



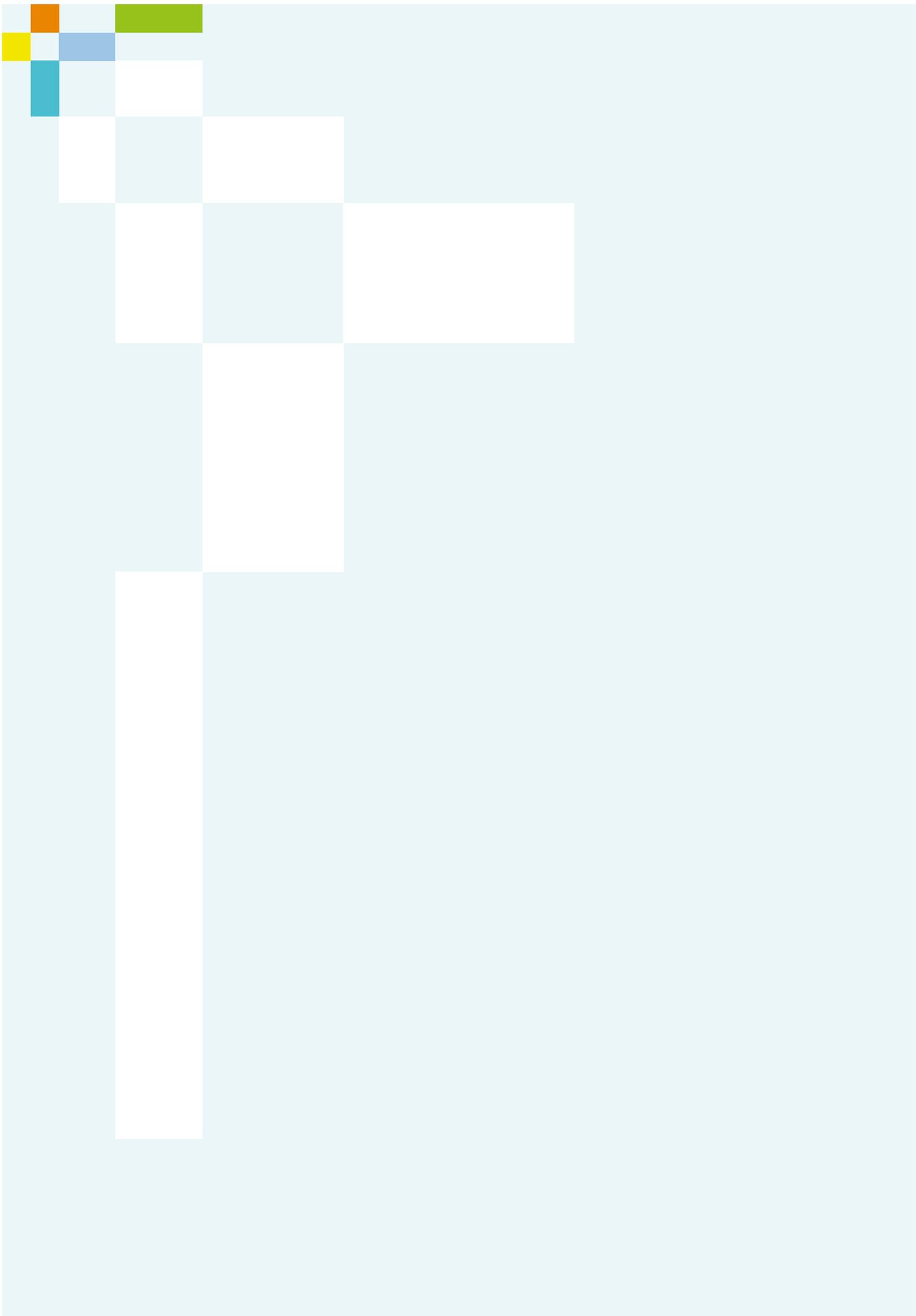
acatech MATERIALIEN

Werkstoffe und Materialien für die Energiewende

Harald Bolt, Isolde Arzberger, Christina Berger
(Hrsg.)

 acatech

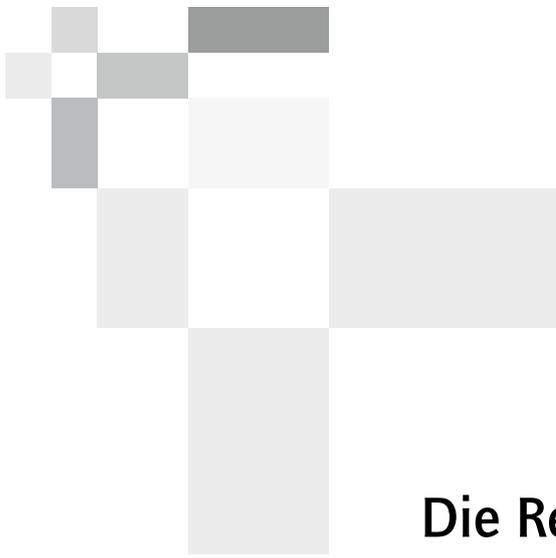
DEUTSCHE AKADEMIE DER
TECHNIKWISSENSCHAFTEN



acatech MATERIALIEN

Werkstoffe und Materialien für die Energiewende

Harald Bolt, Isolde Arzberger, Christina Berger
(Hrsg.)



Die Reihe acatech MATERIALIEN

In dieser Reihe erscheinen Diskussionspapiere, Vorträge und Vorstudien, die im Rahmen der acatech Projektarbeit entstanden sind. Die Bände dieser Reihe liegen in der inhaltlichen Verantwortung der jeweiligen Herausgeber und Autoren.

Alle bisher erschienenen acatech Publikationen stehen unter www.acatech.de/publikationen zur Verfügung.

Inhalt

1	Einleitung	5
2	Photoelektronische Materialien	6
2.1	Einführung	6
2.2	Werkstoffseitige Möglichkeiten und Herausforderungen der Beleuchtung	6
2.3	Werkstoffseitige Möglichkeiten und Herausforderungen der nächsten zehn Jahre in der Photovoltaik	6
2.4	Horizonte zur Erschließung von Energietechnologien durch neue Werkstoffe in der Photovoltaik	7
2.5	Horizonte zur Erschließung von Energietechnologien durch neue Werkstoffe für die direkte Wasserspaltung	8
2.6	Fazit	8
	Literatur	9
3	Materialien mit elektrochemischen Eigenschaften für Speicheranwendungen	10
3.1	Einführung	10
3.2	Werkstoffseitige Möglichkeiten und Herausforderungen der nächsten zehn Jahre	10
3.3	Horizonte zur Erschließung von Speicheroptionen durch neue Werkstoffe	11
3.4	Fazit	12
	Literatur	13
4	Werkstoffe für lastflexible Kraftwerke	14
4.1	Einführung	14
4.2	Werkstoffseitige Möglichkeiten und Herausforderungen der nächsten zehn Jahre	14
4.3	Horizonte zur Erschließung von Energietechnologien durch neue Werkstoffe	15
4.4	Fazit	16
	Literatur	17
5	Rolle der Leichtbauwerkstoffe in der Energietechnik	18
5.1	Einführung	18
5.2	Werkstoffseitige Möglichkeiten und Herausforderungen der nächsten zehn Jahre	18
5.3	Horizonte zur Erschließung von Energietechnologien durch neue Werkstoffe	19
5.4	Fazit	20
	Literatur	20



6 Polymerwerkstoffe für Energieeffizienz und regenerative Energie/Stoff-Technologien	21
6.1 Einführung	21
6.2 Werkstoffseitige Möglichkeiten und Herausforderungen der nächsten zehn Jahre	21
6.3 Horizonte zur Erschließung von Energietechnologien durch Polymerwerkstoffe	23
6.4 Fazit	24
Literatur	24
7 Materialien für effiziente Energiewandlung	25
7.1 Beispiel 1: Weichmagnetische Werkstoffe	25
7.1.1 Einführung	25
7.1.2 Werkstoffseitige Möglichkeiten und Herausforderungen im Hinblick auf Effizienzsteigerung von Generatoren, Transformatoren und Motoren	26
7.1.3 Horizonte zur Erschließung von Effizienzpotenzialen durch neue Werkstoffe und Verarbeitungstechnologien	27
7.1.4 Fazit	28
Literatur	28
7.2 Beispiel 2: Die Rolle der Tribologie für die Energiesysteme der Zukunft	29
7.2.1 Einführung	29
7.2.2 Werkstoff- und verfahrensseitige Möglichkeiten und Herausforderungen	29
7.2.3 Horizonte zur Erschließung	31
7.2.4 Fazit	31
Literatur	31
8 Querschnittsthemen und Methoden	32
Literatur	33

1 Einleitung

Der Umbau des Energiesystems in Deutschland im Hinblick auf eine Maximierung des Anteils erneuerbarer Energien erfordert Aktivitäten entlang zweier Handlungsstränge. Einerseits ist dies die verstärkte Durchdringung des Versorgungssystems mit unterschiedlichen, nachhaltigen Energietechnologien sowie deren Verknüpfung im Gesamtsystem von Erzeugung, Verteilung und Speicherung. Andererseits sind zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit des zukünftigen Energiesystems die kosten- und effizienzseitige Optimierung von verfügbaren Technologien sowie bahnbrechende innovative Entwicklungen notwendig.

Material- und Werkstofffragen spielen bei der Umsetzung der Energiewende eine wesentliche Rolle, da sie sowohl für den Betrieb bestehender Anlagen und den Einsatz vorhandener Technologien relevant sind als auch entscheidend zu Innovationen und der entsprechenden industriellen Wertschöpfung beitragen. Dies umfasst unterschiedlichste Aspekte: Für den Betrieb von Energieanlagen sind Fragen der Alterungs- und Schädigungsprozesse von Materialien und Werkstoffen während des Einsatzes, die zu Beschränkungen der Lebensdauer und damit zu erhöhten Kosten führen, von wesentlicher Bedeutung. Solche Degradationsvorgänge können zum Beispiel bei mit fossilen Brennstoffen betriebenen Kraftwerken durch eine dynamischere Betriebsweise deutlich zunehmen. Degradationsprozesse üben auch maßgeblichen Einfluss auf die Alterung und damit die Verringerung der Leistungsfähigkeit von Photovoltaikmodulen aus. Eine Optimierung von Technologien durch neue Werkstoffsysteme kann etwa mittels Leichtbaukompositen geschehen, welche im Bereich der Windenergie die Konstruktion von deutlich effizienteren Rotorblättern erlauben. Innovationen können zudem durch völlig neuartige Material- beziehungsweise Werkstoffsysteme ermöglicht werden, wie zum Beispiel bei der Entwicklung von leistungsfähigen und betriebssicheren Feststoffbatterien. Die Verfügbarkeit insbesondere einiger metallischer Rohstoffe, wie sie für erneuerbare Energietechnologien oder elektrochemische Speicher und Wandler benötigt werden, ist stark abhängig von globalen Markteinflüssen. Aufgaben der Materialforschung sind in diesem Zusammenhang die Entwicklung alternativer Werkstoffsysteme zu deren Substitution sowie Forschung zur Erhöhung der Materialeffizienz.¹

Hinsichtlich der Beurteilung existierender und der Entwicklung neuer Materialien und Werkstoffe sind wesentliche Kompetenzen notwendig, die im Feld zwischen Universitäten, Forschungseinrichtungen und Industrie angesiedelt sein müssen. Insbesondere zeichnet sich eine deutliche Verstärkung der Bedeutung von modell- und simulationsbasiertem Vorgehen ab. Die Entwicklung des Hochleistungsrechnens und die komplementären Möglichkeiten im Umgang mit großen Datenmengen erlauben mittlerweile die skalenübergreifende Modellierung von Strukturen und Prozessen, welche mehrere Größenordnungen auf den Zeit- und Längenskalen überspannen. So können zum Beispiel neue Materialsysteme mit erwünschten Eigenschaften systematisch durch Screening-Methoden gesucht und identifiziert werden. Die Degradation von Werkstoffen unter realistischen Betriebsbedingungen und Einsatzdauern von zwanzig bis vierzig Jahren kann damit besser vorhergesagt werden.

Über die Modellierung und Simulation hinaus sind für die Herstellung von neuen Materialien und Werkstoffen häufig neue Synthese- und Prozessierungsrouten notwendig. Ein Beispiel hierfür ist die Entwicklung von Druckverfahren für den Schichtaufbau von Brennstoffzellen oder zur Herstellung von Photovoltaikmodulen.

Ein wesentlicher Schlüssel für die Entwicklung und Beurteilung von Materialien und Werkstoffen besteht in der detaillierten Charakterisierung der Materialstrukturen und -eigenschaften. Hierzu werden Methoden eingesetzt, welche die gesamte Spannweite von der Mikroskopie mit sub-atomarer Auflösung bis hin zu großskaligen mechanischen Bauteiluntersuchungen abdecken.

Die vorliegende Analyse befasst sich mit der Rolle von Materialien und Werkstoffen der für den Energiesektor wesentlichen Funktionsbereiche und mit dem entsprechenden Forschungsbedarf in den hauptsächlich für diesen relevanten Technologiebereichen. Betrachtet werden Materialklassen mit elektrochemischen und photoelektronischen Eigenschaften, Werkstoffe für Leichtbauanwendungen sowie Werkstoffe für lastflexible Kraftwerke. Zudem werden die spezifischen Anforderungen an materialwissenschaftliche Methoden, insbesondere an die Modellierung und die Simulation, sowie die Rolle der Charakterisierung von Materialien angesprochen.

1 | Vgl. Angerer et al.



2 Photoelektronische Materialien

Bernd Rech, Helmholtz-Zentrum Berlin

Dank für Hilfe und Diskussionen gilt meinen Kollegen Stephan Völcker, Fachgebiet Lichttechnik, TU Berlin sowie Rutger Schlatmann und Roel van de Krol, beide Helmholtz-Zentrum Berlin

2.1 Einführung

Der Energieinhalt des Sonnenlichts, das pro Jahr auf die Erde einfällt, übertrifft den derzeitigen globalen jährlichen Primärenergiebedarf um etwa einen Faktor 10.000. Es gilt, dieses riesige Potenzial in den nächsten Jahren und Jahrzehnten mehr und mehr technisch auszunutzen, um ein nachhaltiges Energieversorgungssystem Wirklichkeit werden zu lassen. Photoelektrische Materialien und Bauelemente, die Sonnenlicht in elektrischen Strom und idealerweise auch in speicherbare chemische Energie wandeln, bilden dazu den Schlüssel. Solche Materialien spielen aber auch eine entscheidende Rolle bei der Nutzung des umgekehrten Effekts: der effizienten Wandlung von elektrischem Strom in Licht.

In dieser Übersicht werden Werkstoff- und Materialfragen für die drei Technologiefelder energieeffiziente Beleuchtung mit LEDs (Lichtemittierende Dioden), Photovoltaik und die direkte solare Brennstoffherzeugung diskutiert. Die energieeffiziente Beleuchtung wird dabei in einem kurzen Exkurs behandelt, dessen Knappheit jedoch nicht über die sehr große Bedeutung hinwegdeuten soll. Die Photovoltaik wird sowohl auf der Zeitskala der nächsten zehn Jahre als auch im Hinblick auf die langfristigen Entwicklungen bis 2050 betrachtet. Die direkte Wandlung von Sonnenlicht in chemische Energieträger ist noch sehr im Bereich der Grundlagenforschung angesiedelt und wird daher als langfristige Option diskutiert.

Im Mittelpunkt der Ausführungen stehen lichtwandelnde Halbleitermaterialien. Viele wichtige Materialfragen betreffen die Kontaktierung, Einbettung und den Schutz der aktiven Bauelemente und werden nur gestreift oder exemplarisch betrachtet. Zu beachten ist auch, dass zahlreiche Materialien eine breite Verwendung in vielen Anwendungsfeldern außerhalb der Energietechnik finden. Ein Beispiel sind transparente und leitfähige Oxide (TCOs).

