischer Energie in kürzester Zeit auszugleichen. Innerhalb von 30 Sekunden muss die Erzeugung von Energie hochgefahren werden (positive PRL) oder gesenkt werden (negative PRL), damit es nicht zu Stromausfällen kommt.<sup>1</sup>

Die PRL ist eine Dienstleistung, die von den deutschen Übertragungsnetzbetreibern (ÜNB) erbracht und seit 2001 öffentlich ausgeschrieben wird. Seit 2007 erfolgt die Ausschreibung über die Internetplattform „regelleistung.net“, die zugleich über den rechtlichen und regulatorischen Rahmen informiert.<sup>2</sup> Zusammen mit der PRL werden auch die Sekundärregelleistung und die Minutenreserveleistung ausgeschrieben, die Schwankungen im Stromnetz nach einer längeren Vorlaufzeit von fünf bzw. 15 Minuten ausgleichen sollen. Die PRL-Märkte von Deutschland, Belgien, den Niederlanden, Frankreich, der Schweiz und Österreich sind international gekoppelt und vermarkten insgesamt rund 1.470 Megawatt PRL (Stand: Januar 2019). Dabei liegt der PRL-Bedarf für Deutschland bei rund 603 Megawatt (2017)<sup>3</sup>, PRL-Exporte werden zugelassen, wenn sie 30 Prozent des länderspezifischen PRL-Bedarfs nicht überschreiten.<sup>4</sup>

Um am PRL-Regelleistungsmarkt teilnehmen zu dürfen, müssen Anbieter zuvor eine technische und organisatorische Prüfung bestehen. Im Rahmen dieser Präqualifikation bewertet der Anschluss-ÜNB sowohl die Erzeugungseinheiten als auch regelbare Verbraucherlasten. Die Anforderungen wurden 2019 aktualisiert.<sup>5</sup> Für die Präqualifikation ist allgemein die Erbringung der vollen PRL-Leistung über eine Dauer von 15 Minuten nachzuweisen. Für Batteriespeichersysteme in Deutschland haben die Übertragungsnetzbetreiber eine um 15 Minuten erhöhte Erbringungsdauer (in Summe: 30 Minuten) gefordert. Dies hat die Bundesnetzagentur jedoch am 2. Mai 2019 abgelehnt und damit eine Angleichung an die Wettbewerbsbedingungen im europäischen Verbundnetz hergestellt.

## Energiespeicherung als Herzstück einer stabilen Energieversorgung

Hochdynamische, modular aufgebaute Energiespeichersysteme, wie beispielsweise SIESTORAGE in Wunsiedel, haben bei der Erbringung der Primärregelleistung wesentliche Vorteile. Sie ermöglichen die Ausnutzung verschiedener betriebstechnischer Freiheitsgrade und damit eine kostenoptimierte Betriebsweise. Hierzu zählen vor allem

- die optionale Übererfüllung der PRL von bis zu 120 Prozent der geforderten proportionalen Frequenzantwort,
- die Nutzung des Totbandes von  $\pm 10$  Millihertz um die Nennfrequenz von 50 Hertz,
- Lade-/Entladevorgänge mittels anderer technischer Einheiten
- und nicht zuletzt die Möglichkeit, die PRL schneller als in den geforderten 30 Sekunden zu erbringen.

Mit diesen Vorzügen und der Möglichkeit zum Pooling kleinerer Einheiten, aber auch durch die Umstellung der wöchentlichen auf eine tägliche Ausschreibung seit Juli 2019 wird der Wettbewerb im Regelleistungsmarkt weiter gestärkt. Damit entsteht eine wichtige Grundlage für die Integration zusätzlicher Mengen erneuerbarer Energie ins Stromnetz.

Das modulare Energiespeichersystem von Siemens begleitet die Stadt Wunsiedel auf ihrem Weg zu einem unabhängigen Versorgungsgebiet, indem es eine stabile, zuverlässige Stromversorgung gewährleistet. Es integriert erneuerbare Energien und optimiert die Nutzung fossiler Stromerzeugung für ein

## AUTOREN



■ Dr. Bernd Koch ist Leiter Dezentrale Energiesysteme von Siemens Deutschland.



■ Marco Krasser ist Geschäftsführer der SWW Wunsiedel GmbH.

„Dezentrale Energiesysteme und digitale Vernetzung sind Grundsteine für zukunftsfähige Geschäftsmodelle.“

modernes, umweltfreundliches Netz. SIESTORAGE kombiniert modernste Leistungselektronik für Netz-anwendungen mit Hochleistungs-Lithium-Ionen-Batterien. Durch seinen modularen Aufbau lässt sich das SIESTORAGE-System an spezifische Anforderungen anpassen. So ermöglicht es eine Vielzahl von Anwendungen für Verteilnetze, Infrastruktur, Gebäude und Industrie.

## Interdisziplinarität und Innovation

Die Kernpunkte des „WUNSiedler Weg – Energie“ passen hervorragend zur Zielsetzung der Siemens Gruppe Dezentrale Energiesysteme (DES) mit Sitz in Nürnberg. Diese interdisziplinäre Gruppe befasst sich mit Lösungen in vier Bereichen:

- Hybride Kraftwerke
- Nachhaltige Stadtteilentwicklung
- Netzlast-Optimierung
- Eigenverbrauchsoptimierung

In Leistungsklassen von 100 Kilowatt bis 100 Megawatt sucht das DES-Team nach Lösungen, die einen hohen Anteil regenerativer Erzeugung enthalten und dabei immer den Aspekt der Wirtschaftlichkeit berücksichtigen – denn Energie muss bezahlbar bleiben. So arbeitet die Abteilung im Bereich der Hybridkraftwerke an Kombinationen von Windkraftanlagen, Batterien und Elektrolyse. Im Bereich Stadtteilentwicklung geht es um die nachhaltige Energieversorgung mit Strom und Wärme. Unterschiedliche „Bausteine“ müssen dabei aufeinander bezogen und integriert werden, wie etwa Wärmepumpen, Photovoltaikanlagen, elektrische Heimspeicher oder Wallboxen für die Elektromobilität. Optimierte Netzlast und Eigenversorgung sind große Themen der Industrie. Hier steht die sichere Versorgung zu einem guten Kostenpunkt im Vordergrund, und natürlich ebenso die Absicherung des Produktionsprozesses, der meist Strom, Wärme und oft auch Gas benötigt. Moderne Notstromkonzepte sind Teil dieser Lösungen.

## Fazit und Ausblick

Zusammenfassend lässt sich die Modellregion Wunsiedel als gutes Beispiel für eine aktive Nutzung der Sektorkopplung bezeichnen, also für eine Integration und Vernetzung verschiedener Elemente im Energiesystem zugunsten erneuerbarer Energien. Dezentrale Energiesysteme und digitale Vernetzung sind daher Grundsteine für zukunftsfähige Geschäftsmodelle,

## Ein modulares Energiespeichersystem

Das in Wunsiedel installierte System besteht aus:

- drei 40“ Containern mit Lithium-Ionen Zellen
- einem 40“ Container mit Umrichtern, Netzanschluss und Steuerung
- einer Betonstation mit Transformatoren und Mittelspannungsschaltanlage

Folgende Kernkomponenten wirken hier zusammen:

- **Mittelspannung:** Eine Schaltanlage mit acht Mittelspannungsschaltfeldern dient der Anbindung an das 20 kV-seitige Kundennetz zum Laden und Entladen des Batteriespeichers.
- **Transformatoren:** Vier Stromrichter-Gießharztransformatoren 20/0,4 kV mit einer Bemessungsleistung von jeweils 2.000 Kilovoltampere dienen der Spannungsanpassung zwischen Kundennetz und Batteriespeicher.
- **Stromschiene:** Der Energietransport zwischen Batteriespeicher und Betonfertigstation erfolgt über vier 3.700 Ampere-Stromschienenstränge.
- **Drei Batterie-Container:** Diese Container sind jeweils bestückt mit 504 Batteriemodulen, untergebracht in 36 Batterieschränken. Jeder Batterieschrank hat eine Kapazität von ca. 91 Kilowattstunden.
- **Ein Umrichter-Container:** Darin sind Steuer- und Regelungsschränke, zwölf Umrichterschränke und vier Netzanschluss-schränke enthalten.

delle, die sowohl in wirtschaftlicher wie in ökologischer Hinsicht erfolgreich sind. „Wer alle Energieformen zusammenbringt, ist flexibler und kann vom Markt profitieren“, erklärt Andreas Schmuderer, Leiter Sales Consulting Dezentrale Energiesysteme von Siemens Deutschland.

Die Technologiepartnerschaft zwischen der SWW Wunsiedel GmbH und der Siemens AG soll künftig durch das interdisziplinär ausgerichtete Bayerische Zentrum für Batterietechnik (BayBatt) an der Universität Bayreuth ergänzt werden. Die Zusammenarbeit von universitärer Forschung, Technologiekonzern und Kommune eröffnet neue Perspektiven für eine Optimierung und Verbesserung der eingesetzten Speichertechnologien, nicht zuletzt im Hinblick auf die Zellalterung. Darüber hinaus sollen weitere Einsatzmöglichkeiten für High-Tech-Speicher ausgelotet werden. Gemeinsam wollen die beteiligten Partner erreichen, dass die Vision einer unabhängigen regionalen Energieversorgung schon bald in greifbare Nähe rückt.



■ Abb. 3: Transformator (Foto: © Siemens AG).

- 1 Vgl. Consentec GmbH: Beschreibung von Regelleistungskonzepten und Regelleistungsmarkt. Studie im Auftrag der deutschen Übertragungsnetzbetreiber. Aachen 2014.
- 2 Vgl. u.a.: [www.regelleistung.net/ext/download/eckpunktePRL](http://www.regelleistung.net/ext/download/eckpunktePRL)
- 3 Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Bundeskartellamt Telekommunikation, Post und Eisenbahnen / Bundeskartellamt: Monitoringbericht 2018. Elektrizitätsmarkt – D – Systemdienstleistungen. Bonn 2019.
- 4 Vgl. [www.regelleistung.net/ext/static/prl](http://www.regelleistung.net/ext/static/prl)
- 5 Präqualifikationsverfahren für Regelreserveanbieter (FCR, aFRR, mFRR) in Deutschland („PQ-Bedingungen“), Stand: 23. Mai 2019.





■ Gilbert Fridgen  
Leon Haupt

# Batterien als Schlüsseltechnologie

Durch interdisziplinäre Batterieforschung zu einer nachhaltigeren Energiewirtschaft

■ *Futuristische Darstellung eines Energieparks, der die Erzeugung erneuerbarer Energien und die Energiespeicherung durch Batterien integriert (sst).*

**S**pätestens seit der Katastrophe in Fukushima im Jahr 2011 stellte sich in Deutschland auch der politische Wille dahingehend ein, unser heutiges, auf konventioneller Erzeugung basierendes Energiesystem zu transformieren. Der im Januar 2019 beschlossene Kohleausstieg ist ein weiterer irreversibler Schritt auf dem Weg zu einer Stromversorgung, die von erneuerbaren Energien dominiert wird. Insbesondere Wind- und Solarenergie spielen eine gewichtige Rolle, um konventionelle Kraftwerkstypen zu ersetzen. Im Elektrizitätssektor wird diese Entwicklung besonders deutlich: Im Jahr 2018 erreichte der in Europa aus erneuerbaren Energien produzierte Stromanteil ein Rekordhoch von 32,3 Prozent.<sup>1</sup> Tendenz steigend.

Doch gerade die Windkraft und Photovoltaik (PV), die Hoffnungsträger der Energiewende, bereiten den Netzbetreibern die größten Sorgen – und das in vielerlei Hinsicht: Die starke Volatilität in der Stromerzeugung aus Wind und Sonne, in Kombination mit der Unsicherheit über kurzzeitige Witterschwankungen, führt zu Systeminstabilitäten. Um das Stromnetz nämlich stabil zu halten, muss zu jedem Zeitpunkt die ins Stromnetz eingespeiste Strommenge der abgenommenen Menge bzw. dem Stromverbrauch entsprechen. Bisher begegnet man der Volatilität auf der Seite des Stromverbrauchs durch Ab- und Zuregelung der Stromerzeugung, die in der Regel von konventionellen Kraftwerken (Kohle, Gas etc.) geleistet wird. Erneuerbare Energien, die die fossilen Kraftwerkstypen Schritt für Schritt ersetzen sollen, sind allerdings nur eingeschränkt regelbar und können kurzfristige, verbrauchsbedingte Fluktuationen nur bedingt ausgleichen. Hinzu kommt, dass die Erzeugung von PV-Strom, die aufgrund der Sonneneinstrahlung eine Produktionsspitze zur Mittagszeit hat, nur zum Teil mit den Verbrauchshöchstlasten am frühen Morgen und am Abend zusammenfällt.