2.2 Werkstoffseitige Möglichkeiten und Herausforderungen der Beleuchtung

Die Beleuchtung hat einen Anteil von 15 bis 20 Prozent am globalen Stromverbrauch. Einen wesentlichen Anteil daran haben Glühlampen, die nur einen relativ geringen Teil der elektrischen Energie in Licht wandeln. Die Wandlung des elektrischen Stroms in Licht in Halbleiterdioden ist im Gegensatz dazu extrem effizient und hat in den letzten Jahrzehnten gewaltige Fortschritte erzielt. Das Einsparpotenzial für Deutschland durch die LED-Technik wird bis zum Jahr 2020 mit mehr als 20 Terawattstunden prognostiziert.¹

Die heutige kommerzielle LED-Technik für Beleuchtung wird von GaN-basierten III/V-Halbleiterdioden dominiert, die blaues Licht erzeugen. Dabei sorgen phosphoreszierende Lichtwandler für die Konversion in weißes Licht. Wichtige Material- und Werkstofffragen, die an einigen Stellen eine Überschneidung mit den Fragen der Photovoltaik aufweisen², sind:

- die Entwicklung von Halbleitermaterialien mit effizienter Konversion für verschiedene Spektralfarben und die Realisierung auf kostengünstigen Substraten (zum Beispiel III/V-Halbleiter auf Silizium-Substrat),
- verbesserte Lichtwandler mit verlustfreier optischer Konversion und breiten Möglichkeiten zur Modifikation des Emissionsspektrums („warmes Licht“) sowie unter Vermeidung von seltenen Erden und toxischen Materialien,
- großflächige organische Leuchtdioden (OLEDs) mit langer Lebensdauer und günstigen Elektroden (Ersatz von Indium-basierten TCO-Materialien).

2.3 Werkstoffseitige Möglichkeiten und Herausforderungen der nächsten zehn Jahre in der Photovoltaik

Die Photovoltaik hat sich innerhalb kurzer Zeit von einem Nischen- zu einem Massenmarkt entwickelt. Global waren 2014 mehr als 150 Gigawatt-PV-Kapazitäten installiert. Die Preise für PV-Systeme sind rapide gefallen und die Stromgestehungskosten liegen heute an guten Standorten deutlich unter 10c/kWh. Das Potenzial für weitere Kostensenkungen kann anhand von Lernkurven gut

1 | Vgl. McKinsey & Company Inc. 2012.

2 | Für eine digitale Roadmap vgl. U.S. Department of Energy 2013.

abgeschätzt werden und ist noch sehr groß. In der aktuellen Roadmap der IEA wird beispielsweise eine global installierte PV-Leistung von 4.600 Gigawatt im Jahre 2050 prognostiziert.³

Der heutige Photovoltaikmarkt wird von kristallinen Silizium-solarzellen auf Basis von mono- oder multikristallinen Wafern dominiert. Der Rekordwirkungsgrad im Labor beträgt 25,6 Prozent, wobei typische Solarmodule in der Anwendung Wirkungsgrade im Bereich von 15 bis 18 Prozent zeigen. Für diese Technologie-linien gibt es eine detaillierte Roadmap.⁴ Beispielhaft werden drei wichtige Herausforderungen im Hinblick auf Materialfragen kurz vorgestellt:

- Die Materialkosten werden von den Kosten der kristallinen Silizium-Wafer dominiert. Zielsetzung ist es, einerseits den Siliziumeinsatz durch kostengünstige Herstellverfahren, dünnere Wafer und geringere Materialverluste beim Wafersägen zu reduzieren und andererseits die Wirkungsgrade durch hocheffiziente Solarzellenkonzepte zu erhöhen.
- Die für die Metallisierung/Kontaktierung der Solarzellen benötigten Pasten oder Tinten enthalten große Mengen an Silber und Aluminium. Teilweise ist auch Blei als Beimischung enthalten. Die Metallisierungsprozesse sind neben dem Siliziumwafer einer der größten Kostenfaktoren. Lösungen versprechen der Ersatz von Silber durch Kupfer und bleifreie Pasten. Intensive Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen sind dazu notwendig.
- Die Lebensdauer und Zuverlässigkeit von Solarmodulen wird stetig gesteigert. Ein aktueller Trend sind Glas beziehungsweise Glaslamine. Kostengünstige hochtransparente und langlebige Gläser und Verbundmaterialien spielen hier eine entscheidende Rolle.

Im Gegensatz zur hoch industrialisierten wafer-basierten Silizium-technologie gibt es für die ebenfalls marktreifen dünn-schicht-basierten PV-Module keine spezifisch ausgearbeiteten Roadmaps. Den besten Überblick gibt die in vorgestellte Forschungsagenda, die die verschiedenen PV-Technologien umfangreich diskutiert.⁵

Die direkte großflächige Herstellung von dünnen Verbindungshalbleiter- oder Siliziumschichten auf Glassubstraten oder Folien eröffnet einerseits vielfältige Anwendungsfelder und zeichnet sich durch einen niedrigen Energieverbrauch bei der Herstellung der Solarzellen aus, erfordert aber andererseits auch noch umfangreiche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in der Material- und

Werkstoffforschung entlang der Herstellungskette. Aktuell zeigen die Verbindungshalbleiter-basierten Dünnschicht-solarzellen auf Basis von CIGS (Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid) und CdTe die höchsten Wirkungsgrade (bis 21,7 Prozent im Labor), welche die Rekordwerte von multikristallinen Wafersolarzellen erreichen und im Spitzenwert sogar leicht übertreffen.

Das große Potenzial der Photovoltaik für eine höchsteffiziente Energiewandlung zeigen bereits heute Mehrfach-solarzellen auf III/V-Halbleiterbasis. Unter konzentriertem Sonnenlicht liegt der Weltrekord derzeit bei 45 Prozent Wirkungsgrad. Diese Solarzellen sind sehr teuer in der Herstellung und wurden hauptsächlich für Weltraumanwendungen entwickelt. Die Kombination aus teuren, aber sehr kleinflächigen Solarzellen und kostengünstigen optischen Elementen und Nachführeinheiten eröffnet allerdings einen interessanten Pfad für niedrige Stromgestehungskosten in Regionen mit direktem Sonnenlicht im Sonnengürtel der Erde. Die Material- und Werkstoffforschung ist eng verknüpft mit den Herausforderungen der III/V-basierten Opto- und Mikroelektronik (unter anderem siehe auch die Diskussion zu LEDs), wobei die Entwicklung von kostengünstigen Fokussieroptiken auch ein Thema der Photonik ist.

2.4 Horizonte zur Erschließung von Energietechnologien durch neue Werkstoffe in der Photovoltaik

Die Photovoltaik ist noch eine sehr junge Technologie zur Stromerzeugung und die Vielfalt an Materialien ist groß und wächst stetig. Neben den klassischen Halbleitermaterialien, die durch Nanotechnologie und neue zwei- und dreidimensionale Strukturierung modifiziert werden können, gibt es organische Halbleiter, organische/anorganische Hybridsysteme und farbstoff-sensibilisierte Solarzellen. Eine aktuell sehr intensiv diskutierte Materialklasse sind Perowskitsolarzellen, die als Lichtabsorber in der Perowskitkristallstruktur kristallisiertes $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ und verwandte Verbindungen nutzen. Innerhalb kürzester Zeit wurde ein Wirkungsgrad von zwanzig Prozent im Labor erreicht. Zentrale Herausforderungen sind der Ersatz des Schwermetalls Blei und die Langzeitstabilität des Materialsystems.

Zielsetzung in der Photovoltaik ist es, den Kosten-Lernkurven langfristig folgen zu können. Eine einfache Extrapolation führt zu Stromgestehungskosten im Bereich von 5ct/kWh in

3 | Vgl. International Energy Agency 2014.

4 | Vgl. Semi 2014.

5 | Vgl. EU Photovoltaic Technology Platform 2011.



Deutschland und zu noch kleineren Werten für Gegenden im Sonnengürtel der Erde. Damit dies gelingt, muss der Dreiklang aus kostengünstigen Herstellverfahren sowie sehr hohen Wirkungsgraden, um die Systemkosten niedrig zu halten, und hoher Langzeitstabilität (über vierzig Jahre) gelingen. Dies ist eine große und lohnende Herausforderung für die Material- und Werkstoffforschung. Die Lösung erfordert neue Materialien und Verfahren, die die heutigen Technologien erweitern (aus Sicht des Autors wahrscheinlich) oder komplett ersetzen (weniger wahrscheinlich). Zentrale Herausforderungen der Materialforschung sind:

- eine kontinuierliche Weiterentwicklung der kristallinen Siliziumtechnologie mit signifikant niedrigerem Siliziumein-satz (sehr dünne Wafer, sägeverlustfreie monokristalline Si-Filmtechnologien, hochqualitative kristalline Siliziumschichten auf Fremdsubstrat),
- stabile und hocheffiziente Solarzellen aus billigen und verfügbaren Ausgangsmaterialien mit extrem schnellen und kostengünstigen Verfahren (zum Beispiel Dünnschichttechniken, Drucktechniken) und
- die Entwicklung von Materialsystemen mit großem Bandabstand für hocheffiziente und kostengünstige, gestapelte Solarzellen.

2.5 Horizonte zur Erschließung von Energietechnologien durch neue Werkstoffe für die direkte Wasserspaltung

Eine große Herausforderung der Solarenergienutzung stellen die fluktuierende Erzeugung und – in gemäßigten Breiten wie in Deutschland – die starke jahreszeitliche Schwankung dar. Während es gut vorstellbar ist, den Tag-Nacht-Zyklus zukünftig teilweise über Batterien zu glätten, erfordert die saisonale Speicherung chemische Energiespeicher. Zudem kommen verschiedenste

Flexibilisierungsoptionen infrage, die im Hinblick auf das Energiesystem diskutiert werden müssen. Als generischer Ansatz ist die direkte Wasserstofferzeugung mit Sonnenlicht aus der direkten Kombination von Katalysatoren und Halbleiterschichten in einem monolithischen Bauelement ein sehr spannendes und vielfältiges Forschungsthema mit enger Synergie zur Photovoltaik und zur klassischen Wasserelektrolyse.

Im Prinzip kann die direkte Wasserspaltung mit sehr hohen Wirkungsgraden erfolgen. Bereits 1998 wurde ein Wirkungsgrad von zwölf Prozent (Umwandlung von Sonnenenergie in chemische Energie) mit einer III/V-basierten Solarzelle und mit Platin-katalysatoren gezeigt.⁶ Das Bauelement löste sich aber im Betrieb auf. Dieses Beispiel beschreibt plakativ den großen Forschungsbedarf. Notwendig sind daher

- die Entwicklung von Materialsystemen mit großer Band-lücke, um das Sonnenlicht hocheffizient in Elektron- und Lochpaare zu wandeln, und um das notwendige chemische Potenzial zur Wasserspaltung von mindestens 1,23 V zu erreichen,
- die Entwicklung von kostengünstigen und effizienten Katalysatoren aus leicht verfügbaren Materialien und
- die Entwicklung von Bauelementen und skalierbaren Systemen, die niedrige Transportverluste zeigen und einen langzeitstabilen Betrieb gewährleisten.

2.6 Fazit

Photoelektrische Materialien und ihr Einsatz in Bauelementen und Systemen zur direkten Wandlung von Sonnenlicht in Nutzenergie sowie umgekehrt zur höchsteffizienten Erzeugung von Licht sind Schlüsselkomponenten für eine zukünftige nachhaltige Energieversorgung. Insbesondere mit dem Blick auf eine notwendige, globale Energiewende ist die großtechnische Nutzung des praktisch unbegrenzt verfügbaren Sonnenlichts eine große Herausforderung und Chance. Lösungen erfordern Durchbrüche in der Material- und Werkstoffforschung.

6 | Vgl. Khaseley/Turner 1998, S. 425–427.

Literatur

EU Photovoltaic Technology Platform (Hrsg.): *A Strategic Research Agenda for Photovoltaic Solar Energy Technology*, 2. Auflage, 2011.

International Energy Agency (Hrsg.): *Technology Roadmap, Solar Photovoltaic Energy*, 2014.

Khaselev, O./Turner, J. A.: „A Monolithic Photovoltaic-Photoelectrochemical Device for Hydrogen Production via Water Splitting“. In: *Science*, 280: 5362, 1998, S. 425–427.

McKinsey & Company, Inc. (Hrsg.): *Lighting the Way: Perspectives of the Global Lighting Market*, 2. Auflage, 2012.

Semi (Hrsg.): *International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV)*, 5. Auflage, 2014. URL: <http://www.itrpv.net/Reports/Downloads/2014/> [Stand: 10.11.2016].

U.S. Department of Energy (Hrsg.): *Solid-State Lighting Research and Development, Multi-Year Program Plan, April 2013*, DOE/EERE-0961, 2013.



3 Materialien mit elektrochemischen Eigenschaften für Speichieranwendungen

Rüdiger-A. Eichel, Forschungszentrum Jülich

3.1 Einführung

Zentraler Treiber zur Entwicklung von Energiespeichern ist das Erreichen der gesetzten Ziele zur CO₂-Reduktion durch einen kontinuierlichen Ausbau regenerativ erzeugter Energie. Die zunehmend fluktuierende Energiebereitstellung wird zukünftig die Zwischenspeicherung auf verschiedenen Zeitskalen als eine wesentliche Flexibilitätsoption erforderlich machen. Der Bedarf an effektiven, sicheren und kostengünstigen Energiespeichern gliedert sich dabei hauptsächlich in zwei Anwendungsbereiche: mobile und stationäre Anwendungen. Elektrochemische Konzepte wie Batterien¹ und Brennstoffzellen² sowie elektrolytisch produzierter Wasserstoff stellen eine vielversprechende Alternative zu mechanischen und elektrischen Speichern, wie Schwungrädern oder Superkondensatoren, dar und werden im Folgenden entlang der beiden Anwendungsfelder betrachtet.³

3.2 Werkstoffseitige Möglichkeiten und Herausforderungen der nächsten zehn Jahre

Elektromobilität

Elektrisch betriebene Fahrzeuge mit Batteriespeichern sind bereits seit einigen Jahren kommerziell erhältlich. Die ver-

wendete Speichertechnologie basiert dabei ausschließlich auf Lithiumionenbatterien, wobei die Lebensdauer der Batteriepacks derzeit auf etwa sieben Jahre begrenzt ist.⁴ Neben der verfügbaren Reichweite (derzeit bis etwa 300 Kilometer) und der begrenzten Lebensdauer der Batterien stellen momentan insbesondere die hohen Material- und Produktionskosten ein großes Hindernis der Technologie für eine größere Marktdurchdringung dar. Der Zielwert für ein Batteriepack von zwanzig bis dreißig Kilowattstunden liegt dabei in einem Bereich von bis zu 4000 Euro.⁵

Die derzeit am Markt verfügbare Lithiumionentechnologie⁶ basiert auf der Verwendung organischer (flüssiger) Elektrolyte, die sich im Fall eines Kurzschlusses und der damit verbundenen Erhitzung der Zelle schnell zersetzen und brennbar sind. Zur Erhöhung der Sicherheit werden deswegen Additive zugesetzt⁷, die allerdings die Kosten zusätzlich erhöhen.

Die größte Herausforderung für die Elektromobilität oder für Brennstoffzellenfahrzeuge besteht somit in den im Vergleich mit der derzeit vorherrschenden Technologie, das heißt den Verbrennungsmotoren, hohen Kosten bei der Anschaffung. Was die Betriebskosten anbelangt, schneiden Elektrofahrzeuge besser ab als Verbrennungsfahrzeuge. Die summierten Kosten liegen aber insgesamt deutlich oberhalb der Kosten für ein Fahrzeug mit Verbrennungsmotor, wobei die mittleren Kosten für Batteriefahrzeuge etwa einen Faktor von 1,5 und die Brennstoffzellenfahrzeuge einen Faktor von 3,5 höher liegen.⁸ Für den Fall, dass die Kosten von Batterie- und Brennstoffzellentechnologie entweder durch bei der Werkstoffverarbeitung beginnende, produktionsbedingte Kosteneinsparungen bei höheren Stückzahlen oder durch neue kostengünstigere Materialien und Technologie sinken, kann der Faktor aber signifikant reduziert werden.

Stationäre Speicher

Im Bereich stationärer Speicher lassen sich drei technische Hauptfunktionen unterscheiden:⁹

- 1 | Der Begriff Batterie wird hier anstelle des korrekteren Begriffs der elektrochemischen Akkumulatoren verwendet.
- 2 | Brennstoffzellen nutzen elektrochemische Energiewandlungsprozesse wie beispielsweise die Erzeugung von Wasser aus Sauerstoff- und Wasserstoffgas. Vereinfachend wird das Konzept hier als Energiespeicher angesehen.
- 3 | Vgl. Schüth/Eichel 2014, S. 31–36.
- 4 | Das Ende der Lebensdauer („State of Health“, SOH) wird dann erreicht, wenn die tatsächliche Kapazität der Batterie unterhalb von achtzig Prozent der ursprünglichen Kapazität fällt.
- 5 | Für das erste Quartal 2015 ist ein signifikanter Verfall des Preises von Lithiumionenbatterien zu beobachten, der allerdings hauptsächlich aus großen Überkapazitäten und weniger aus reduzierten Produktionskosten resultiert.
- 6 | Tarascon/Armand 2001, S. 359–367.
- 7 | Vgl. Zhang 2006, S. 1379–1394.
- 8 | Vgl. McKinsey & Company Inc. 2012.
- 9 | Vgl. Ausfelder et al. 2015, S. 17–89.