Darüber hinaus treten Stromnetzengpässe auf, wenn beispielsweise in der Nordsee starker Wind weht und der erzeugte Strom nur bedingt vor Ort verwendet werden kann. Dann muss der Strom entsprechend aus dem Norden Deutschlands in die industriellen Zentren im Süden und am Rhein transportiert werden. Zu den Fluktuationen im Tagesverlauf kommen noch saisonale Schwankungen und das Risiko einer Dunkelflaute hinzu. Hierbei handelt es sich um ein Wetterphänomen, das mehrere Tage andauern kann und die Versorgungssicherheit von Stromnetzen aufgrund von schwachem Wind und fehlender Sonneneinstrahlung auf die Probe stellt.

## Elektrochemische Speichersysteme als Lösungsbaustein

Existierende Pumpspeicherwerke kompensieren diese Schwankungen bereits, können aber die Nachfrage nach Energiespeichern nicht auffangen. Dies liegt zum einen am schnellen Zubau von Anlagen zur Erzeugung erneuerbarer Energien, zum anderen auch daran, dass das Potenzial von Pumpspeicherkraftwerken in Europa beschränkt ist. Batteriespeicher können in dieser Situation entscheidend zur Problemlösung beitragen, indem sie

- Netzengpässe im Millisekundenbereich ausgleichen,
- den Überschuss, der tagsüber durch PV-Anlagen erzeugt wird, auf abendliche Hochlastzeitfenster verlagern
- und sogar durch Dunkelflauten hervorgerufene, saisonale Erzeugungengpässe abschwächen.

Batteriespeicher sind für nahezu alle Anwendungsfelder im Elektrizitätssektor attraktiv: Sie sind flexibel dimensionierbar, können viel Energie in kurzer Zeit laden bzw. entladen und sind in der Lage, über längere Zeiträume große Mengen Energie zur Verfügung zu stellen.

## Batteriespeicher als Schlüsseltechnologie der Elektromobilität

Im Bereich der Materialien tritt neben Blei (Pb) und Nickel-Metallhydrid (NiMH) insbesondere Lithium als Basis für Batteriespeicher<sup>2</sup> in den Vordergrund. Ein wesentlicher Vorteil von Lithium-Ionen-Batterien ist nämlich die – im Vergleich zu anderen nicht-fossilen Lösungen – recht hohe gravimetrische Energiedichte. Diese beschreibt, wie viel Energie pro Kilogramm an Masse in der Batterie gespeichert werden kann. Mit den aktuellen Technologieentwicklungen geht eine steigende Nachfrage seitens der Elektromobilitätsbranche einher. Diese ist ständig auf der Suche nach effizienten Methoden, um die Reichweite von Elektroautos zu erhöhen, gleichzeitig deren Gewicht und damit auch die Kosten zu beschränken und somit den Paradigmenwechsel hin zum elektrischen Fahren erfolgreich meistern zu können.

Wie erleben zurzeit einen Nachfragesog, bei dem Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten durch die Nachfrage seitens der Kunden induziert sind. Dieser „Market-Pull“ wird mit einer extrem schnell wach-



■ Abb. 1: Elektrischer Hochspannungsmast (sst).

<sup>1</sup> Vgl. Agora Energiewende: The European Energy Transition 2030: The Big Picture. Ten Priorities for the next European Commission to meet the EU's 2030 targets and accelerate towards 2050. Berlin 2019; dazu die Pressemitteilung von Agora Energiewende: "Das große Bild einer Europäischen Energiewende 2030", 6. März 2019, [www.agora-energiewende.de](http://www.agora-energiewende.de).

<sup>2</sup> Hier gilt es zwischen Subkategorien von Lithium-Technologien zu unterscheiden. Diese umfassen unter anderem Nickel-Mangan-Cobalt-Oxid (NMC), Lithium-Mangan-Oxid (LMO), Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxid (NCA), Lithium-Eisen-Phosphat (LFP) und Lithium-Titanat (LTO).



senden Produktionskapazität von Lithium-basierten Batterien beantwortet. Allein chinesische und amerikanische Batteriezellenhersteller planen ihre Produktion bis 2030 um knapp 400 Prozent auf mehr als eine Terawattstunde (TWh) Speicherkapazität zu erweitern. Darin manifestiert sich eine Entwicklung, die Batterien zu einer Schlüsseltechnologie im 21. Jahrhundert macht und erwartungsgemäß die Produktionskosten für Batterien noch weiter sinken lässt.

## Vielseitige Anwendung für stationäre Stromspeichersysteme

Die sinkenden Batteriepreise wirken sich ebenfalls auf den Markt für stationäre Batteriespeichersysteme aus. Um Batterieprojekte dennoch ökonomisch sinnvoll betreiben zu können, braucht es Geschäftsmodelle, die mehrere Anwendungsfälle durch sogenanntes „Stacking“ intelligent bündeln und sich somit verschiedener Einnahmequellen bedienen. Nach aktuellem Stand gibt es grundsätzlich vier Möglichkeiten, die von Batteriespeichern bereitgestellten Flexibilitäten zu vermarkten:

- **Marktdienlichkeit:** Beim marktdienlichen Betrieb hat der Arbitragehandel auf den Elektrizitätsmärkten, dem Day-Ahead- und dem Intraday-Markt, Priorität. Hierbei lädt die Batterie in Zeitintervallen mit niedrigen Preisen und entlädt, wenn die Stromknappheit groß und somit die Preise am höchsten sind.
- **Systemdienlichkeit:** Beim systemdienlichen Betrieb nimmt die Batterie am Regelleistungsmarkt teil und hält Kapazität zur Stabilisierung des Stromnetzes vor. Je nach Dimension und Reaktionszeit des Systems kann hier der Primär-, Sekundär- oder Minutenregelleistungsmarkt beliefert werden.
- **Netzdienlichkeit:** Während der systemdienliche Betrieb auf die Stabilisierung des Stromnetzes auf Bundes- und Europaebene abzielt, hat der netzdienliche Betrieb der Batterie einen anderen Fokus: Hier stehen das lokale Verteilnetz und lokale Dienstleistungen, zum Beispiel das lokale Engpassmanagement, im Vordergrund. Letzteres wird im Kontext eines fortschreitenden Ausbaus dezentraler erneuerbarer Energien und steigender Akzeptanz von Elektroautos zunehmend wichtig, da Leitungsentpässe im Verteilnetz häufiger auftreten werden. Die Bereitstellung von Batterieflexibilität stellt hier eine Alternative zum bisherigen teuren Netzausbau dar.

- **Eigenoptimierung:** Schließlich spielen Batterien auch für die Optimierung des eigenen Energiemanagements eine zunehmend wichtige Rolle, um Stromkosten zu senken. Dies gilt sowohl für Industrien und kommunale Anlagen als auch für Eigenheime (Smart Homes). Eine Kostensenkung kann durch Erhöhung der Eigenversorgung aus lokalen erneuerbaren Energien, durch die Reduzierung der jährlichen Spitzenlast oder durch die Nutzung volatiler Strompreise erreicht werden. Intelligente Batteriespeicher versprechen eine Absicherung gegen immer stärker schwankende Strompreise.

## Hindernisse für stationäre Speichersysteme in Ökonomie und Regulatorik

Um die für die Energiewende erforderliche Menge an Stromspeichern in das Netz zu bekommen, bedarf es allerdings noch eines deutlichen Ausbaus. Dieser ist aufgrund der aktuellen Ökonomie von Batteriespeicherprojekten nur schwach ausgeprägt. Die Gründe hierfür können in endogene (technologieabhängige) und exogene (marktliche, regulatorische und soziale) Faktoren unterteilt werden:

*Endogene* Faktoren sind technologieabhängige Hindernisse, die hauptsächlich durch Forschung und Entwicklung mit dem Ziel besserer Batterietechnologien verringert oder beseitigt werden können. Die nötigen Forschungs- und Entwicklungsschritte betreffen unter anderem die Batteriezellkosten sowie die Effizienz, Lebensdauer, zyklische Degradierungsrate, Selbstentladung, Ressourcenkritikalität und Rezyklierbarkeit. Auf der anderen Seite stehen *exogene* Hürden, welche durch marktliche, regulatorische und soziale Faktoren geprägt sind. In Deutschland ist die ökonomische Attraktivität hauptsächlich durch folgende Rahmenbedingungen beschränkt:

- Tägliche Preisschwankungen auf dem Strommarkt kommen nur bedingt bei den Verbrauchern an. Der hohe Fixkostenanteil (Stromsteuern, Netzentgelte, EEG-Umlage etc.) nivelliert die Preisschwankungen, schwächt die finanziellen Anreize zum marktdienlichen Betrieb und senkt somit die Gewinnmarge der Batterie.
- Die Sonderrolle der Batterie als Verbraucher und zeitlich verzögerter Erzeuger ist in der Regulatorik noch nicht komplett abgebildet. Dies führt zu einer Doppelbesteuerung: Sowohl das Laden als auch das Entladen löst entsprechende Abgaben aus. Dadurch werden markt-, system- und



■ Abb. 2: Batteriesystem in einem Energiepark (sst).



■ Abb. 3: E-Mobilität auf dem Campus der Universität Bayreuth (Foto: Christian Wißler).

netzdienliche Einsätze erschwert, die potenziellen Erträge eines Batterieprojektes sinken.

- Fehlende Vergütungsmechanismen für die Netzdienlichkeit beeinträchtigen die Planbarkeit von Batterieprojekten. Vernetzte Heimspeicher können aber eine entscheidende Rolle für das lokale Management von Netzengpässen spielen und somit den Bedarf an Investitionen in den Netzausbau verringern. Allerdings sind die dadurch erzielten Einsparungen nur schwer quantifizierbar, es gibt zurzeit kein einheitliches Vergütungsschema.

### Ganzheitliche Betrachtung der Wertschöpfungskette von Batterien

Um das Potenzial von Batterielösungen in seinem vollen Umfang zu entfalten, bedarf es einer integrierten Betrachtung der endogenen und exogenen Faktoren. Das Bayerische Zentrum für Batterietechnik (BayBatt) bündelt die notwendigen Kompetenzen an der Universität Bayreuth und adressiert mit seiner Forschung die komplette Wertschöpfungskette von Batterien. So wird einerseits an neuen Materialkombinationen und Fertigungsverfahren geforscht, die unter anderem die Zyklenfestigkeit, die Effizienz und die Skalierbarkeit der Produktion verbessern werden; andererseits werden neue Anwendungslösungen erarbeitet, die beispielsweise durch selbstlernende Batterie- und Energiemanagementsysteme die Ökonomie verbessern. Zudem werden Haushaltsspeicher, die im „Schwarm“ miteinander vernetzt sind, evaluiert. Weitere Themen von Forschung und Entwicklung im BayBatt sind sektorübergreifende Konzepte, wie zum Beispiel die aktive Integration von E-Autos in das Stromnetz (Vehicle-to-Grid) sowie die stationäre Weiternutzung ausgemusterter Elektroautobatterien (Second-Life-Battery-Storage).

### Wirtschaftsinformatik als wertschöpfende Schnittstelle zwischen Markt und Technologie

Die Wirtschaftsinformatik verknüpft die marktliche Betrachtung mit technologischen Aspekten und trägt dadurch zur interdisziplinären Forschung im Rahmen des BayBatt entscheidend bei. Das Forschungsteam für Wirtschaftsinformatik und Nachhaltiges IT-Management in Bayreuth legt dabei seine Schwerpunkte auf datengetriebene Modelle, die digitale Vernetzung von Batterien und die Analyse

der Wirtschaftlichkeit von Batteriespeichern mit verschiedenen Anwendungsprofilen.

Damit der Batteriebetrieb in ökonomischer Hinsicht optimiert werden kann, sind vielfältige Faktoren relevant und letztlich entscheidend:

- die Modellierung des Batteriespeichers,
- die Berücksichtigung technischer Restriktionen wie Leistungsgrenzen, Alterung, Ladezustand,
- die Abstrahierung der technisch komplexen Charakteristika des Batteriespeichers,
- die Beachtung der durch „Stacking“ entstehenden Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Anwendungsfällen
- sowie der Einbezug individueller Anwendungsmuster, zum Beispiele von Haushalten und industriellen Lastkurven.

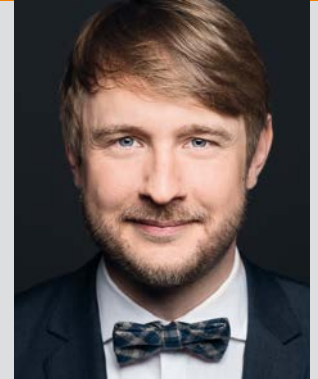
Das Bayreuther Forschungsteam richtet den Fokus nicht allein auf die intelligente Modellierung einzelner Speicher, sondern auch auf die Steuerung und Koordination einer großen Anzahl von Batteriespeichern in einem Schwarm. Interessante technische und wirtschaftliche Perspektiven bieten in diesem Zusammenhang sogenannte virtuelle Batterien, die aus einem Quartierspeicher, dezentralen PV-Heimspeichern und mobilen Speichern in Elektroautos bestehen. Die zentrale Steuerung dieser virtuellen Systeme kann einen entscheidenden Beitrag zur Versorgungssicherheit des Stromsystems leisten.