- Kurzfristspeicherung (Leistungsspeicher zur Frequenzstabilisierung etc.)
- Mittelfristspeicherung (dezentrale Speicher für Kaltstart, Notfallversorgung, Arbitrage etc.)
- Langfristspeicherung (chemische Speicher zur saisonalen Energiespeicherung)

Für alle drei Funktionen kommen elektrochemische Technologien zum Einsatz. Dabei unterscheiden sich die Anforderungen im Bereich der Kurz- und Mittelfristspeicherung signifikant von denen für Langfristspeicherung. Im ersten Fall ist eine hohe Zykleneffizienz von mindestens 95 Prozent mit moderater Skalierbarkeit der Speicherkapazität notwendig. Im letzten Fall steht die Skalierbarkeit im Vordergrund, wobei die Effizienz der Energieumwandlung unter der Annahme eines verfügbaren Überschusses an speicherbarer Energie aus regenerativer Erzeugung in erster Näherung vernachlässigt wird. Signifikant wird der Bedarf an stationären Speichern ab einem Anteil regenerativ erzeugter Energie von etwa sechzig Prozent¹⁰, sodass für die Materialforschung ein ausreichend großes Zeitfenster verbleibt, bestehende Konzepte und Technologien weiterzuentwickeln, bevor eine entsprechende Speicherinfrastruktur aufgebaut werden muss.

3.3 Horizonte zur Erschließung von Speicheroptionen durch neue Werkstoffe

Elektromobilität

Der Fortschritt im Bereich der Lithiumionenbatterien erfolgt hauptsächlich aufgrund einer Reduktion der über die Lebensdauer einer Batterie integrierten Energiespeicherkosten. Es existieren prinzipiell zwei direkt durch Materialfragestellungen bedingte Ansatzpunkte zur Kostenreduktion. Auf der einen Seite ist dies eine erhöhte Energiedichte¹¹, sodass für eine gegebene Speicherkapazität ein geringeres Bauteilvolumen benötigt wird. Auf der anderen Seite liegt ein großes Potenzial zur Kostenreduktion in der Verwendung alternativer elektrochemischer Konzepte auf Basis häufiger in der Erdkruste vorkommender Metalle („Post-Lithium“)¹², die sich gleichzeitig ohne großen Aufwand prozessieren lassen. In zweiter Linie stehen Entwicklungen der Batterietechnik durch verbesserte Sicherheit und Langlebigkeit unter zyklischer Belastung im Vordergrund. Für

die Produktion von Batteriezellen in Deutschland sind weitere Aspekte relevant.¹³

Stationäre Speicher

Im Bereich der stationären Energiespeicherung für Leistungsanwendungen ist neben der hohen Leistungsdichte für Speicherdauern im Bereich zwischen Millisekunden bis Minuten aufgrund der inhärent hohen Zyklenzahlen die Coulomb'sche Effizienz von besonderer Relevanz. Lithiumionenbatterien stellen derzeit das Batteriekonzept mit den höchsten Leistungsdichten dar, weswegen diese für Leistungsanwendungen ausschließlich infrage kommen.

Dezentrale Speicher für Anwendungen im Bereich Kaltstart, Notfallversorgung, Arbitrage etc. müssen einen Bereich von wenigen Minuten bis zu mehreren Stunden abdecken. Je nach Anwendung spielt hier neben einer hohen Effizienz aufgrund hoher Zyklenzahlen auch die Skalierbarkeit eine Rolle, sodass neben Lithiumionenbatterien auch Hochtemperatur-Natrium-Schwefelbatterien, Redox-Flowbatterien und Metall-Luftbatterien eine Rolle spielen. Hinzu kommt ein erhöhter Kostendruck im Vergleich zur Elektromobilität mit einem Zielwert im Bereich unterhalb von 100 Euro pro Kilowattstunde. Obwohl Redox-Flowbatterien ein Konzept mit vergleichsweise einfacher Skalierbarkeit bieten, schließt die geringe Energiedichte kombiniert mit hohen Kosten für den Elektrolyt eine Anwendung im Bereich dezentraler Speicher aus. Die vielversprechendsten Systeme stellen in diesem Zusammenhang Lithiumionenbatterien und Metall-Luftbatterien dar. Bei den Lithiumionenbatterien kann der Zielkostenwert durch Skaleneffekte beim Herstellungsprozess weiter angenähert werden. Das höchste mittelfristige Innovationspotenzial bieten dagegen Metall-Luftbatterien, da die hohe Energiedichte geringere Kosten im Vergleich zur Lithiumionentechnologie verspricht.¹⁴

Langfristspeicher sollen Zeiträume von mehreren Monaten abdecken (saisonale Energiespeicherung). Dieser Fall zeichnet sich durch geringe Zyklenzahlen aus, erfordert aber eine enorme Skalierbarkeit. Dementsprechend kommen nur Speicherkonzepte mit sehr hoher Energiedichte infrage, wobei chemische Energieträger den elektrochemischen Batteriespeichern hier um Größenordnungen überlegen sind. Im Hinblick auf elektrochemische Technologien nimmt deshalb die Wasserelektrolyse für die Erzeugung von Wasserstoff aus Strom eine Schlüsselfunktion ein.

10 | Vgl. Agora Energiewende 2014.

11 | Vgl. Bruce et al. 2012, S. 19–29.

12 | Vgl. Zhou 2013, S. 2256.

13 | Vgl. Umbach 2016.

14 | Vgl. Girishkumar et al. 2010, S. 2193–2203.



3.4 Fazit

Um die gesteckten Ziele zu erreichen, kommt der Forschung an elektrochemischen Materialien eine Schlüsselrolle zu.¹⁵ Neben maßgeschneiderten Volumeneigenschaften steht die Grenzflächenmodifikation der entsprechenden elektrochemischen Materialien im Fokus der Forschung, da sowohl die Lebensdauer elektrochemischer Bauteile als auch signifikante Anteile an der Bauteilperformance durch Grenzflächenprozesse beeinflusst werden.

Im Folgenden werden die derzeit wichtigsten Entwicklungen auf dem Gebiet der elektrochemischen Energiespeicherung zusammengefasst und der weitergehende Forschungsbedarf aufgeführt.

Weiterentwicklung der Lithiumionenbatterie-Technologie

Die Verbesserung von Energie- und Leistungsdichte sowie der zyklischen Lebensdauer stellt die zentrale Anforderung für die nächste Generation von Lithiumionenbatterien dar. Weitere Anforderungen gelten der Reduktion der Kosten, der Gewährleistung der Sicherheit, der Schnellladefähigkeit und dem End-of-Life-Management. Hauptsächlicher Forschungsbedarf besteht in der Entwicklung geeigneter Aktivmaterialien für Hochenergie- und Hochleistungsanwendungen sowie in der Entwicklung von Elektrodenmaterialien mit reduzierter zyklischer Alterung.

Im Bereich der Materialien für Hochenergiezellen bieten derzeit zwei Forschungsrichtungen eine attraktive Perspektive: Kathoden mit erhöhtem Potenzial der Lithium-(De)Interkalation sowie alternativ Materialien mit erhöhter Kapazität.

Im Bereich der Hochleistungsanwendungen stehen Aktivmaterialien mit gleichzeitig hohen elektronischen und ionischen Leitfähigkeiten im Forschungsfokus. Üblicherweise stellt in diesem Zusammenhang die begrenzte ionische Leitfähigkeit die größte Herausforderung dar. Um diese zu optimieren, sind hauptsächlich zwei Richtungen zu verfolgen: nanostrukturierte Elektrodenmaterialien mit homogenen Eigenschaften – die jedoch vergleichsweise komplizierte und damit teure Syntheseverfahren bedingen – oder mittels einfacher Mischoxidverfahren herstellbare aliovalent dotierte Oxide.

Festkörperbatterien

Nachdem Festkörperelektrolyte mit ausreichend hoher Ionenleitfähigkeit im industriellen Maßstab hergestellt werden können¹⁶, stellt die Entwicklung geeigneter Kompositelektroden den nächsten logischen Schritt im Bereich der Festkörperbatterieforschung dar. In diesem Zusammenhang spielen grundlegende Vorgänge an der Grenzfläche zwischen Elektrolyt, Elektrodenpartikeln und Partikeln zur Verbesserung der elektrischen Leitfähigkeit eine zentrale Rolle. Hauptsächlicher Forschungsbedarf besteht damit in der Entwicklung von geeigneten Materialsystemen und entsprechender Produktionsverfahren für Kompositelektroden, auf deren Basis komplette Festkörperzellen entwickelt werden können.

Post-Lithium-Batterien

Technologisch steht hier die Verbesserung der gravimetrischen und volumetrischen Energiedichte im Mittelpunkt. Aufgrund des vergleichsweise frühen Entwicklungsstadiums der meisten Post-Lithiumtechnologien bestehen außerdem gemeinsame Herausforderungen in Bezug auf Zyklierbarkeit und Effizienz.

Ein erster entscheidender Vorteil von Post-Lithium-Konzepten (mit Ausnahme von Natriumionen-basierten Konzepten) besteht in der vereinfachten Prozessierbarkeit von Materialien geringer Reaktivität mit Feuchtigkeit, wodurch die Herstellungskosten signifikant gesenkt werden können. Der zweite Vorteil gegenüber der Lithiumionentechnologie ist die erhöhte Energiedichte. Mg-Ionenbatterien bieten neben der hohen Ressourcenverfügbarkeit den Vorteil, dass der zugrunde liegende Zweielektronen-Prozess pro Elementarreaktion eine erhöhte Energiedichte trotz größerem Elementargewicht ermöglicht. Für die Mg-Ionentechnologie existiert aber noch gesteigerter Forschungsbedarf sowohl bei geeigneten Interkalationsmaterialien als auch beim Elektrolyten.

Eine weiter erhöhte Energiedichte kann durch Metall-Schwefel (Me-S_8) und Metall-Luftbatterien (Me-O_2) erzielt werden. Im Bereich der Me-S_8 -Batterien muss aber die starke Begrenzung der Lebensdauer aufgrund ungewollter Nebenreaktionen unter Verbrauch des Elektrolyten gelöst werden. Durchaus attraktive Alternativen bestehen im Bereich der Me-O_2 -Batterien¹⁷ auf Basis von Zn, Al, Fe und weiteren Metallen. Aktueller Forschungsbedarf besteht hier hauptsächlich im Bereich der Entwicklung selektiver

15 | Die hier vorgeschlagenen Forschungsansätze fokussieren auf Fragestellungen im Bereich der Materialforschung, ohne dabei ebenfalls relevante Herausforderungen im Bereich anderer Disziplinen, wie beispielsweise der Organischen Chemie (Additive für Flüssigelektrolyte) oder der Verfahrenstechnik (Batteriemanagementsystem), zu negieren.

16 | Vgl. Schott AG 2015.

17 | Im Vergleich dazu ist der Fortschritt auf dem Feld von Li-O_2 -Zellen aufgrund der komplexen Elektrochemie stark begrenzt, da ungewollte Nebenreaktionen zu starken Zersetzungsreaktionen von Elektrolyten und Elektroden führen.

Katalysatoren zur Sauerstoffreduktion und -evolution sowie von 3D-strukturierten Luftkathoden und Metallanoden zur Verbesserung der Ratenfähigkeit.

Elektrolyse und Ko-Elektrolyse

Die Elektrolyse stellt den zentralen Schritt der Power-to-X(P2X)-Technologie, also der Umwandlung von erneuerbar erzeugter Energie in stoffliche Energieträger, dar. Im Gegensatz zu den derzeitigen Anwendungsfeldern von Elektrolyseuren im stationären Betrieb ist der P2X-Betrieb durch eine dynamische Betriebsbelastung (unter anderem Kaltstart) und gegebenenfalls auch einen bidirektionalen Betrieb (bei Rückverstromung) charakterisiert. Hauptsächlicher Forschungsbedarf besteht daher in der Verbesserung von Stromdichte und Langzeitstabilität unter variabler Last durch die Entwicklung von Materialien mit erhöhter ionischer Leitfähigkeit und reduzierter kalendarischer/zyklischer Alterung.

Darüber hinaus beschreibt die Steigerung der Effizienz eine zweite zentrale Herausforderung für die Materialforschung, wobei ein Ansatz die Verbesserung der Aktivität des Sauerstoffreduktions- und -evolutionskatalysators betrifft. Für den speziellen Fall der Niedertemperatur-Elektrolyse ist aus Gründen der Kostensenkung und der Ressourcenverfügbarkeit zusätzlich die Erforschung von edelmetallfreien Katalysatoren eine zentrale Aufgabe.

Bei der Ko-Elektrolyse¹⁸ steht die Bi-Funktionalität, das heißt die gleichzeitige Wasserspaltung und CO₂-Aktivierung im Vordergrund. Ziel hierbei ist es, signifikante Anteile an CO-Gas zu erzeugen, welches in nachfolgenden Prozessschritten weiter stofflich verarbeitet werden kann. Hauptsächlicher Forschungsbedarf besteht momentan in der Entwicklung geeigneter Materialien (bi-funktionaler Katalysatoren) sowie der Untersuchung von Degradationsvorgängen (Hochtemperatur- und -druckbeständigkeit, Langzeitstabilität).

Literatur

Agora Energiewende (Hrsg.): *Stromspeicher in der Energiewende. Untersuchung zum Bedarf an neuen Stromspeichern in Deutschland für den Erzeugungsausgleich, Systemdienstleistungen und im Verteilnetz*, 2014.

Ausfelder F./Schaub G.: „Energiespeicherung als Element einer sicheren Energieversorgung.“ In: KIT (Hrsg.): *Chemie Ingenieur Technik*, 87, 2015, S.17–89.

Bruce, P.G./Freunberger, S.A./Hardwick, L.J./Tarascon, J.M.: „Li-O₂ and Li-S Batteries with High Energy Storage“, In: Nature Publishing Group (Hrsg.): *Nature Materials*, 11, 2012, S. 19–29.

Girishkumar, G./McCloskey B./Luntz, A.C./Swanson, S./Wilcke, W.: „Lithium-Air Battery: Promise and Challenges“. In: ACS Publications (Hrsg.): *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 1: 14, 2010, S. 2193–2203.

Graves, C./Ebbesen, S. D./Mogensen, M.: „Co-Electrolysis of CO₂ and H₂O in Solid Oxide Cells: Performance and Durability“. In: Elsevier (Hrsg.): *Solid State Ionics*, 192, 2011, S. 398–403.

McKinsey & Company Inc. (Hrsg.): *A Portfolio of Power-trains for Europe – a Fact-based Analysis*, 2012.

Schott AG (Hrsg.): *Ionenleitende Glaskeramik mit granatartiger Kristallstruktur*, Patent DE102014100684A1, 2015.

Schüth, F./Eichel, R.A.: „Energiespeicher für die Zukunft“. In: Deutsche Physikalische Gesellschaft (Hrsg.): *Physik Journal*, 13, 2014, S. 31–36.

Umbach, E. (Hrsg.): *Zellproduktion in Deutschland. Eine Betrachtung aus Sicht der Wissenschaft* (acatech MATERIALIEN), München 2016.

Tarascon, J.M./Armand, M.: „Issues and Challenges Facing Rechargeable Lithium Batteries“. In: Nature Publishing Group (Hrsg.): *Nature*, 414, 2001, S. 359–367.

Zhang, S.S.: „A Review on Electrolyte Additives for Lithium-Ion Batteries“. In: Elsevier (Hrsg.): *Journal of Power Sources*, 162, 2006, S. 1379–1394.

Zhou, H.: „New Energy Storage Devices for Post Lithium-Ion Batteries“. In: Royal Society of Chemistry (Hrsg.): *Energy & Environmental Science*, 6, 2013, S. 2256.



4 Werkstoffe für lastflexible Kraftwerke

Matthias Oechsner, TU Darmstadt

Besonderer Dank gilt Herrn Dr. Alfred Scholz sowie den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Kompetenzbereichs Hochtemperaturwerkstoffe am Fachgebiet und Institut für Werkstoffkunde der Technischen Universität Darmstadt.