**„Eine Entwicklung, die Batterien zu einer Schlüsseltechnologie im 21. Jahrhundert macht.“**

### Fazit

Das Bayerische Zentrum für Batterietechnik bringt Forschungsexpertise rund um Batteriespeicher in einem multi- und interdisziplinären Verbund auf dem Campus der Universität Bayreuth zusammen. Es adressiert in engem Austausch mit der Industrie die aufkommenden technologischen und marktlichen Herausforderungen, um die Technologie und Ökonomie von Speichersystemen weiter zu verbessern und dadurch die Integration von erneuerbaren Energien weiter voranzutreiben.

### AUTOREN

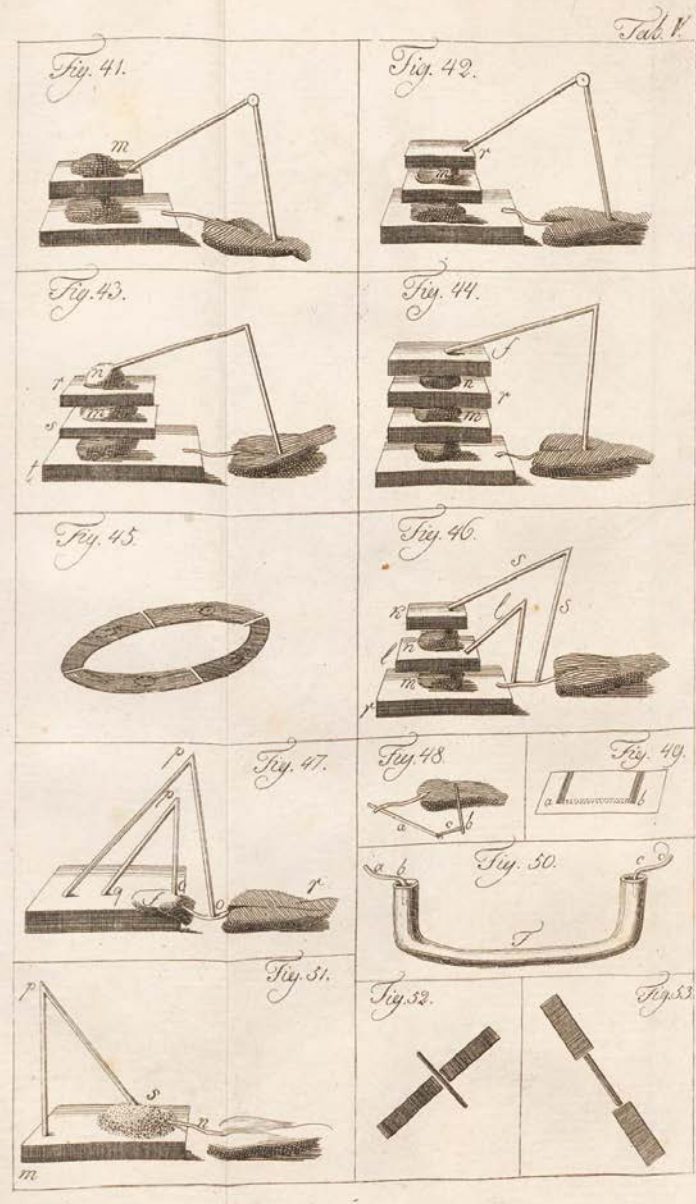


■ Prof. Dr. Gilbert Fridgen ist Professor für Wirtschaftsinformatik und Nachhaltiges IT-Management an der Universität Bayreuth und stellvertretender Leiter der Projektgruppe Wirtschaftsinformatik des Fraunhofer-Instituts für Angewandte Informationstechnik (FIT) sowie stellvertretender wissenschaftlicher Leiter des Kernkompetenzzentrums Finanz- & Informationsmanagement.



■ Leon Haupt ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Forschungsteam für Wirtschaftsinformatik und Nachhaltiges IT-Management an der Universität Bayreuth.





■ Christian Wissler

# Humboldt und Volta

## Von den Experimenten Galvanis zur Erfindung der Batterie

■ Links: Die von Alessandro Volta 1800 konstruierte Säulen-Batterie im Museum Tempio Voltiano in Como, Italien (Foto: wikimedia commons, GuidoB, CC-BY-SA-3.0-migrated). Rechts: Kupferstichtafel (Fig. 21 – 30) aus dem 1797 veröffentlichten Bd. 1 von Humboldts „Versuchen“ über die gereizte Muskel- und Nervenfasern. Für den Bau einer Säulen-Batterie fehlt in Humboldts Versuchsanordnung noch ein wichtiges Bauprinzip (vgl. S. 71) (Bild: Bayerische Staatsbibliothek / Münchener Digitalisierungszentrum: Digitale Bibliothek).

Vor allem aufgrund seiner langjährigen Forschungsreisen, die er nach Zentral- und Südamerika und später nach Russland unternahm, ist Alexander von Humboldt (1769 – 1859) nicht nur in der wissenschaftlichen Fachwelt, sondern auch in der internationalen Öffentlichkeit als Koryphäe einer global ausgerichteten Natur-, Klima- und Umweltforschung präsent. Weit weniger bekannt ist hingegen, dass er als junger Mann von 1792 bis 1797 in Franken lebte, hier für den Bergbau verantwortlich war und gleichzeitig intensive naturwissenschaftliche Studien betrieb. Sein besonderes Interesse erregten die Experimente von Luigi Galvani, Professor für Anatomie an der Universität Bologna. Dieser hatte 1791 unter dem Titel „De viribus electricitatis in motu musculari“ eine Abhandlung veröffentlicht, in der er die Existenz einer „tierischen Elektrizität“ nachweisen zu können glaubte. Versuche an Fröschen hatten ihn zu der Überzeugung geführt, tierische Organismen enthielten ein „elektrisches Fluidum“. So sei es zu erklären, dass tierische Muskeln zu zucken beginnen, wenn sie zeitgleich mit Haken und Stäben aus verschiedenen Metallen in Berührung kommen. Die Idee, dass es „tierische Elektrizität“ gebe, war grundsätzlich nicht neu und im Laufe des 18. Jhdts. wiederholt durch Beobachtungen an ungewöhnlichen Fischarten gestärkt worden. Galvani aber wollte sie auf die Tierwelt insgesamt bis hin zum Menschen ausweiten.

Als Humboldt 1792 davon erfuhr, war seine Neugier sofort geweckt. In den folgenden Jahren unternahm er rund 4.000 Experimente an etwa 3.000 Tieren, um ein genaueres Verständnis der von Galvani beschriebenen Phänomene und eine Fülle neuen Datenmaterials zu gewinnen. Frösche, Fische, Ratten und Kröten waren bevorzugte Objekte seiner Experimente. Überdies scheute er nicht vor äußerst schmerzhaften Selbstversuchen zurück, um mit metallischen Gegenständen galvanische Effekte am eigenen Körper zu erzeugen. Das Design dieser Versuche und deren Ergebnisse veröffentlichte Humboldt 1797 und 1798 in zwei aufeinander folgenden Bänden einer fast 1.000 Seiten umfassenden Abhandlung: „Versuche über die gereizte Muskel- und Nervenfasern nebst Vermuthungen über den chemischen Process des Lebens in der Thier- und Pflanzenwelt“. Messungen und subjektive Wahrnehmungen, Beschreibungen von Versuchsanordnungen, oftmals noch tastende Überlegungen zur Interpretation der Ergebnisse, grundsätzliche Reflexionen und eine Fülle von Verweisen auf andere Autoren sind darin verflochten. Die durch Kupferstichtafeln ergänzten Texte spiegeln das Profil eines detailgenau beobachtenden Forschers, der von den Gegenständen seiner Studien

zutiefst fasziniert ist, aber die methodische Kontrolle seiner Experimente niemals aufgibt.

## Elektrizität in der belebten Natur?

Experimente und Schauveranstaltungen mit elektrischen Phänomenen waren in Europa schon seit dem Ende des 17. Jhdts. in Mode gekommen. Mit Elektrisiermaschinen und Leidener Flaschen ließen sich spektakuläre Effekte erzielen, die gerade deshalb eine große Faszinationskraft ausübten, weil die zugrunde liegenden physikalischen und chemischen Zusammenhänge längst nicht aufgeklärt waren. Elektrizität, ihre Erscheinungsformen in der Natur und ihre Erzeugung mit technischen Mitteln waren daher ein „heißes Thema“, als es der junge Humboldt für sich entdeckte. Doch es gab noch einen weiteren Grund, weshalb ihn die Studien Galvanis in den Bann zogen. Wissenschaftliche Debatten im 18. Jhd. waren auch von der Frage inspiriert, inwieweit sichtbare Vorgänge in der belebten Natur allein mit physikalischen oder chemischen Mechanismen zu erklären seien. Könnte es außerdem so etwas wie eine „Lebenskraft“ geben, die alle lebenden Organismen durchdringt und daher Menschen, Tiere und Pflanzen verbindet?

## „Den gordischen Knoten des Lebensprozesses lösen ...“

Schon früh hatte Humboldt an dieser Vorstellung Gefallen gefunden.<sup>1</sup> In poetischer Form entwickelte er sie in der 1795 veröffentlichten Erzählung „Die Lebenskraft oder der rhodische Genius“. Und auch in seine wissenschaftliche Arbeit spielte das Erkenntnisinteresse an einer Einheit der belebten Natur hinein – beispielsweise wenn er sich in einer Debatte mit dem Physiologen Samuel Thomas Sömmering gegen trennscharfe Unterscheidungen zwischen tierischen und pflanzlichen Organismen aussprach. Mit Galvanis Studien zum „elektrischen Fluidum“ schien sich nun ein Forschungsfeld zu öffnen, das die Aussicht versprach, die Idee einer „Lebenskraft“ lasse sich empirisch stützen oder sogar verifizieren.<sup>2</sup>

Dieser Erwartung folgend, interpretiert Humboldt im ersten Band seiner „Versuche“ die Ergebnisse seiner Experimente. Die mithilfe unterschiedlicher Metalle ausgelösten Zuckungen im Muskelgewebe von Fröschen seien „eigentliche Wirkungen der Vitalität“, der „Stimulus“ liege „in den erregbaren Organen selbst“ und werde also nicht durch die Metalle

### AUTOR



■ Christian Wißler M.A. ist an der Universität Bayreuth verantwortlich für den Bereich Wissenschaftskommunikation.

### LITERATURTIPPS

F. Holl, E. Schulz-Lüpertz: „Ich habe so große Pläne dort geschmiedet ... Alexander von Humboldt in Franken. Gunzenhausen 2012.“

S. Finger, M. Piccolino: Alexander von Humboldt: Galvanism, Animal Electricity, and Self-Experimentation. *Journal of the history of the neurosciences* (2013), 22. Part 1: 225-260; Part 2: 327-352.



■ Abb. 1: Luigi Galvani (1737 – 1798), Ölgemälde eines unbekanntem Künstlers aus dem Museo di Palazzi Poggi, Bologna (Foto: wikimedia commons, PD-Art (PD-old-100)).



■ Abb. 2: Statue von Alessandro Volta (1745–1827) in Como (Foto: wikimedia commons, Ramessos).



■ Abb. 3: Alexander von Humboldt (1769–1859), 1807 mit Bleistift und Tusche porträtiert von Frédéric Christophe de Houdetot, Scan des Originals aus der Bibliothek des Conseil d'État, Paris, Frankreich (Bild: wikimedia commons, PD-scan (PD-old-100)).

in die Organe hineingetragen.<sup>3</sup> Insofern stimmt er Galvani zu. Allerdings hat er Vorbehalte gegenüber dessen Redeweise von einer tierischen *Elektrizität*. Er will das „galvanische Fluidum“, wie er Galvanis „electricum fluidum“ lieber nennt, nicht mit einer Elektrizität gleichsetzen, wie sie bekanntermaßen durch metallische Leiter fließt. Noch ist für Humboldt nicht bewiesen, dass ein universales, die belebte und unbelebte Natur übergreifendes Phänomen namens „Elektrizität“ existiert. Im Gegenteil, er glaubt in eigenen Experimenten Indizien dafür gefunden zu haben, dass das Fluidum, das Galvani zur Erklärung jener Muskelkontraktionen anführt, von der Elektrizität in metallischen Leitern zu unterscheiden sei.<sup>4</sup>