4.1 Einführung

Im Zuge der Umsetzung der Energiewende sind unter anderem drei Aspekte im Hinblick auf den Betrieb von konventionellen Kraftwerken wichtig: Umwelt/Emissionen, Brennstoffflexibilität und Betriebsflexibilität. Die Energieversorgung umfasst derzeit einen Energiemix mit zunehmendem Einsatz von erneuerbaren Energiequellen (Wind, Sonne, Wasser ...) und einem Rückgang an Kernenergie. Die damit einhergehende diskontinuierliche Einspeisung erfordert eine flexible Fahrweise konventioneller Kraftwerke (beispielsweise kombinierte Gas- und Dampfkraftwerke, GuD). Die Notwendigkeit der Stabilisierung des Versorgungsnetzes und die schnelle Bereitstellung elektrischer Energie zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit resultiert in einer Mehrbelastung der Bauteile und damit der eingesetzten Werkstoffe. Die zusätzlichen An- und Abfahrzyklen sowie die steileren Lastgradienten führen zu einer erhöhten Wechselbeanspruchung und somit zu einem steigenden Ermüdungslebensdauerverbrauch. Dies betrifft insbesondere sogenannte Bestandskraftwerke, für die sich entsprechender Forschungsbedarf ergibt. Aufgrund der Forderung nach verbesserter Flexibilität werden neue Vorgaben für Betrieb und Lebensdauer mit Ziellaufzeiten eher unter 200.000 Stunden veranschlagt, wobei gleichzeitig eine erhöhte Ermüdungsfestigkeit (über 8.000 Starts) gefordert wird.¹

Auf die Nutzung fossiler Energieträger wird jedoch mittelfristig nicht verzichtet werden können. Kurz- und mittelfristig besteht die Forderung, das Potenzial für Flexibilität zu nutzen, während langfristig der Umbau des konventionellen Kraftwerksparks auf hochflexible, spitzenlastfähige Anlagen zu erwarten ist. Daraus lässt sich auch die Forderung nach Brennstoffflexibilität ableiten, um Brennstoffe wie Biomasse und Wasserstoff, aber auch Gas unterschiedlicher Lieferquellen einsetzen zu können.

Ein übergeordnetes Thema betrifft auch die Verbesserung der Effizienz, also konsequenterweise die Erhöhung von Verbrennungstemperaturen beziehungsweise allgemein der Prozessbedingungen bei der Energiewandlung. Dadurch ist ein Beitrag zu der wichtigen Frage der Ressourcenschonung zu erwarten.

Ausgehend von der flexiblen Fahrweise gewinnt das Betriebsverhalten im Teillastbereich zunehmend an Bedeutung, um hier den Wirkungsgrad zu erhöhen und gleichzeitig schädliche Emissionen zu senken. Schließlich ist der Anteil an fixen Kosten zu reduzieren, um die Wettbewerbsfähigkeit fossiler Energiewandlung zu erhöhen.

Insgesamt ergibt sich eine Reihe von Herausforderungen für die Forschung auf dem Gebiet der Werkstoff- und Materialwissenschaften, die nur durch interdisziplinäre Zusammenarbeit (Physik, Chemie, Mathematik, aber auch Ökonomie und Gesellschaftswissenschaften) lösbar erscheinen.²

4.2 Werkstoffseitige Möglichkeiten und Herausforderungen der nächsten zehn Jahre

Neue Werkstoffe für Dampfturbinenanwendungen auf der Basis ferritisch-martensitischer Stähle stellen für den Betrachtungszeitraum der nächsten Dekade eine kostengünstige Lösung für den Einsatz in Dampfturbinen für Anwendungstemperaturen bis 650 Grad Celsius dar. In europäischen Gemeinschaftsprojekten wurden neue Werkstoffe für 600-Grad-Celsius-Dampfturbinenanwendungen entwickelt, bei denen neben Legierungselementen wie Cr, Mo, W, V, Nb, N neue Elemente wie Bor in optimierter Abstimmung mit Stickstoff von großem Einfluss sind. Dadurch ließen sich Karbide vom Typ M₂₃C₆ thermisch stabilisieren, festigkeitssteigernde V- und Nb-Nitride ausbilden und somit höhere Temperatureinsatzgrenzen von Schmiede- und Gusswerkstoffen erzielen. Ausgehend von Kleinschmelzen ist hierbei die Herstellung von bauteilähnlichen Prototypkörpern wichtig, um das Er-schmelzungsverfahren sowie die Umformbarkeit beziehungsweise die Gießbarkeit zu untersuchen. Die Verbesserung der Zeitstandfestigkeit sowie der Oxidationsresistenz sind wesentliche Handlungsfelder, wobei Chromgehalte höher zwölf Gewichtsprozent notwendig sind, um die Oxidationsresistenz zu erhalten. Hohe Chromgehalte fördern aber die Entstehung einer groben Z-Phase, welche die Zeitstandfestigkeit verringert.³ Durch

1 | Vgl. Helbig 2014.

2 | Vgl. Adam et al. 2014.

3 | Vgl. Hald/Danielsen 2010, S. 27-29.

die Zugabe von Nb, Ta sowie Co kann bei hohen Chromgehalten die Bildung von feinverteilter Z-Phase gelingen, welche die festigkeitssteigernde Wirkung von V- und Nb-Nitriden übernimmt und zudem thermodynamisch sehr stabil ist. Die Prozesskette Legierungsentwicklung, Bauteilqualifizierung, Verarbeitungstechnologie und Praxisanwendung stellt eine aktuelle und zukünftige Herausforderung dar, um die Forderungen nach verbesserter Lastwechselflexibilität und thermischer Stabilität der komplexen Legierungen unter Langzeitbeanspruchung zu erforschen.

Während in der Vergangenheit die Forderung von 100 Megapascal (MPa) und 100.000 Stunden Zeitstandfestigkeit als Mindestkriterium bei steigenden Betriebs- beziehungsweise Bauteiltemperaturen das Ziel vorgab, besteht zukünftig darüber hinaus die Forderung nach verbesserter Lastwechselfestigkeit. Neben ferritisch-martensitischen Stählen werden so zukünftig auch vermehrt höherwertigere, austenitische Stähle mit verbesserter Ermüdungsfestigkeit und guten Korrosions- und Oxidationseigenschaften zum Einsatz kommen.

Die in den vergangenen zehn Jahren für die zukunftssträchtige 700-Grad-Celsius-Kraftwerkstechnologie unternommenen Anstrengungen haben zu Erfolgen bei der Qualifizierung von Nickellegierungen und entsprechenden dickwandigen Bauteilen geführt. Derartige Werkstoffe weisen besonders hohe Festigkeiten und einen hohen Korrosions- und Oxidationswiderstand auf. Diese Technologie wird jedoch in Deutschland nicht weiter favorisiert, weshalb die gewonnenen Erkenntnisse genutzt werden sollen, um eine dünnwandige Bauweise unter Einsatz dieser Werkstoffklasse bei niedrigeren Prozesstemperaturen um 600 Grad Celsius zu realisieren und gleichzeitig die Werkstoffbeanspruchung bei sehr hohen Temperaturgradienten deutlich zu verringern.

Hierbei besteht Forschungsbedarf hinsichtlich der Qualifizierung derartiger hochfester Werkstoffe und insbesondere aber auch Verbindungstechnologien. Dies betrifft das Schweißen von ferritisch-martensitischem Stahl mit Nickellegierungen und die Untersuchung des Lastwechselverhaltens solcher Verbindungen. Weiterhin sind Verfahren und Beurteilungskriterien zur Überwachung von Hochtemperaturbauteilen aus neuen Werkstoffen und Werkstoffverbunden zu entwickeln.

Dem Vorteil vergleichsweise niedriger Kosten und der Forderung nach höherer Korrosionsbeständigkeit ferritisch-martensitischer Stähle soll zukünftig mit Oberflächenschutz begegnet werden.

Bei der Entwicklung umweltschonender Gasturbinen für GuD-Kraftwerke wird im Verlauf der nächsten zehn Jahre die Beschichtungstechnologie weiterhin eine zentrale Schlüsselrolle spielen. Daneben ist ein weiteres Ziel, die Kosten zur Herstellung und Wiederinstandsetzung kostenintensiver Bauteile zu reduzieren sowie den Wirkungsgrad durch Anhebung der Gaseintrittstemperaturen in Verbindung mit neuen Design- und Kühlkonzepten zu steigern.

Flexibilität soll bei Gasturbinen durch ein erweitertes Spektrum aus Biomasse generierter sowie hoch-wasserstoffhaltiger Brennstoffe (Power-to-Gas, H₂-Technologie) umgesetzt werden. Dabei sind die Stabilität konventioneller Grundwerkstoffe und Beschichtungssysteme sowie die Risiken durch Oxidation, Korrosion und Erosion zu beachten.

4.3 Horizonte zur Erschließung von Energietechnologien durch neue Werkstoffe

Langfristig werden konventionelle Kraftwerke durch hochflexible spitzenlastfähige Anlagen zu ersetzen sein. Dies wird den Bedarf an entsprechenden Hochtemperaturwerkstoffen mit hinreichendem Verformungsvermögen sowie an Maßnahmen zum Oberflächenschutz für einen hohen Korrosions- und Oxidationswiderstand erhöhen.

Vor dem Hintergrund begrenzter Ressourcen wird die Forschung auf dem Gebiet der Entwicklung neuer Werkstoffe komplexere, gegebenenfalls hybride Werkstoffsysteme erforderlich machen, welche auch den Herstellungsprozess und die entsprechende langzeitige Erprobung erfordern.

Im Hinblick auf die Entwicklung neuer keramischer Wärmedämmschicht (WDS-)Systeme für den Einsatz in stationären Gasturbinen bei verstärkt flexibler Fahrweise und höheren Heißgastemperaturen gilt es eine Reihe von Fragestellungen zu beantworten.^{4,5} Im Hinblick auf schnellere Zyklen und höhere Zyklenzahlen ist es ausschlaggebend, neben entsprechenden Werkstoffsystemen fortschrittliche Herstellungstechnologien für neue Schichtstrukturen zu entwickeln, die gleichzeitig eine hohe Dehnungstoleranz und Sinterstabilität garantieren. Dabei muss insbesondere die robuste und günstige Herstellbarkeit dicker Schichten gegeben sein. Bereits heute in der Entwicklung befindliche Beschichtungsprozesse auf Basis des

4 | Vgl. Clarke et al. 2012, S. 891-898.

5 | Vgl. Mauer et al. 2013.



thermischen Spritzens, wie Suspension-Plasma-Spray (SPS), Plasma-Spray-Physical-Vapour-Deposition (PS-PVD)- und Dense-Vertical-Crack (DVC)-Schichten, müssen weiterentwickelt und für die industrielle Nutzung ertüchtigt werden. Die Schichten besitzen aufgrund ihres Aufbaus eine hohe Dehnungstoleranz und lassen hohe Dicken realisieren. Jedoch besteht weiterer Forschungsbedarf, um zum Beispiel die Sinterstabilität und das Erosionsverhalten sowie die Prozessierbarkeit zu verbessern. In den vergangenen Jahren wurden auch bereits alternative Werkstoffsysteme (etwa Pyrochlore, Perowskite und Aluminate) für den Einsatz als WDS identifiziert, jedoch weisen bisher keine dieser Werkstoffe ein entsprechendes Eigenschaftsprofil auf, das den zu erwartenden Anforderungen gerecht wird.⁶

Ein vielversprechender Lösungsansatz sind Multilagenschichten⁷, bei denen je nach lokaler Anforderung (zum Beispiel hohe Bruchzähigkeit und chemische Kompatibilität an der Grenzfläche zur Haftvermittlerschicht – hohe Phasen- und Sinterstabilität an der Oberfläche zum Heißgas) ein funktionsoptimiertes Schichtmaterial verwendet wird.

Um den zukünftigen Anforderungen an die Grundwerkstoffe gerecht zu werden, wird eine Weiterentwicklung der heute verwendeten Nickelbasis-Superlegierungen benötigt. Neben der Betrachtung der Langzeitstabilität dieser komplexen Werkstoffsysteme muss auch die Entwicklung geeigneter Herstellprozesse adressiert werden. Es ist zu erwarten, dass das Potenzial dieser hochkomplexen Werkstoffsysteme nur dann genutzt werden kann, wenn die Bauteile einem robusten Herstellungsprozess entspringen. Robuste Herstellungsprozesse sowie die Erforschung der Prozess-Eigenschaftsensitivität werden deshalb zentrale Forschungsthemen sein. Als zukunftsweisendes Konzept werden modulare, hybride Werkstoffkonzepte erachtet. Ziel ist es dabei, die einzelnen Bauteilbereiche auf ihre spezifischen Einsatzprofile hin durch die Verwendung lokal funktionsgerechter Werkstoffe zu optimieren. Im Bereich der Hochtemperaturlegierungen sind bereits eine Reihe von Schweiß- und Lötverfahren im Einsatz beziehungsweise in der weiteren Entwicklung.⁸ Wesentliche Herausforderung ist dabei, nicht artgleiche Werkstoffe zu fügen.

Im anvisierten Zeitraum bis 2035/50 werden vermutlich auch Keramiken, insbesondere keramische Faserverbundmaterialien, an Bedeutung gewinnen. Keramiken sind aus heutiger Sicht die einzige Werkstoffklasse, die das Potenzial zur Erreichung der Ziele im Hinblick auf Emissionen, Wirkungsgrad und Leistung aufweisen. Allerdings sind sie mit einem hohen Forschungsbedarf in Bezug auf Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Reparaturfähigkeit und Kosten verbunden. Die Forschungsbedarfe für Keramiken betreffen Prozess- und Betriebskompatibilität für Komposit- und Hybridkomponenten, die Entwicklung leistungsfähiger und kostengünstiger Keramikfasern für Ceramic Matrix Composites (CMC), selbstheilende Keramiken sowie die insbesondere bei nicht-oxidischen Keramiken zwingend notwendigen Oxidationsschutzschichten (Environmental Barrier Coatings). Ferner existiert für diese Werkstoffklasse dringender Forschungsbedarf im Hinblick auf Fügetechnologien für hybride Komponenten sowie im Hinblick auf Werkstoffcharakterisierung, Modellierung und Simulation. Den Herausforderungen an Hochtemperaturbauteilen im flexiblen Betrieb wird nur mit leistungsfähigen Berechnungsmodellen zu begegnen sein, bei denen der Simulation speziell auch mikrostruktureller Änderungen des Gefügezustands eine immer größere Bedeutung zukommt. Nur wenn die Simulation in die Entwicklungsketten von Werkstoffentwicklung, Bauteildesign, Bauteilbetrieb und Bauteilüberwachung konsequent einbezogen ist, lassen sich Entwicklungszeiten verkürzen und ein Beitrag zur Realisierung neuer Werkstoff- und Bauteilkonzepte liefern. Werkzeuge und Modelle zur ganzheitlichen Werkstoff- und Bauteilsimulation⁹ sowie ein verbessertes Verständnis der Degradationsmechanismen und der Lebensdauervorhersage sind für den erfolgreichen Einsatz zukünftiger Werkstoffsysteme essenziell.

4.4 Fazit

Werkstoffsysteme stellen eine Schlüsseltechnologie zur Entwicklung lastflexibler Kraftwerke dar. Ausgehend von den sich ändernden Randbedingungen weisen die aufgezeigten Ansätze zur Entwicklung von Werkstoffen und insbesondere von Werkstoffverbunden sowie hybriden Systemen unter verstärkter Nutzung von Simulationstechniken das Potenzial zur Erfüllung der Anforderungen in puncto Flexibilität und Effizienzsteigerung auf.

6 | Vgl. Leckie et al. 2005, S. 3281–3292.

7 | Vgl. Stamm et al. 2013.

8 | Vgl. Frommher et al. 2014.

9 | Vgl. Hueggenber et al. 2015. S. 1–11.

Literatur

- Adam B.M./Ebeida, M.S./Eldred, M.S./Jakeman, J.D./Swiler, L.P.: „Dakota, A Multilevel Parallel Object-Oriented Framework for Design Optimization, Parameter Estimation, Uncertainty, Quantification, and Sensitivity Analysis: Version 5.4 Developers Manual“. In: Sandia National Laboratories (Hrsg.): *Technical Report SAND2010-2185*, Livermore, 2014.
- Clarke, D.R./Oechsner, M./Padture, N.P.: „Thermal-barrier Coatings for More Efficient Gas-turbine Engines“. In: Cambridge Core (Hrsg.): *MRS BULLETIN*, 37, 2012, S. 891-898.
- Frommher, M./Scholz, A./Oechsner, M.: „Influence of Process Parameters and Joint Design on Microstructure and High Temperature Properties of Diffusion Brazed Joints“. In: *10th Liege-Conf. on Materials for Advanced Power Engineering* (Liège, 14.-17.09.2014).
- Hald J./Danielsen H.K.: „Influence of Z-phase on Long-Term Creep Stability of Martensitic 9-12%Cr Steels“. In: *9th Liège Conf. on Materials for Advanced Power Engineering* (Liège, September 2010), 2010, S. 27-29.
- Helbig, K.: „Lebensdauermanagement von Kraftwerken im Kontext zukünftiger flexiblerer Betriebsweisen“. In: VGB (Hrsg.): *VGB Workshop Kraftwerksflexibilisierung* (Velen, 23./24.09.2014).
- Hueggenber, D./Speicher, M./Klenk, A./Zickler, A./Schwienheer, M./Wang, Y./Schmitt, P./Oechsner, M./Osterlin, H./Maier, G./Nieweg, B.: „Hochtemperatur-Werkstoffteststrecke – HWT II begleitende experimentelle und numerische Untersuchungen an Werkstoffen und Komponenten“. In: VGB PowerTech e.V. (Hrsg.): *VGB PowerTech*, 8, 2015, S. 1-11.
- Leckie, R./Krämer, S./Rühle, M./Levi, S.: „Thermochemical Compatibility between Alumina and ZrO₂-GdO_{3/2} Thermal Barrier Coatings“. In: Acta Materialia Inc. (Hrsg.): *Acta materialia*, 3: 11, 2005, S. 3281-3292.
- Mauer, G./Jarligo, M.O./Mack, D.E./Vaßen, R.: „Plasma Sprayed Thermal Barrier Coatings: New Materials, Processing Issues and Solutions“. In: *Special Issue Journal of Thermal Spray Technology*, 22: 5, 2013.
- Stamm, W./Bakan, E./Vaßen, R./Frommherz, M./Scholz, A./Oechsner, M./Rudolphi, M./Schütze, M.: „Gadoliniumzirkonate: A Thermal Barrier Coating of Newest Generation“. In: *10th Liege-Conf. on Materials for Advanced Power Engineering* (Liège, 14.-17.09.2014).