## Empirie statt Spekulation

Die Vorsicht gegenüber übereilten Erklärungen wächst im Verlauf seiner Studien. Im zweiten Band seiner „Versuche“ verabschiedet sich Humboldt von monokausalen Erklärungen, welche die in Tier- und Selbstversuchen beobachteten Phänomene auf das Wirken einer besonderen „Lebenskraft“ zurückführen. Die Überzeugung, dass alles Lebendige eine komplexe funktionale Einheit darstellt, führt ihn jetzt zu einem Paradigma des Forschens, das prinzipiell von einer Vielzahl erklärungsrelevanter Faktoren ausgeht: „In einem belebten Organe ist alles belebt. Die vielen Functionen hängen daher nicht von einzelnen Stoffen, sondern von der Zusammenwirkung aller ab. Wir dürfen uns nicht einzelne Substanzen auswählen und diesen zuschreiben, was das gemeinsame Resultat der ganzen Mischung ist.“ Und an anderer Stelle nimmt er davon Abstand, etwas „eine eigene Kraft zu nennen, was vielleicht bloß durch das Zusammenwirken der im einzelnen längst bekannten materiellen Kräfte bewirkt wird.“ Solange die Möglichkeit besteht, dass diese Kräfte für die Erklärung natürlicher Lebensfunktionen ausreichen, solle die Forschung nicht „Zuflucht“ in der Annahme einer separaten Lebenskraft suchen, deren Existenz unbewiesen ist.<sup>5</sup> Das heuristische Prinzip, das Humboldt hier formuliert, erinnert von fern an den Grundsatz, der dem Scholastiker William von Ockham zugeschrieben wurde und seit dem 19. Jhd. in der Wissenschaftstheorie neue Bedeutung gewann: „Entia non sunt multiplicanda praeter necessitatem.“<sup>6</sup>

Eine solche Zurückhaltung war nicht selbstverständlich, wie ein Blick auf die ideengeschichtliche Entwicklung in Deutschland zeigt. Die Dichter der Romantik waren von elektrischen Phänomenen fasziniert und stellten phantasievolle Beziehungen zu

psychischen Erlebnissen und sozialen Interaktionen her. Spekulative Naturphilosophie und Metaphysik entfernten sich zusehends von der empirischen Forschung. So erklärte Hegel schließlich: „Elektrizität ist der reine Zweck der Gestalt, die sich von ihr befreit; die Gestalt, die ihre Gleichgültigkeit aufzuheben anfängt; denn die Elektrizität ist das unmittelbare Hervortreten oder das noch nicht von der Gestalt herkommende, noch durch sie bedingte Daseyn, – oder noch nicht die Auflösung der Gestalt selbst, sondern der oberflächliche Prozeß, worin die Differenzen ihre Gestalt verlassen, aber sie zu ihrer Bedingung haben, und noch nicht an ihnen selbstständig sind.“<sup>7</sup> Da waren die Brücken zu einer beobachtenden und messenden Naturforschung längst abgerissen.

## Von Franken nach Oberitalien

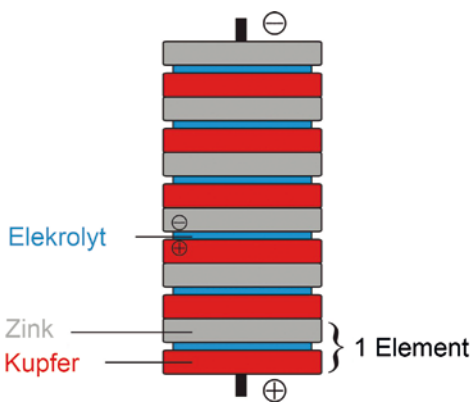
Eine der Empirie verpflichtete, vorwärtsdrängende und nicht in Begriffssysteme eingeschlossene Wissenschaft aber blieb Humboldts Lebenselixier. Deshalb war er fähig zu produktiven Auseinandersetzungen mit Wissenschaftlern, die andere Positionen vertraten, und so konnte er auch gelassen mit eigenen Fehleinschätzungen umgehen. Dies zeigte sich nicht zuletzt im Verhältnis zu Alessandro Volta, Professor für Experimentalphysik an der Universität Pavia. Volta war zunächst von Galvanis Annahme einer „tierischen Elektrizität“ begeistert, hielt sie sogar für eine der größten Entdeckungen aller Zeiten.<sup>8</sup> Doch wenig später legte er sich, ohne die Elektrizität in seltenen Fischarten abstreiten zu wollen, eindeutig auf eine Gegenposition fest. Froschschenkel, die im Kontakt mit verschiedenen Metallen zu zucken beginnen, tun dies – so argumentierte er – keineswegs deshalb, weil ihnen ein „elektrisches Fluidum“ innewohnt. Ihre Bewegungen werden vielmehr *von außen* durch eine elektrische Spannung ausgelöst, wenn über das Muskelgewebe eine Verbindung zwischen unterschiedlichen Metallen hergestellt wird. Dieser Auffassung, die sich später als richtig erwies, wollte sich Humboldt jedoch nicht anschließen – auch dann nicht, als er 1795 seinen italienischen Kollegen am Comer See aufsuchte und sie gemeinsam mit Fröschen experimentierten. Zu sehr war Humboldt noch von der Vorstellung fasziniert, „nun bald den gordischen Knoten des Lebensprozesses zu lösen“<sup>9</sup>

## Die erste Batterie der Welt

Volta nutzte die Erkenntnisse, die er bei seinen Versuchen gewonnen hatte, für eine bahnbrechende



Konstruktion. Er platzierte zwischen Zink- und Kupferscheiben feuchte Plättchen aus Stoff, Pappe oder Leder; eine Kombination, die heute als „galvanisches Element“ bezeichnet wird. Die in Säure getränkten Plättchen fungierten darin als Elektrolyt, die Metallscheiben als Elektroden, so dass sich eine Spannung einstellte.<sup>10</sup> Indem Volta diese Zellen in einer Säule übereinander stapelte, addierten sich die Spannungen für die Nutzung in einem externen Stromkreis. In einem berühmt gewordenen Brief von 1800 an den Präsidenten der Royal Society in London, Sir Joseph Banks, berichtete Volta ausführlich über seine Erfindung. Seine „Säulen-Batterie“ erwies sich als technische Sensation. Denn während die bisherigen Elektrisiermaschinen nur für wenige Sekunden durch Reibung Strom erzeugen konnten, gab es jetzt erstmals ein Instrument, mit dem sich auf chemischer Basis über längere Zeit ein Stromkreis aufrechterhalten ließ.



■ Abb. 4: Das Bauprinzip der „Volta'schen Säule“ (Grafik: wikimedia commons, Nick B., CC-BY-SA-3.0-migrated).

Humboldt zögerte nicht, die Erfolge seines Kollegen anzuerkennen. Zugleich fiel ihm auf, dass einige seiner früheren Versuchsaufbauten durchaus Ähnlichkeiten mit Experimenten aufwiesen, die Volta zur Konstruktion seiner Batterie unternommen hatte: „Mit der Begeisterung, die zum Forschen treibt, aber der richtigen Auffassung des Erforschten hinderlich wird, hatte ich mich seit Jahren mit den Erscheinungen der galvanischen Elektrizität beschäftigt; ich hatte, indem ich Metallscheiben aufeinander legte und Stücke Muskelfleisch oder andere Substanzen dazwischen brachte, mir unbewusst, echte Säulen aufgebaut (...)\", notierte er im Rückblick.<sup>11</sup> Um „echte Säulen“ im Sinne von Voltas Batterie handelte es sich freilich nicht. Denn wie Humboldts Beschreibung und auch die zugehörigen Kupferstiche (siehe S. 68)

erkennen lassen, fehlt bei ihm ein wichtiges Bauprinzip: In der Säulen-Batterie müssen die galvanischen Elemente ohne Zwischenräume übereinander gestapelt werden, so dass verschiedene Metalle sich berühren. Nur so addiert sich die in den Elementen erzeugte Spannung. Hätte Humboldt diesen entscheidenden Schritt zur Konstruktion der Batterie gefunden, wenn er 1795 Voltas Auffassungen gefolgt wäre?

### Auf dem Weg zur Elektrophysiologie

1805 traf Humboldt erneut mit Volta zusammen. Dessen Einfluss trug nun dazu bei, dass er bei der wissenschaftlichen Auswertung seiner Reisen nach Süd- und Zentralamerika die Vorstellung endgültig aufgab, der elektrische Strom in metallischen Leitern – den Volta jetzt mit seiner Batterie erzeugen konnte – sei etwas ganz anderes als die an tierischen Organismen zu beobachtenden galvanischen Effekte. Die Ergebnisse, die er bei Untersuchungen an tropischen Zitteraalen erzielt hatte, bestärkten ihn in der Auffassung, „dass die Elektrizität und die galvanische Wirkung dem Wesen nach eins sind.“<sup>12</sup> Mit diesen Studien leistete Humboldt vorausweisende Beiträge zu einer Forschungsrichtung, die sich erst in der Mitte des 19. Jhdts. zu etablieren begann und dabei auch neues Licht auf die Studien Galvanis warf: die experimentelle Elektrophysiologie. Von den raschen Fortschritten in der Batterietechnik blieb sie lange unbeeinflusst. Aber in neuester Zeit, vor allem bei der Entwicklung des Herzschrittmachers, haben beide Forschungsgebiete zusammengefunden.



■ Abb. 5: Alexander von Humboldt und Aimé Bonpland am Orinoco, Ausschnitt aus einem Gemälde von Eduard Ender, 1856 (Bild: wikimedia commons, PD-Art (PD-old-70)).

- 1 Vgl. hierzu A. Mook: Die freie Entwicklung innerlicher Kraft. Die Grenzen der Anthropologie in den frühen Schriften der Brüder von Humboldt. Göttingen 2012, bes. 77-100.
- 2 Galvanis Studien zur „tierischen Elektrizität“ schienen überdies die Möglichkeit zu eröffnen, die alte Frage, ob und wie die Seele auf den Körper einwirken könne, „neu und experimentell überprüfbar anzugehen“; B. Specht: Physik als Kunst. Die Poetisierung der Elektrizität um 1800. Berlin – New York 2010, 82.
- 3 F. A. von Humboldt: Versuche über die gereizte Muskel- und Nervenfasern nebst Vermuthungen über den chemischen Proceß des Lebens in der Thier- und Pflanzenwelt. Bd. 1-2. Posen, Berlin 1797-1798, Bd. 1, 397 und 379.
- 4 S. Finger, M. Piccolino (2013): siehe Literaturtipps, 249ff.
- 5 Zitate wie Anm. 3, Bd. 2, 63; 433; 432.
- 6 „Entitäten dürfen nicht über das (für eine Erklärung) Notwendige hinaus vermehrt werden.“
- 7 G.W.F. Hegel: System der Philosophie. Zweiter Teil: Die Naturphilosophie, § 323, Zusatz. Sämtl. Werke Bd. 9. In der Ausg. von H. Glöckner, Stuttgart 1958, 369.
- 8 Wie Anm. 4, 240.
- 9 Brief an J. C. Freiesleben, 9. Feb. 1796. Zit. und Nachweis bei F. Holl, E. Schulz-Lüpertz (2012), siehe Literaturtipps, 101.
- 10 Volta und der Physiker Christoph Heinrich Pfaff waren die ersten, die verschiedene Metalle in eine Reihe stellten, die heute als elektrochemische Spannungsreihe bezeichnet wird.
- 11 Alexander von Humboldt's Reise in die Aequinoctialgegenden des neuen Continents. In deutscher Bearb. von Hermann Hauff. Stuttgart 1859, 402.
- 12 Wie Anm. 10, 408. „Humboldt gesteht nun selbst durch Volta überzeugt ein die Identität der Elektrizität mit der galvanischen action ...“, notiert Soemmering nach 1805. Zit. und Nachweis bei W. F. Kümmel: Alexander von Humboldt und Soemmering: Das galvanische Phänomen und das Problem des Lebendigen, in: G. Mann, F. Dumont (eds.): Samuel Thomas Soemmering und die Gelehrten der Goethezeit. Stuttgart – New York, 1985, 73-88, hier 85.

## Seile aus Edelstahl im Sonnenlicht

Im Innenhof des Gebäudes Geowissenschaften II, an seiner Nordwand, fällt das Sonnenlicht auf eine rund sechs Meter hohe und 18 Meter breite Installation des aus Bayern stammenden Künstlers Alf Schuler. Die „Seilverspannung“ aus dem Jahr 1977 ist eines der ersten Kunstwerke, die auf dem Campus der 1975 eröffneten Universität Bayreuth installiert wurden. Die Drahtseile aus Edelstahl lösen bei Sonnenschein reizvolle und im Tagesverlauf wechselnde Licht- und Schattenspiele aus. Sie sind in Abständen von 1,20 Metern, die dem Grundfugenmaß der weißen Wandfläche entsprechen, mit Stahlösen am Boden befestigt.

Alf Schuler wurde 1945 in Anzenbach/Berchtesgaden geboren. Seine künstlerische Ausbildung erhielt er an der Werkkunstschule Aachen und als Schüler von Gerhard Wendland an der Akademie der Bildenden Künste Nürnberg. Schon bald erzielte er mit Skulpturen, Zeichnungen, Bodenarbeiten und Wandstücken internationale Bekanntheit. Sein Werk entwickelt die nach dem Zweiten Weltkrieg in den USA entstandene Kunstrichtung der „Minimal Art“ weiter. Installationen aus Seilen, Eisenrohren und anderen industriell gefertigten Materialien machen physikalische Phänomene wie Schwerkraft und Spannungsverhältnisse sichtbar und erlebbar. 1977 wurde Alf Schuler mit dem Förderungspreis der Stadt Nürnberg, 1981 mit dem Kunstpreis der Böttcherstraße in Bremen ausgezeichnet. 1989 wurde er auf eine Professur für Bildende Kunst an der Kunsthochschule Kassel berufen.