5 Rolle der Leichtbauwerkstoffe in der Energietechnik

Frank Henning, Kay A. Weidenmann, Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie

5.1 Einführung

Betrachtet man den Gesamtenergiebedarf moderner Industriegesellschaften, so ist festzustellen, dass nur rund achtzig Prozent des Energiebedarfes für die Strom- und Wärmeversorgung sowie in Industrie und Haushalt genutzt wird. Rund zwanzig Prozent des Energiebedarfes fließt direkt in den Transportsektor. Damit werden nur rund achtzig Prozent der Energie stationär gewandelt, zwanzig Prozent der Energiewandlung findet direkt in Fahrzeugen statt. Mit der zunehmenden Entwicklung von Elektrofahrzeugen wird sich dieser Anteil zumindest in den Industrieländern verschieben – jedoch muss weiterhin generell zwischen stationärer und instationärer Energiewandlung unterschieden werden. Dieser Unterschied ist besonders leichtbaurelevant, da der Leichtbau naturgemäß bei der Reduktion bewegter Massen einen höheren Impact als bei statischen Massen hat. Dementsprechend ist Leichtbau bei stationärer Energiewandlung besonders für bewegte Teile relevant, bei instationärer Energiewandlung jedoch für das Gesamtsystem an sich. Leichtbau ist dabei per Definition die ganzheitliche Umsetzung einer Entwicklungsstrategie, die darauf ausgerichtet ist, unter vorgegebenen technischen, ökonomischen, ökologischen und gesellschaftlichen Randbedingungen die geforderte Funktion durch ein System minimaler Masse unter Gewährleistung der Systemzuverlässigkeit zu realisieren. Damit hat der Leichtbau viele Aspekte (Design, Werkstoffe, Fertigung ...), die meistens nicht voneinander zu trennen sind. Leichtbau ist ein ganzheitlicher Ansatz, bei dem der Werkstoff nur ein, allerdings ein wesentlicher Aspekt ist. Im Folgenden soll jedoch eine Fokussierung auf werkstoffliche Aspekte stattfinden. Leichtbauwerkstoffe sind vor allem die strukturell genutzten Leichtmetalle wie Titan, Aluminium, Magnesium und deren Legierungen, aber auch die hoch- und höchstfesten Stähle sowie aufgrund ihrer herausragenden spezifischen Eigenschaften die Verbundwerkstoffe. Bei den letzteren besitzen besonders die stark wachsenden Faserkunststoffverbunde eine hohe technische Relevanz für den Energiesektor.

Ein Beispiel für den verstärkten Einsatz von zum Beispiel Faser-verbundkunststoffen in der stationären Energiewandlung findet sich in der Windenergie, trotzdem ist dieser Sektor mit einem Gesamtumsatzvolumen von rund zwanzig Milliarden Euro eher umsatzschwach im Vergleich zum gesamten Transportfahrzeugsektor mit rund 140 Milliarden Euro. Ein verstärktes Wachstum des stationären Energiewandlungssektors ist erst ab 2020 zu erwarten – bis dahin entspricht das Wachstum des Leichtbaumarkts im Wesentlichen dem Wachstum des Transportsektors mit rund sieben bis acht Prozent jährlich.

5.2 Werkstoffseitige Möglichkeiten und Herausforderungen der nächsten zehn Jahre

Im folgenden Jahrzehnt ist im Bereich der stationären Energiewandlung noch nicht von einer leichtbaugetriebenen Evolution auszugehen. Eine Ausnahme stellt hierbei sicherlich die Windkraft dar, bei der immer größere Anlagen auch leichtere Komponenten erfordern, um die Montagefähigkeit zu erhalten und die Aufwände im Bereich der Bautechnik (Fundamentierung) nicht weiter steigen zu lassen. Jedoch ist hier eine wesentliche Herausforderung weniger die Erweiterung der Materialpalette als die Möglichkeit einer effizienten Produktion. Dies wird insbesondere dann relevant, wenn portable Energiewandler angesprochen werden: Kleinstkraftwerke, die zum Beispiel in Entwicklungsländern ohne fossile Brennstoffe Strom erzeugen. Dort ist eher von größeren Serien auszugehen.

Generell zu lösende materialseitige Probleme sind dabei vor allem jene, die mit dem Langzeiteinsatz von Faserkunststoffverbunden verknüpft sind. Diese Werkstoffe wurden erst in den vergangenen Jahrzehnten verstärkt als hochbelastete Strukturbauteile eingesetzt. Bis auf wenige Ausnahmen, etwa im Luftfahrtsektor, existiert bislang ein geringes Werkstoffverständnis bezüglich des Langzeitverhaltens dieser Materialien. Dazu gehören vor allem Aspekte des Ermüdungsverhaltens, der chemischen und physikalischen Alterung und der Witterungs- und Korrosionsbeständigkeit. Dieser Komplex beinhaltet natürlich vornehmlich die Frage nach der Degradation der mechanischen Eigenschaften und die Aufklärung auftretender Grenzflächenphänomene. Betrachtet man den kompletten Lebenszyklus, dann stellt sich auch die Frage nach der Demontage- und damit der Rezyklierfähigkeit von Großstrukturen, wie zum Beispiel Windkraftwerken.

Neben der Windkraft ist die Solarenergie sowie die Solarthermie in den nächsten Jahren ein wachsendes Feld. Trotz fehlender bewegter Massen bei der Energiewandlung stellen sich auch hier Fragen nach der Gewichtsreduktion: Gerade bei der Installation von Solarmodulen auf älteren Gebäuden sind die Dachkonstruktionen häufig nicht auf hohe Zusatzlasten ausgelegt. Hier muss künftig eine höhere Leistungsdichte pro Flächengewicht erreicht werden. Nicht alleine durch effizientere Energiewandlung, sondern auch durch intelligente Anlagenkonzepte. Ein Stichwort ist dabei die Funktionsintegration, aber auch Fragen nach der Wärmeleitung und dem Wärmeübergang sowie thermische Spannungen spielen hier eine große Rolle. Letzteres ist eine Thematik, die besonders bei hybriden Materialsystemen adressiert werden muss.

Im Bereich der mobilen Energiewandlung, zum Beispiel bei Fahrzeugen, ist der Leichtbauaspekt, wie ausgeführt, relevanter. Elektrische Antriebe besitzen den generellen Nachteil, dass die Energiespeicher an Bord eine im Vergleich zu fossilen Energieträgern geringe Energiedichte besitzen. Die Steigerung der Leistungsfähigkeit ist im Bereich der Elektromobilität auf Systemlevel eng mit Aspekten des Leichtbaus im Hinblick auf die Speicherperipherie, Antriebskonzepte und das Fahrzeugdesign verknüpft. Zudem können Schwungradspeicher aus CFK hohe Energien kurzfristig speichern und diese dann kontrolliert wieder in Systeme abgeben. Dies kann zur Rekuperation von Bremsenergie genutzt werden, aber auch Antriebsenergie kann so für kurze Zeit zur Verfügung gestellt werden.

Auch für den instationären Sektor ergeben sich ähnliche Fragestellungen wie die oben genannten, die daher hier nicht nochmals aufgeführt werden müssen. Zusätzlich muss hier aber noch betont werden, dass die Großserientauglichkeit für diesen Anwendungsbereich ein äußerst relevanter Faktor ist, der zusätzlich eine enge Verknüpfung zwischen fertigungs- und werkstofftechnischen Fragestellungen mit sich bringt – sind doch gerade Verbundwerkstoffe hinsichtlich ihrer Eigenschaften durch den Fertigungsprozess besonders bestimmt. Doch auch konventionelle Leichtbauwerkstoffe wie Aluminium, Titan, Magnesium oder hochfeste Stähle weisen noch großen Entwicklungsbedarf auf: Hierzu gehört zum Beispiel die Steigerung der Hochtemperatur- und Kriechbeständigkeit für den Turbinen- und Motorenbau. Dabei werden mit der Steigerung der Umdrehungszahl und der Verbrennungstemperatur gleich zwei Stellschrauben der Effizienz bedient. Hier könnte die Weiterentwicklung von leichten, intermetallischen Verbindungen (TiAl), von korrosions- und kriechbeständigen Aluminiumlegierungen oder Metallmatrixverbundwerkstoffen Wesentliches beitragen.

Fragen der Ressourcenverfügbarkeit stellen sich bei den konventionellen Metallen kaum. Sicherlich besteht noch Handlungsbedarf bei der gleichwertigen Wiederverwertung, zum Beispiel bei Aluminiumlegierungen. Mit einer immer komplexer werdenden Metallurgie weitet sich dieses Problem aber künftig noch aus. Um es einzudämmen, kann die Forschung wesentliche Beiträge leisten. Dabei darf nicht außer Acht gelassen werden, dass gerade Titan, Aluminium und Magnesium bereits bei der Gewinnung einen hohen Energieeinsatz erfordern, der hinsichtlich der Ressourcenschonung nicht ausgeblendet werden sollte.

Im Bereich der Faserkunststoffverbunde stellt sich neben der Frage des Recyclings – und dabei besonders im Fall der Rückgewinnung einer möglichst hochwertigen Verstärkungsfasers – auch die Frage nach der Nachhaltigkeit der Matrixmaterialien, die heute primär erdölbasiert sind. Auch hier müssen weitere Anstrengungen unternommen werden, um Kunststoffe zu entwickeln, die einerseits nachhaltig sind und andererseits nicht in Konkurrenz zur Nahrungskette stehen, sofern es sich um sogenannte biobasierte Kunststoffe handelt.

5.3 Horizonte zur Erschließung von Energietechnologien durch neue Werkstoffe

Schon heute sind viele der angesprochenen Werkstoffkonzepte weit in ihrer Entwicklung vorangeschritten, ohne dass sie verbreitete Anwendung finden. Eine rein werkstoffliche Betrachtung greift daher zu kurz, es müssen auch marktrelevante Barrieren identifiziert und durch weitere Forschungsaktivitäten überwunden werden. Dies erfordert künftig ganzheitliche, interdisziplinäre Entwicklungsansätze in Ergänzung zu der rein werkstoffkundlichen Durchdringung der aufgeworfenen Fragestellungen. Darüber hinaus müssen die Grenzen zwischen den Werkstoffhauptgruppen stärker durchdrungen beziehungsweise aufgelöst werden. Damit ist nicht alleine der Weg zum Multimaterial-Design gemeint, sondern auch die Ausweitung der Eigenschaftsgrenzen der Werkstoffhauptgruppen sowie die Überwindung der Grenzen von Struktur- und Funktionswerkstoff hin zum funktionsintegrierten Leichtbau.

Wesentliche Beiträge des Leichtbaus bestehen in der Effizienzsteigerung vorhandener Systeme und Konzepte oder auch in der weiteren Entwicklung von instationären oder stationären Energiewandlungssystemen. Neben dem genannten Beispiel des Schwungradspeichers und den leistungsfähigeren Hochtemperaturwerkstoffen können diese auch Werkstoffsysteme sein, die



den Energietransport effizienter gestalten helfen. Schon heute sind Hybridstromkabel auf Basis von faserverstärktem Aluminium im Einsatz. Auch hier zeigt sich eine deutliche Effizienzsteigerung durch ein hybrides Werkstoffkonzept.

5.4 Fazit

Abschließend lässt sich festhalten, dass der Leichtbau ganzheitlich gesehen künftig an mehreren Stellen eine wichtige Rolle bei der Energiewandlung und beim Energietransport spielen kann, ohne jedoch per se eine „enabling technology“ zu sein. Leichtbau kann per Definition nicht nur auf der Werkstoffebene betrachtet werden, sondern bedarf eines interdisziplinären Ansatzes – in engem Kontext mit den entsprechenden Fertigungsverfahren, dem Design und der Konstruktion sowie den erforderlichen Methoden zur Realisierung eines effizienten Produkts. Insgesamt wird der Leichtbau durch Steigerung einer Systemeffizienz und durch Funktionsintegration zur Ressourcenschonung wichtige Beiträge leisten, indem er vor allem hilft, den Energieverbrauch zu senken.

Es ist festzuhalten, dass die ferne Zukunft des Leichtbaus nicht nur in der Optimierung des Werkstoffs auf die Anwendung hin besteht, sondern die multimaterielle Abstimmung auf einem wirtschaftlichen Gesamtkonzept beruhen muss.

Langfristig stehen Möglichkeiten der hybriden Produktgestaltung mit zusätzlichen Potenzialen einer werkstoffgerechten hybriden Konstruktion, die eine ganzheitliche Topologieoptimierung und damit neue Möglichkeiten des funktionsintegrierten

Leichtbaus erschließen, im wissenschaftlichen Fokus. Hierbei ist das Know-how der hybriden Produktgestaltung im Zusammenhang mit der Werkstoff- und Produktionsoptimierung zwingend notwendig, um die Basis für zukünftige Produkte zu schaffen und um an den angegebenen Wachstumsraten überproportional zu profitieren.

Literatur

Harris, B. (Hrsg.): *Fatigue in Composites*, CRC Press, 2003.

Karkosch, H.-J.: „Funktionsintegrierter Leichtbau für Fahrzeugstrukturen“. In: M. Möller (Hrsg.): *Handbuch Konstruktionswerkstoffe*, München: Hanser Verlag 2014.

McKinsey & Company Inc. (Hrsg.): *The Road to 2020 and Beyond: What's Driving the Global Automotive Industry?*, 2013.

Metz, B./Davidson, O.R./Bosch, P.R./Dave, R./Meyer L.A. (Hrsg.): *Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Kapitel 1, S. 14, Kapitel 5, S. 7, 2007.

Möller, M./Henning F. (Hrsg.): *Handbuch Leichtbau*, München: Hanser Verlag 2011.

Schmidt, M.: *Neue Technologien für dezentrale Stromspeicher*, 2013. URL: www.cleanthinking.de/wochenserie-stromspeicher-schwungradspeicher-von-rotokinetikund-beacon-power [Stand: 14.11.2016].

6 Polymerwerkstoffe für Energieeffizienz und regenerative Energie/Stoff-Technologien

Reinhold W. Lang, Institute of Polymeric Materials and Testing, Johannes Kepler Universität (JKU) Linz

Besonderer Dank gilt V. Altstädt (Universität Bayreuth), G. Knör (JKU Linz), A. Rinderhofer (LUMITECH GmbH, Jennersdorf), N. S. Sariciftci (JKU Linz), M. Scharber (JKU Linz), A. Schlarb (TU Kaiserslautern), P. Schöffl (OMV, Wien) und G. M. Waller (JKU Linz).

6.1 Einführung

Im Kontext der anstehenden Transformation des globalen Energiesystems und künftiger Energietechnologien weisen synthetische Polymerwerkstoffe als jüngste Gruppe unter den großen Werkstoffklassen ein besonderes Innovations-, Wachstums- und Marktdurchdringungspotenzial auf. Zu den wesentlichen Erfolgsfaktoren der industriell-wirtschaftlichen Entwicklung von Polymerwerkstoffen (die etwa Mitte des letzten Jahrhunderts einsetzte) und damit für ihre heutige gesellschaftliche Bedeutung, zählen

- Werkstoffeigenschaften und multifunktionale Werkstoffeigenschaftenprofile, die in weiten Grenzen variiert und auf spezifische Anforderungen maßgeschneidert werden können,
- eine effiziente, hochflexible Verarbeitbarkeit zu Bauteilen, gepaart mit hoher Designfreiheit und außerordentlichen Möglichkeiten der Funktionsintegration, und
- die gute Wirtschaftlichkeit durch ressourcenschonende Herstellung, Verarbeitung und Anwendung, gekoppelt mit einer hohen, regionalen und globalen Wachstumsfähigkeit.

Es sind diese speziellen Merkmale und Charakteristika sowie die Tatsache, dass viele der bereits bestehenden Märkte und Einsatzbereiche von Polymerwerkstoffen von erheblicher energetischer Bedeutung sind, aus denen sich die besondere Rolle von Polymerwerkstoffen beim Umbau des Energiesystems ableitet. Zudem waren und sind synthetische Polymerwerkstoffe über

ihre Kohlenwasserstoff-Rohstoffbasis von Beginn an nicht nur energetisch, sondern auch stofflich eng verknüpft mit den gegenwärtig dominierenden fossilen Primärrohstoffen (Öl, Gas, Kohle) des Energiesystems. Bezüglich der Rolle von Polymerwerkstoffen in einem künftigen Energiesystem leiten sich daraus drei Themenbereiche beziehungsweise Fragestellungen von vorrangiger Bedeutung ab:

- Welche Beiträge können Polymerwerkstoffe für eine deutlich gesteigerte Energieeffizienz im Bereich von bestehenden und künftigen Produkten und deren Funktionen/Services leisten?
- Welche Beiträge können Polymerwerkstoffe in den wachsenden und neuen Märkten für erneuerbare Energietechnologien (insbesondere Sonne und Wind, aber auch Wasser, Geothermie usw.) leisten?
- Welche Rolle spielen Polymerwerkstoffe in einer künftigen Kreislaufwirtschaft (Circular Economy) mit kaskadischen und erneuerbaren/regenerativen Energie/Stoff-Nutzungsketten mit stark erhöhten energetischen Wirkungsgraden beziehungsweise stofflichen Regenerationsraten?

6.2 Werkstoffseitige Möglichkeiten und Herausforderungen der nächsten zehn Jahre

Energieeffizienz

Zur umfassenden ökologischen Bewertung der durch werkstoffliche Produkte erbrachten Funktionen und Services gibt es in der Literatur und mittlerweile auch in Lehrbuchform für die akademische Werkstoffausbildung eine Reihe von Ansätzen und Methoden mit zugehörigen Software-Werkzeugen für eine sogenannte Lebenszyklusanalyse (Life Cycle Analysis, LCA).¹ Diese erlauben auch quantitative Rückschlüsse bezüglich einer energetischen Bewertung von Produkten (funktionsbezogener Gesamtlebenszyklus-Energiebedarf) und der zugehörigen Treibhauswirksamkeit über CO₂-Emissionen.

In einer von PlasticsEurope beauftragten Studie wurde anhand repräsentativer Produktfallbeispiele aufgezeigt, dass Kunststoffprodukte im Vergleich zu alternativen Werkstofflösungen für äquivalente Funktionen schon heute einen erheblichen Beitrag zur Energieeffizienz und zur Reduktion von CO₂-Emissionen leisten.² Dies obwohl Energieeffizienz und Treibhauswirksamkeit in der Entwicklung der meisten kommerziellen Kunststoffprodukte aus einer Gesamtlebenszyklusbetrachtung bis heute nicht wirklich im

1 | Vgl. Ashby 2013.

2 | Vgl. Pilz et al. 2010.



Fokus waren und sind. Anders ausgedrückt, bei umfassender technischer, ökonomischer und ökologischer Betrachtung des gesamten Produktlebenszyklus sind für viele Anwendungsbereiche von Kunststoffen noch erhebliche zusätzliche energetische Einsparungspotenziale realisierbar. Damit leitet sich für den Bereich Energieeffizienz unmittelbar folgender Forschungsbedarf ab:

- Weiterentwicklung von LCA-Methoden/Werkzeugen für eine integrierte, funktionsorientierte energetische Gesamtlebenszyklusanalyse (Herstellung, Nutzung, Wiederverwertung/Entsorgung), die als „easy-to-use tools“ anwendungsspezifisch und über geeignete Sensitivitätsanalysen das Aufspüren weiterer Optimierungspotenziale für Werkstoffeigenschaftenprofile mit besonderer Hebelwirkung auf den Produktlebenszyklus-Gesamtenergiebedarf und CO₂-Ausstoß erlauben.
- Nutzung derartiger LCA-Tools zur systematischen Erschließung der werkstoffenergetischen Optimierungspotenziale und damit zur kontinuierlichen und signifikanten Steigerung der LCA-Energieeffizienz für die nächste Generation von Produkten aus Polymerwerkstoffen durch wissenschaftsgetriebene Forschung basierend auf fortschrittlichen Zusammenhängen („material synthesis-structure-property-processing-performance & product re-utilization (ms²p³&pru)“).

Aufgrund der niedrigen Dichte und des damit inhärenten Leichtbaupotenzials von Polymerwerkstoffen wird mit zunehmender Energieeffizienz-Orientierung die Einteilung der derzeitigen auch für Polymere üblichen Werkstoffklassifizierung in Strukturwerkstoffe, bei denen die mechanischen Eigenschaften einsatzbestimmend sind, und in Funktionswerkstoffe, bei denen die nicht-mechanischen Eigenschaften einsatzbestimmend sind, zunehmend unschärfer und in Richtung stärkerer, auch systemischer Multifunktionalität verschwinden. So sind durch neue multifunktionale Polymerwerkstoffe mit komplexeren molekularen und morphologisch-hierarchischen Strukturen erhebliche weitere Energieeffizienz-Verbesserungen zu erwarten. Wie bei nahezu allen Polymeranwendungen gilt es auch hier, durch gezielte und systematische Werkstoffforschung das Energieeffizienz-Potenzial über gesteigerte Multifunktionalität weiter auszureizen. Beispielfolgend angeführt werden können:

- Polymer-Nanocomposites, bei denen durch Einbringung anorganischer oder organischer Partikel/Additive unterschiedlichster Geometrien im Nano-Skalenbereich in eine Polymermatrix völlig neuartige Eigenschaftsprofile ermöglicht werden. Dazu gehören neue Kombinationen mechanischer Eigenschaften (zum Beispiel Modul, Festigkeit, Zähigkeit,

Reibung/Verschleiß) und nicht-mechanischer Eigenschaften (zum Beispiel optische, elektrische, thermische, magnetische Eigenschaften inklusive selektive Strahlungs- und Stofftransfer-Eigenschaften) sowie ein gegebenenfalls gleichzeitig erweiterter Einsatztemperaturbereich, eine erhöhte Medienbeständigkeit und ein verbesserter Flammenschutz

- Polymere Partikelschäume als Kernwerkstoff im Sandwich-Leichtbau, für innovative Verpackungen und für moderne Wärmedämmsysteme. Die Materialien können energieeffizient ohne Heißdampf zu komplexen Geometrien geformt und in vielfältige Anwendungsgebiete übertragen werden
- Polymere Optikwerkstoffe für die gezielte Lichtleitung/-lenkung unter Minimierung der Lichtverluste sowie für Diffusor-Anwendungen mit hoher Wirkeffizienz (hohe Transmission und Diffusorwirkung)
- Polymere Einkapselungsmaterialien für opto-elektronische Bauteile wie LEDs/OLEDs mit besserer Energieeffizienz und Performance; Optimierung photometrischer Eigenschaften, des Wärmetransports, der Barrierewirkung und des Zeitstandverhaltens (Reduzierung der Degradation)
- Thermoplastische Substratmaterialien für Leiterplatten mit gleichwertiger beziehungsweise verbesserter elektrischer und thermischer Performance und inhärentem Brandschutz bei gleichzeitiger Energieeinsparung im Herstellprozess sowie verbesserter Rezyklierbarkeit.

Erneuerbare Energietechnologien

Die oben gelisteten Erfolgsfaktoren und Merkmale von Polymerwerkstoffen für traditionelle Märkte gilt es auch für die neuen Märkte erneuerbarer Energietechnologien zu nutzen und diese durch Werkstoffforschung voranzutreiben.³ Dies wird in der Folge anhand von Beispielen für die Bereiche Solarthermie, Photovoltaik und Windkraft aufgezeigt.

Für die Solarthermie (etwa dreißig Prozent des Endenergiebedarfs weltweit entfallen auf Niedertemperatur-Wärme) sind aus der Perspektive der Polymerwerkstoffforschung folgende Themen von besonderer Relevanz:⁴

- Entwicklung von Polyolefin-Compounds (PE-, PP-basierend) für thermische Absorber und Speicher mit einer Langzeit-Temperaturbeständigkeit unter den jeweils relevanten Betriebs- und Umgebungsbedingungen (solare Einstrahlung und Wetterbeständigkeit; Medieneinwirkungen wie Frostschutzmittelhaltiges und/oder chloriertes Wasser usw.) von über zwanzig Jahren. Als Forschungsziel kann eine Anhebung der Dauergebrauchstemperatur unter

3 | Vgl. Lang 2013, S. 70-73.

4 | Vgl. Lang et al. 2013, S. 1-13, S. 7-11.

Betriebsbedingungen von derzeit etwa siebzig bis 75 auf 95 Grad Celsius definiert werden.

- Entwicklung von neuen Compounds aus technischen Kunststoffen mit einer Dauergebrauchstemperatur unter Betriebsbedingungen von zumindest 135 Grad Celsius und im Vergleich zu existierenden kommerziellen Produkten halben Kosten/Preisen.

Im Bereich Windkraft liegt der Polymerfokus bei Rotorblättern, die für moderne Windenergieanlagen ausnahmslos aus Polymermatrix/Faser-Verbundwerkstoffen gefertigt werden. Für die Polymerwerkstoffforschung sind künftig unter anderem folgende Themenbereiche von Interesse:

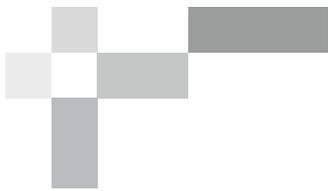
- Verbesserte Regelwerke und Werkzeuge zur Modellierung, Simulation und Absicherung (Nachweisführung, Qualifikation) des Langzeit-Ermüdungsverhaltens der eingesetzten Hochleistungs-Verbundwerkstoffe unter Betriebsbedingungen (on-shore, off-shore) inklusive der Bereitstellung von geeigneten Werkstoffmodellen und Versagenskriterien, (beschleunigter) Prüfkonzepte und der erforderlichen Werkstoffgesetze (Kennwerte und Kennwertfunktionen)
- Kostenreduzierungen bei den derzeit etablierten Materialsystemen für Rotorblätter (vorwiegend Epoxidharz-Matrices) durch Ökonomisierung/Automatisierung der Fertigungsprozesse mit entsprechender Anpassung der Materialsysteme. Neue Matrixwerkstoffe auf Polyurethanbasis mit im Vergleich zu Epoxidharzsystemen erhöhter Leistungsfähigkeit bei gleichzeitig geringeren Kosten durch automatisierte Fertigungsprozesse. Neue Polymerschäume für diese Prozessautomatisierung
- Polymerlacksysteme für Rotorblätter mit verbesserter Witterungs- und Langzeitbeständigkeit

Zur Realisierung weiterer Kostenreduktionen und zur Aufrechterhaltung hoher Wachstumsraten besteht eine wesentliche technologische Herausforderung in der Photovoltaik (PV) im Einsatz neuartiger Materialien für die PV-Zelleneinkapselung und in zugehörigen Verfahren zur Produktion von PV-Modulen. Dies gilt sowohl für die derzeit marktdominierende Si-basierende (SiPV) als auch für die aufstrebende organische Photovoltaik (oPV). Zu erwarten ist, dass diese werkstofflichen und verfahrenstechnischen Innovationen vielfältiger gestaltbare, architektonisch attraktive und multifunktional in beliebige Oberflächen integrierbare Modul-Designs ermöglichen, die auch neue Impulse für die Modulfertigung in Europa bewirken. Daraus leiten sich unter anderem folgende werkstoffrelevante Forschungsfelder für Polymere ab:

- Polymerwissenschaftlich fundierte Definition quantitativer Leistungsanforderungen und zugehöriger Prüfmethode für polymere Einkapselungsmaterialien für starre und flexible PV-Zellen; umfassende Definition von Soll-Eigenschaftsprofilen; Entwicklung von Prüf- und Analysemethoden zur Charakterisierung relevanter Performance- und Barriere-Eigenschaften (Sauerstoff, Feuchte/Wasserdampf) inklusive der Alterung von Einkapselungsmaterialien auf Probekörper-ebene (Werkstoffebene) und PV-Modulebene
- Entwicklung von polymerwissenschaftlich fundierten Konzepten und Modellen zur Lebensdauerabschätzung von PV-Modulen, deren Leistungsfähigkeit stark von Alterungsvorgängen in den polymeren Einkapselungsmaterialien abhängt (jeweils für SiPV- und oPV-Modulen)
- Entwicklung neuartiger kostengünstiger, thermoplastischer Elastomer-Einbettfolien (zum Beispiel Polyolefin-basierend) als Ersatz von EVA, dem derzeit dominierenden Einbettmaterial in SiPV-Modulen, das bei 130 bis 140 Grad Celsius über etwa zwölf bis 15 Minuten (beziehungsweise teilweise bis zu dreißig Minuten) peroxidisch gehärtet wird und damit bestimmend für die Verarbeitungszeit und -kosten bei der Modulfertigung ist; verbesserte Performance und Verarbeitbarkeit (von diskontinuierlichen zu kontinuierlichen Prozessen)
- Kostengünstige Anpassung der Rückseiten- und Frontseitenfolien auf (neue) thermoplastische Elastomer-Einbettfolien bei gleichzeitiger Verbesserung der Modul-Performancewerte (jeweils für starre, semi-flexible oder flexible SiPV- und oPV-Module).

6.3 Horizonte zur Erschließung von Energietechnologien durch Polymerwerkstoffe

Von zentraler Bedeutung für die rasche Transformation des Energiesystems und die damit einhergehenden technologischen Veränderungen inklusive der damit verbundenen Rolle von Werkstoffen ist das Aufspüren und Ableiten von umfassenden und detaillierten Werkstoffanforderungsprofilen mit besonderer Hebelwirkung auf Energieeffizienz beziehungsweise das Marktwachstumspotenzial von erneuerbaren Energietechnologien bei gesamtsystemischer Betrachtung (siehe auch Kapitel 6.2). Auch wenn dies nicht Kerngebiet der Werkstoffforschung ist, gilt es diesen gesamtsystemischen Zugang in Kooperation und Arbeitsteilung mit anderen Disziplinen weiterzuentwickeln und auszubauen. Darauf kann dann die Werkstoffforschung zielgerichtet aufsetzen.



Aufgrund ihrer derzeit überwiegend fossilen Rohstoffbasis betreffen weitere wichtige Thematiken im Kontext Energiewende und Polymerwerkstoffe einerseits die Wiederverwertung von Polymerwerkstoff-Abfällen nach Gebrauch („post-use plastics waste“) und andererseits die Herstellung neuartiger Polymere auf Basis regenerativer Ressourcen. Abgesehen davon, dass Kunststoffabfälle weltweit zu zahlreichen gravierenden Problemen führen (unter anderem „marine litter“), die es zu beseitigen und zu vermeiden gilt, stellt sich die Frage nach adäquaten Lösungsansätzen für deren Wiederverwertung auch vor dem Hintergrund der Energie- und Stoffeffizienz in einem künftigen Energiesystem. Aus energetisch-entropischer Sicht und aufgrund von Ökoeffizienz-Überlegungen ist für die sinnvolle „werkstoffliche“ Wiederverwertung von Kunststoffen nach Gebrauch ein oberer Grenzwert bei etwa dreißig bis vierzig Prozent des Kunststoffabfallvolumens zu erwarten. Da die Deponie von Kunststoffabfällen als Option längerfristig ausscheidet, kommen für die Verwertung der restlichen Polymerabfallfraktion „chemisch-rohstoffliche“ und „energetisch-thermische“ Verfahren (Verbrennung), das heißt eine kaskadische Stoff/Energie-Nutzung infrage. Mittlerweile existieren weltweit intensive Forschungsanstrengungen zur Nutzung von CO₂ als Baustein für unterschiedlichste organische Synthesen.⁵ Damit eröffnet sich eine realistische, den Leitprinzipien und Kriterien einer Nachhaltigen Entwicklung (Sustainable Development) entsprechende Perspektive für künftig aus erneuerbaren Energieüberschüssen energetisch gespeiste Power-to-Feedstock-Technologien (Herstellung gasförmiger/flüssiger Kohlenwasserstoffe) und somit für einen vollständig regenerativen Energie/Stoff-Kreislauf für Polymerwerkstoffe („all-inclusive, full-circular economy for polymeric materials via CO₂ utilization“). Ein besonderer Vorteil dieser Technologien besteht unter anderem in der Nutzbarkeit bestehender Infrastrukturen (zum Beispiel Gasnetz) für die Feedstock-Speicherung.

6.4 Fazit

Polymerwerkstoffe bieten ein hohes Innovationspotenzial für ein breites Spektrum von Energieeffizienztechnologien und erneuerbaren Energietechnologien (Solarthermie, Photovoltaik, Wind, Geothermie, Gezeiten). Sie werden damit zu einer

bedeutenden Materialklasse und treibenden Kraft künftiger energietechnologischer Entwicklungen und zu einem Motor ihrer steigenden Marktdurchdringung.

Die Schöpfung und Ausreizung der Innovationspotenziale erfordert eine verstärkte Integration gesamtsystemischer Zusammenhänge und Abhängigkeiten, um daraus jene werkstofflichen Entwicklungspotenziale für eine zielgerichtete Werkstoffforschung abzuleiten, welche die größtmöglichen Hebelwirkungen in Bezug auf gesamtsystemische Energieeffizienzeffekte und die rasche Marktimplementierung sowie ein beschleunigtes Marktwachstum von erneuerbaren Energietechnologien ermöglichen.

Aufgrund der großen Bedeutung gesamtsystemischer Aspekte sind die notwendigen Voraussetzungen für eine zielgerichtete und effektive Polymerwerkstoffforschung in enger Kooperation und Arbeitsteilung mit anderen Fachdisziplinen und der Wirtschaft entsprechend zu entwickeln und auszubauen.

Literatur

Ashby, M.F. (Hrsg.): *Materials and the Environment*, 2. Auflage, Elsevier Inc., 2013.

Lang, R.W.: „Die Energiewende – Welchen Beitrag leisten Kunststoffe“. In: ALPHA GmbH (Hrsg.): *Jahresmagazin Ingenieurwissenschaften, Im Fokus WAK – Kunststofftechnik*, 2013, S. 70–73.

Lang, R.W./Wallner, G.M./Fischer, J.: „Solarthermische Systeme aus Polymerwerkstoffen: Das Großforschungsvorhaben“. In: SolPol (Hrsg.): *Zeitschrift Erneuerbare Energie*, 2013, S. 1–13, 7–11.

Liu, Q./Wu, L./Jackstell, R./Beller, M.: „Using Carbon Dioxide as a Building Block in Organic Synthesis“. In: *Review in Nature Communications*, DOI: 10.1038/ncomms6933, 2015.

Pilz, H./Brandt, B./Fehringer, R., denkstatt GmbH (Hrsg.): *Die Auswirkungen von Kunststoffen auf Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen in Europa*, Wien, 2010.

5 | Vgl. Liu et al. 2015.

7 Materialien für effiziente Energiewandlung

7.1 Beispiel 1: Weichmagnetische Werkstoffe

Kay Hameyer, Gerhard Hirt, RWTH Aachen University

7.1.1 Einführung

Weichmagnetische Werkstoffe in der Energietechnik

Die Übertragung, Umwandlung und Verteilung von Energie ist von zentraler Bedeutung, um den global stetig wachsenden Anforderungen an die Energietechnik in nachhaltiger, umwelt- und ressourcenschonender Weise gerecht zu werden und um die Energiewende umzusetzen. Elektrische Antriebe repräsentieren das Bindeglied zwischen der elektrischen Energieversorgung und Verteilung hin zur Umsetzung in mechanischen Prozessen. Etwa 67 Prozent der industriellen Energie wird in elektrischen Maschinen in mechanische Leistung gewandelt. Die aus Rohstoffen erzeugte mechanische Energie wird in Generatoren in elektrische Energie umgewandelt und über Transformatoren nochmals konvertiert, um im Energieübertragungsnetz transportiert zu werden. Eine erneute Wandlung im Transformator liefert dann die elektrische Energie, die im Motor als Verbraucher in mechanische Leistung umgewandelt wird. Generatoren, Transformatoren und elektrische Motoren sind zu einem beträchtlichen Volumen aus weichmagnetischem Elektromagnetband aufgebaut. Die elektrischen Maschinen bieten ein großes Potenzial zur Steigerung der Effizienz und Leistungsdichte und somit zur Erfüllung der genannten Ziele der Energiewende. Da das Potenzial zu Wirkungsgradsteigerungen durch konstruktive Maßnahmen weitgehend ausgeschöpft ist, liegt der Fokus derzeitiger Forschungen und Entwicklungen besonders auf dem Werkstoffdesign.

Wechselwirkungen zwischen Leistungsdichte, Effizienz und Verlusten

Die wesentlichen Entwicklungsziele von elektrischen Maschinen verschiedener Art bilden zum einen die Kompaktheit und

Leistungsdichte und zum anderen die Maximierung des energetischen Wirkungsgrades, das heißt die Minimierung der Verluste bei der Wandlung elektrischer in mechanische Energie oder umgekehrt, oder der Wandlung der Darbietungsform bei der Wandlung von elektrischer in elektrische Energie. Beide Zielgrößen werden sowohl durch das ausgewählte Maschinenkonzept und die Auslegung der Maschine als auch durch die zur Verfügung stehenden elektromagnetischen Werkstoffe, deren mechanische und elektromagnetische Eigenschaften sowie deren Verarbeitbarkeit begrenzt. Beide Faktoren sind dabei eng miteinander verknüpft und voneinander abhängig. So führt zum Beispiel das Streben nach höheren Leistungsdichten rotierender elektrischer Maschinen zu erhöhten Drehzahlen, höheren Polpaarzahlen und damit zu höheren Grundfrequenzen in der elektrischen Maschine. Hohe Ummagnetisierungsfrequenzen im Magnetkreis sind die Folge. Diese erzeugen jedoch erhöhte Eisenverluste und begrenzen damit wiederum die Effizienz.

Die europäische Einführung der gesetzlichen Anforderungen an die Energieeffizienz von Niederspannungs-Drehstrommotoren und deren Einteilung in Effizienzklassen kennzeichnet den politischen Willen, bei den elektromechanischen Energiewandlern auf die CO₂-Problematik bei den motorischen Verbrauchern einzuwirken.

Aktuelles Materialkonzept

In der Regel werden für die Herstellung von konventionellem Elektromagnetband Eisen-Silizium-Legierungen verwendet. Die weltweite jährliche Produktion dieser Legierungen liegt zurzeit bei circa zwölf Millionen Tonnen. Dabei handelt es sich zu etwa achtzig Prozent um nicht kornorientierte und zu zwanzig Prozent um kornorientierte Güter. Der Siliziumgehalt liegt üblicherweise bei maximal 3,5 Gewichtsprozent. Durch die Verwendung fein abgestimmter Legierungskonzepte, genaue Kontrolle der primär- und sekundärmetallurgischen Prozesse, gezielte Wärmebehandlungen und schonende Bearbeitung lassen sich zurzeit die aus der jeweiligen Anwendung abgeleiteten gewünschten Eigenschaften nur in bestimmten Grenzen einstellen. Die bisher größtenteils ungewissen Zusammenhänge zwischen der Mikrostruktur des Materials und dem elektromagnetischen Verhalten stellen ein Hindernis in der Weiterentwicklung und Anwendung von Elektromagnetband dar. Die Untersuchung und Klärung dieser Zusammenhänge ist Voraussetzung, um zukünftig die Eigenschaften des Elektromagnetbandes gezielt auf die jeweiligen Anforderungen optimierter elektrischer Maschinen (Generatoren, Transformatoren, Motoren) anpassen und die Verluste minimieren zu können.



7.1.2 Werkstoffseitige Möglichkeiten und Herausforderungen im Hinblick auf Effizienzsteigerung von Generatoren, Transformatoren und Motoren

Kornorientiertes und nicht-kornorientiertes Elektroband

Generell werden beim Elektroband zwei unterschiedliche Werkstoffarten unterschieden. Der kornorientierte Werkstoff mit stark magnetisch anisotropem Verhalten sorgt für optimale magnetische Eigenschaften in Walzrichtung. Diese Werkstoffe werden für Anwendungen mit primär uniaxialen magnetischem Flussverlauf, also zum Beispiel in Transformatoren, eingesetzt. Die Abweichungen von der idealen Gosslage, das heißt einer Ausrichtung der Kristalle mit den Würfelkanten entlang der Walzrichtung, sollen im späteren Material möglichst gering sein. So werden ideale magnetische Eigenschaften bewirkt. Dieses Ziel wird heute mit einer auf empirischen Kenntnissen beruhenden, feinabgestimmten, gezielten Prozessführung verfolgt. Dabei werden abhängig vom gewählten Legierungskonzept und der einzustellenden Enddicke die Walz- und Glühparameter so gewählt, dass ein entsprechend gerichtetes Kornwachstum hervorgerufen wird.

Nicht-kornorientiertes Elektroband hingegen besitzt ein möglichst isotropes Gefüge, um in rotierenden Maschinen in jeder Raumrichtung gleichartige magnetische Eigenschaften zu besitzen. Neben den elektromagnetischen Eigenschaften sind zusätzlich auch mechanische und verfahrenstechnische Eigenschaften zu beachten, unter anderem Festigkeiten, Wechselbeständigkeit, thermisches Verhalten oder Verarbeitbarkeit. Die Optimierung einer dieser Eigenschaften geht in der Regel mit einer Verschlechterung der magnetischen Eigenschaften einher, was einen Kompromiss der gewünschten Eigenschaften bedingt. Die Materialoptimierung hinsichtlich exzellenter magnetischer Eigenschaften bei gleichzeitig guten mechanischen Eigenschaften ist daher ein notwendiger Schritt für neue Entwicklungen.

Anwendung in Generatoren und Motoren

In rotierenden Maschinen wird nicht-kornorientiertes Elektroband verwendet. Es kann sowohl im Stator als auch im Rotor genutzt werden. Ein möglichst isotropes und homogenes Gefüge wird angestrebt, um in alle Raumrichtungen und jedem Rotationswinkel ein einheitliches magnetisches Verhalten zu gewährleisten. Jedoch muss beachtet werden, dass sich bei Blechwerkstoffen durch den Walzvorgang im Werkstoff eine

Walztextur ausprägt, da die Körner in Walzrichtung gestreckt werden und sich ihre kristallographische Orientierung ausrichtet. Ungeachtet von Wärmebehandlungen werden so Texturen vererbt. Folglich wirkt sich jeder Bearbeitungsschritt auf die späteren Eigenschaften aus und unterschiedliches magnetisches Verhalten in den verschiedenen Flächenrichtungen ist zu erwarten.

Werkstoffseitige Entwicklungen und Potenziale

Nach dem deutschen Energiebetriebene-Produkte-Gesetz (EBPG), umgangssprachlich auch Ökodesign-Richtlinie genannt, müssen seit Januar 2015 in Verkehr gebrachte Motoren mit Nennleistungsausgabe zwischen 7,5 und 375 Kilowatt mindestens die Wirkungsklasse IE2 oder IE3 erreichen. Zum Januar 2017 werden diese Anforderungen auch auf Motoren zwischen 0,75 und 7,5 Kilowatt ausgeweitet. Diese verschärften Anforderungen und die steigende Nachfrage nach energieeffizienten Antrieben können nur durch verstärkten Einsatz höherwertiger Werkstoffe (kornorientierte und nicht-kornorientierte Güten) in den elektrischen Antrieben und Transformatoren erfüllt werden. Bei der Weiterentwicklung dieser Werkstoffe geht es zum einen um eine Minimierung der elektromagnetischen Verluste, zum anderen auch um eine gute Verarbeitbarkeit und gute mechanische Eigenschaften des fertigen Produkts. Einige Maßnahmen zur Verbesserung der magnetischen Eigenschaften sind im Folgenden genannt:

Die Reduktion der Blechdicke der einzelnen Lagen führt zu verringerten Ummagnetisierungsverlusten. Heute eingesetzte Blechdicken liegen typischerweise im Bereich von 0,23 bis 0,5 Millimeter. Es gibt aber auch erste Entwicklungen von Produkten mit einer Blechdicke von nur 0,1 Millimeter. Um diese Werkstoffe wirtschaftlich sinnvoll herzustellen, bedarf es einer anspruchsvollen Anlagentechnik und Prozessführung, um sowohl die Mikrostruktureigenschaften als auch die zu fordernden geometrischen Toleranzen einhalten zu können. Die Reduktion der Blechdicke führt darüber hinaus zu Herausforderungen in der Weiterverarbeitung, so zum Beispiel beim Stanzen.

Die heute eingesetzten Siliziumgehalte liegen üblicherweise bei maximal 3,5 Gewichtsprozent. Es wurden aber auch schon erste Versuche unternommen, die Siliziumgehalte auf bis zu 6,5 Gewichtsprozent zu steigern, wodurch die Ummagnetisierungsverluste deutlich reduziert werden konnten. Da Siliziumgehalte oberhalb von 3,5 Gewichtsprozent jedoch zu einer starken Versprödung des Materials führen, konnten Elektrobänder mit diesen hohen Gehalten mit den bislang verfügbaren Fertigungstechnologien nicht wirtschaftlich hergestellt werden. Für die industrielle Produktion solcher Werkstoffe mit derart erhöhten

Siliziumgehalt bedarf es weiterer Forschung sowohl in Bezug auf die Herstellung des Bandmaterials und seiner Eigenschaften als auch in Bezug auf die Weiterverarbeitung.

Nicht nur die elektromagnetischen und mechanischen Eigenschaften des Elektrobandes, sondern die Eigenschaften des montierten Blechpakets beeinflussen die Effizienz der Maschine. Diese Eigenschaften des Pakets werden auch vom Isolierlack und von Eigenspannungen im Blech beeinflusst, die zum Beispiel aus dem Stanzen resultieren.

7.1.3 Horizonte zur Erschließung von Effizienzpotenzialen durch neue Werkstoffe und Verarbeitungstechnologien

Notwendigkeit ganzheitlicher Betrachtungen

Um die Effizienz elektrischer Generatoren, Transformatoren und Motoren durch verbesserte Werkstoffkonzepte steigern zu können, ist eine ganzheitliche Betrachtung erforderlich. So müssen einerseits die aus dem Betrieb des jeweiligen elektromagnetischen Energiewandlers abzuleitenden Anforderungen berücksichtigt werden. Andererseits sind die Wechselwirkungen zwischen dem Legierungskonzept und seiner Herstellung und Verarbeitung und den sich einstellenden Mikrostruktureigenschaften maßgeblich für die Produkteigenschaften. Es müssen also Fragen der Werkstoff-, Prozess- und Elektrotechnik gleichermaßen berücksichtigt werden. Ein besseres Verständnis der grundlegenden Zusammenhänge zwischen den Werkstoffeigenschaften, den Anwendungsbedingungen und den konstruktiven Merkmalen der Antriebsmaschine bildet daher eine wichtige Voraussetzung für eine aufeinander abgestimmte und optimierte Werkstoff- und Anwendungsentwicklung zur Erreichung verbesserter Energieeffizienzklassen.

Herausforderungen im Bereich der Modellwelten

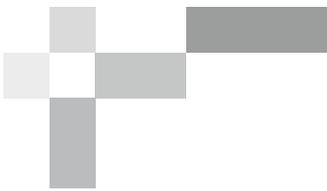
Bis zum jetzigen Zeitpunkt stellt die unzureichende Wissensgrundlage bezüglich der Korrelation der magnetischen Eigenschaften mit den mikrostrukturellen Begebenheiten des Materials das größte zu lösende wissenschaftliche Problem dar. Derzeitige Modelle zur Beschreibung von beispielsweise elektrischen Maschinen berücksichtigen lediglich physikalische Grundlagen und globale Kenngrößen des Werkstoffs. Hierbei fehlen Informationen zum komplexen elektromagnetischen Materialverhalten sowie zu Einflüssen von Verarbeitung und Fertigung, die

signifikante Auswirkungen auf das Betriebsverhalten haben, jedoch aus genormten Materialtests nicht abgeleitet werden können. Da genauso die modellmäßige Verknüpfung des Betriebsverhaltens von Elektrobändern mit seinen Ursachen in der Produktion und Verarbeitung unvollständig ist, wird eine Vorhersage des magnetischen Verhaltens für empirisch nicht genauestens untersuchte Elektrobandsorten derzeit unmöglich.

Demzufolge ist ein prozesskettenbasierter Ansatz zur Modellierung des Materialverhaltens mit dem Ziel der Minimierung der Verluste und Maximierung der Effizienz der nächste Schritt, um Elektrobänder als funktionellen Werkstoff weiterzuentwickeln. Das übergeordnete Ziel der Modellbildung besteht darin, einerseits die voneinander abhängigen Prozessschritte der Elektrobänderherstellung und ihren Einfluss auf Textur und Mikrostruktur abzubilden und andererseits eine Korrelation zwischen Textur und Mikrostruktur und den elektromagnetischen Eigenschaften im fertigen Produkt herzustellen, um das zu erwartende Betriebsverhalten vorhersagen zu können. Erst eine derartige Prozessketten- und Eigenschaftsmodellierung würde eine zielgerichtete Verbesserung der Elektrobänderherstellung ermöglichen. Ziel muss dann sein, das Material ausgehend von bestimmten Betriebsanforderungen individuell zu optimieren und die Prozessparameter so anzupassen, dass die breitgefächerten Anforderungen der Energietechnik für die verschiedensten Anwendungen durch maßgeschneiderte Materialien jeweils optimal erfüllt werden können.

Ausgewählte Herausforderungen in der Werkstofftechnologie

Die bereits im zweiten Kapitel ausgeführten aktuellen werkstoffbezogenen Entwicklungsrichtungen können nur mit grundlegenden Weiterentwicklungen im Bereich der Werkstofftechnologie realisiert werden. Beispielsweise erfordert die angestrebte Bereitstellung von Güten mit sehr hohem Siliziumgehalt neue Gieß- und Walztechnologien und Möglichkeiten zum Stanzen sehr spröder Werkstoffe. Ein Ansatz zur Erzeugung dieser Güten ist eine erhebliche Erhöhung der Erstarrungsgeschwindigkeit, um so Steigerungen zu vermeiden und ein feinkörniges möglichst homogenes Ausgangsgefüge zu erreichen. Dies ist nur möglich, indem die aus der Schmelze angestrebte Gießdicke gegenüber dem Stand der Technik deutlich reduziert wird. Entsprechende kontinuierliche rasch erstarrende Gießverfahren basieren auf mitlaufenden Kokillen in Form rotierender Walzen und sind für diese Werkstoffe bisher fast ausschließlich auf schmale (Labor-)Abmessungen beschränkt. Nur in vergleichsweise schmalen Breiten kann heute in Spezialanwendungen „direktgegossenes“ als „metallisches Glas“ erstarrtes und sehr dünnes Band mit positiven Auswirkungen auf die



Effizienz der Maschine eingesetzt werden. Die Verluste im Kern können durch den Einsatz amorpher Materialien um bis zu siebenzig Prozent reduziert werden.

Die Erweiterung dieser Technologien auf Abmessungen und Produktionsmengen, die eine breitere industrielle Nutzung ermöglichen würden, bereitet sowohl werkstoffseitige als auch anlagentechnische Herausforderungen. Gleiches gilt für die Weiterverarbeitung dieser vergleichsweise spröden Bänder durch Walzen und Stanzen. Dies sind unter anderem Gründe, die einer weitläufigen Nutzung in elektrischen Maschinen großer Leistung heute entgegenstehen. Amorphe Werkstoffe mit Co-Anteil sind gut für den Einsatz in geometrisch kleinen Magnetkörpern für leistungselektronische Komponenten geeignet. Die hohen Kosten begrenzen jedoch ebenfalls ihren Einsatz. Es ist zurzeit noch nicht abzusehen, ob und inwieweit dieser Werkstoff wirklich praktische Bedeutung gewinnen wird.

7.1.4 Fazit

Die gesamte elektrische Energie wird in Magnetkreisen gewandelt. Zunächst in Generatoren erzeugt, dann in Transformatoren gewandelt und am Ende der Verteilungskette in den Antriebssystemen genutzt. Die Energiewende veranlasst zurzeit ein Umdenken der Verteilung der elektrischen Energie, wodurch andere elektromagnetische Wandler notwendig werden. Beispielsweise werden höhere Frequenzen an Bedeutung gewinnen. Amorphe Werkstoffe hätten hier eine gute Chance, großtechnisch Anwendungen zu finden, da die größeren Frequenzen in sehr viel kleineren geometrischen Abmessungen resultieren. Auch die elektromotorischen Verbraucher werden zukünftig mit höheren Frequenzen betrieben werden, wie dies bei besonders hohen Leistungsdichten zum Beispiel für die Elektromobilität schon heute sichtbar ist.

Um das gesamte Potenzial von elektrischen Maschinen der Energieverteilung, -übertragung und -umwandlung ausschöpfen zu können, ist es notwendig, Materialoptimierung und Maschinenauslegung zusammen zu betrachten. Erst mit genauer Kenntnis der ablaufenden Prozesse im Material und ihren Auswirkungen ist es möglich, gezielt Prozesse zu variieren und neue Werkstoffkonzepte zielgerichtet für die jeweilige Anwendung in der Energietechnik maßgeschneidert zu entwickeln.

Die industrielle Realisierung dieser Werkstoffkonzepte wird je nach Legierungskonzept grundlegende Änderungen der

Herstelltechnologien gegenüber dem Stand der Technik erfordern. Rasche Erstarrung und die Einstellung definierter Mikrostrukturen bei höchster Reinheit und geometrischer Genauigkeit sowie eine optimierte Weiterverarbeitung stellen technologische Herausforderungen dar. Dabei bleibt zu klären, ob und inwieweit diese Entwicklungen die von amorphen Metallen für Spezialanwendungen heute bekannte Verlustreduzierung (circa siebenzig Prozent) je nach Anwendung auch auf anderem Weg erreichen können.

Literatur

Ban, G./Nemeth, S.: „Composition Effects on Core Loss of Fe-Si-Al Electrical Steels“. In: *IEEE Transactions on Magnetics*, 23: 5, 1987, S. 3227-3229.

Brissonneau, P.: „Non-oriented Electrical Sheets“. In: *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 41: 1-3, 1984, S. 38-46.

Gerada, D./Mebarki, A./Brown, N.L./Gerada, C./Cavagnino, A./Boglietti, A.: „High-Speed Electrical Machines: Technologies, Trends, and Developments“. In: *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61: 6, 2014, S. 2946-2959.

Hou, C.-K.: „Effect of Silicon on the Loss Separation and Permeability of Laminated Steels“. In: *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 162: 2, 1996, S. 280-290.

Moses, A.J.: „Energy Efficient Electrical Steels: Magnetic Performance Prediction and Optimization“. In: *Scripta Materialia*, 67: 6, 2012, S. 560-565.

Ning, S.R./Gao, J./Wang, Y.G.: „Review on Applications of Low Loss Amorphous Metals in Motors“. In: *Advanced Materials Research*, 129-131, 2010, S. 1366-1371.

Schoppa, A./Schneider, J./Wuppermann, C.-D.: „Influence of the Manufacturing Process on the Magnetic Properties of Non-oriented Electrical Steels“. In: *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 215-216, 2000, S. 74-78.

Steenjtes, S./Lessmann, M./Hameyer, K.: „Advanced Iron-loss Calculation as a Basis for Efficiency Improvement of Electrical Machines in Automotive Application“. In: *Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion (ESARS)*, Bologna, 2012, S. 1-6.

Xia, Z./Kang, Y./Wang, Q.: „Developments in the Production of Grain Oriented Electrical Steel“. In: *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 320, 2008, S. 3229–3233.

ZWEI – Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. – Fachverband Elektrische Antriebe (Hrsg.): *Motoren und geregelte Antriebe: Normen und gesetzliche Anforderungen an die Energieeffizienz von Niederspannungs-Drehstrommotoren*, Frankfurt, 2010.

7.2 Beispiel 2: Die Rolle der Tribologie für die Energiesysteme der Zukunft

Carsten Gachot, Andreas Rosenkranz, Frank Mücklich,
Universität des Saarlandes, Saarbrücken

7.2.1 Einführung

In der Einleitung zu den Energiesystemen der Zukunft wurden bereits zwei Handlungsstränge für den notwendigen Umbau des Energiesystems in Deutschland identifiziert. Neben der wichtigen Durchdringung mit diversen Energietechnologien stellt insbesondere der zweite Handlungsstrang zur kosten- und effizienzseitigen Optimierung der verfügbaren Technologien einen essenziellen Aspekt dar. Ausfälle von Energieanlagen infolge von Alterung oder tribologisch hervorgerufenen Schädigungen führen zu signifikant erhöhten Kosten. Schätzungen zufolge belaufen sich die Kosten für den Stillstand eines Kohlekraftwerks aufgrund von Schäden durch Verschleiß auf circa 800.000 Euro pro Woche.¹ Insgesamt lässt sich festhalten, dass reibungs- und verschleißbedingte Kosten etwa drei bis vier Prozent des Bruttoinlandsproduktes einer großen Industrialisation betragen.²

Die Lehre von Reibung und Verschleiß, die Tribologie, ist eine noch vergleichsweise „junge“ Disziplin, wenngleich auch die grundlegenden Phänomene bereits von Leonardo da Vinci beschrieben wurden. Der Begriff Tribologie wurde erst 1966 von H. P. Jost, einem britischen Ingenieur, am Rande einer großen Schmierstofftagung geprägt. Dieser legte damit den Grundstein

für eine ganzheitliche Betrachtung dieses interdisziplinären Forschungsfeldes mit seinen enormen Auswirkungen auf die Volkswirtschaften vor allem großer Industrieländer.

Tribologische Vorgänge spielen in vielen technologischen Bereichen eine zentrale Rolle. Am technologischen System „Automobil“ wird ersichtlich, dass die Steuerung der tribologischen Eigenschaften in vielen Bauteilen von entscheidender Bedeutung ist. Ungefähr zwanzig Prozent des gesamten Energiebedarfs entfallen, wie im vorherigen Positionspapier zur Rolle des Leichtbaus bereits dargelegt, auf den Transportsektor. Davon geht im Falle des Automobils circa ein Drittel der über den Kraftstoff zugeführten Energie durch Reibung verloren.³ Im Bereich des Antriebsstrangs liegen die Reibungsverluste bei knapp 17 Prozent. Eine Verbesserung der tribologischen Eigenschaften kann deshalb neben einer Effizienzsteigerung auch zu einer unmittelbaren Reduktion des Kraftstoffverbrauchs und somit zu einer deutlich erhöhten Ressourceneffizienz führen. Bei etwa 650 Millionen Personenkraftwagen weltweit führt schon eine zehnprozentige Verringerung von tribomechanischen Motorverlusten zu einer Kraftstoffeinsparung von 1,5 Prozent. Dies entspricht bei einer mittleren Jahreslaufleistung von circa 12.000 Kilometern einer Kraftstoffmenge von knapp 340 Litern pro Jahr und Fahrzeug;⁴ hochgerechnet auf alle Personenkraftwagen weltweit könnten damit mehr als 200 Milliarden Liter Treibstoff eingespart werden.

7.2.2 Werkstoff- und verfahrens- seitige Möglichkeiten und Herausforderungen

Ganz traditionell werden Maschinenelemente mit Öl oder Fett geschmiert, um die beiden Reibpartner partiell oder gar vollständig in ihrem Kontaktbereich zu separieren und so deren Lebensdauer signifikant zu erhöhen. Vielfach werden heutzutage Mineral- oder Synthetiköle eingesetzt. Entscheidend sind jedoch die Schmierstoffzusätze (Additivierungen), die beispielsweise auf Basis von Phosphor, Schwefel und Zink zu einer deutlichen Steigerung der Langlebigkeit von Komponenten durch die gezielte Bildung von tribochemischen Reaktionsschichten führen. Die genauen Bildungsmechanismen und Zusammensetzungen dieser Reaktionsschichten sind noch immer Gegenstand materialwissenschaftlicher Untersuchungen. Neben

1 | Vgl. Holmberg 2012.

2 | Vgl. Tzanakis et al. 2012, S. 4126-4140.

3 | Vgl. Holmberg et al. 2012, S. 221-234.

4 | Vgl. Tzanakis et al. 2012, S. 4126-4140.



klassischen Schmierstoffen werden auch verbreitet ionische Flüssigkeiten getestet. Aktuelle Studien gehen von einer potenziellen Reibminderung von bis zu fünfzig Prozent durch den Einsatz von ionischen Flüssigkeiten aus.⁵

Der Trend geht dabei immer stärker zu einer „grünen Tribologie“, das heißt der Vermeidung von umweltschädlichen Zusätzen. Dies kann unter anderem durch natürlich vorkommende oder auch biologisch abbaubare Schmierstoffe wie zum Beispiel Palm- oder Rapsöl erzielt werden.

Weitere Maßnahmen zur Erhöhung der Verschleißbeständigkeit sind das definierte Aufsticken beziehungsweise Aufkohlen von Oberflächen zur Erhöhung der Verschleißfestigkeit. Dabei handelt es sich um etablierte Methoden, die werkstoffseitig in einer Verbesserung der tribologischen Eigenschaften resultieren. Darüber hinaus können Reibung und Verschleiß auch über die Abscheidung von dünnen, diamantartigen Kohlenstoffschichten (DLC-Schichten, Diamond-Like Carbon) deutlich gesenkt werden. Auch der Einsatz von Festschmierstoffen wie zum Beispiel MoS₂ oder WS₂ kann dazu beitragen, den Verschleiß in gewissen Grenzen zu verringern. Die Größenordnung der Reibungsminimierung durch neuartige Beschichtungen oder Festschmierstoffe variiert hierbei zwischen zehn und fünfzig Prozent.⁶

Abseits der Verwendung von Schmierstoffen und den oben angesprochenen thermochemischen Verfahren bieten Laser ein großes Potenzial für die Steuerung von tribologischen Eigenschaften. Die laserbasierte Erzeugung von ferngeordneten wohl definierten topographischen Mustern in der Oberfläche der betroffenen Reibpartner kann unter trockenen Reibbedingungen zur Speicherung von Verschleißpartikeln in den derart generierten „Taschen“ sorgen und dadurch den abrasiven Verschleiß minimieren. Ansonsten „graben“ sich diese Verschleißpartikel in die Materialoberfläche ein und schädigen dadurch langfristig den Werkstoff. Der beschleunigt auftretende Verschleiß führt final zu einem mitunter katastrophalen Versagen von Maschinenkomponenten und so zum Stillstand von Industrieanlagen. Der Vorteil der Lasertechnologie liegt hierbei in der

Verfahrensflexibilität hinsichtlich der Integration in Prozessketten und ihrer nahezu universellen Einsetzbarkeit für ein breites Werkstoffspektrum. Heute existieren Strahlquellen mit kurzen und ultrakurzen Pulsen im Bereich von Nano- bis Femtosekunden, die die schnelle und präzise Bearbeitung praktisch aller relevanten Materialoberflächen und -geometrien erlauben. Die möglichen Reibungsreduktionen liegen im Bereich von 25 bis fünfzig Prozent.⁷

Auch für gezielt minimierte Schmierstoffmengen bieten die laserinduzierten Strukturen in den Materialoberflächen ein enormes Potenzial. Mithilfe dieser Laserstrukturen lassen sich Mangelschmierungszustände vermeiden, in dem der Kontaktbereich zuverlässig mit genügend Schmierstoff versorgt wird. Dabei kann die Schmierfilmdicke, die entscheidend für die Trennung der beteiligten Reibpartner ist, über zusätzliche hydrodynamische Druckbeiträge in winzigen Schmierstoffspalten von zum Beispiel hochdrehenden Lagern exakt kontrolliert werden.

Aktuelle Trends zeigen den verstärkten Einsatz von niedrigviskosen Ölen (zum Beispiel 5W20, 0W20 oder gar OW16). Durch eine geringere Viskosität werden entsprechend geringere Scherkräfte übertragen – dadurch wird der Kraftstoffverbrauch um weitere 0,5 Prozent gesenkt.⁸ Das Risiko, dass es bei geringsten Schmierfilmdicken zum Verschleiß durch Oberflächenkontakt kommen kann, wird dadurch gemindert, dass tribochemische Reaktionsschichten gebildet werden, die ihrerseits die Reibung und den Verschleiß senken. Zusätzlich kann durch eine Laserstrukturierung Einfluss auf eine gezielte Schmierfilmdicke genommen werden. Eine interessante Variante davon ist die Laserinterferenzstrukturierung, die präzise topographische Muster in Mikro- und Nanodimensionen mit hoher Reproduzierbarkeit erzeugt. Diese Methode gestattet die Einstellung periodischer hydrodynamischer Druckverteilungen in µm-Dimensionen und kann somit zur präziseren Kontrolle der Schmierfilmdicke in Mikrometerdimensionen einen entscheidenden Beitrag liefern. Rosenkranz et al. konnten im Falle von Mangelschmierungssituationen nachweisen, dass laserinterferenzstrukturierte Stahloberflächen eine Erhöhung der Schmierfilmliebensdauer um den Faktor 130 aufweisen.⁹

5 | Vgl. Holmberg et al. 2012, S. 221-234.

6 | Ebd.

7 | Ebd.

8 | Vgl. Fenske 2009.

9 | Vgl. Rosenkranz et al. 2015, S. 1-12.

7.2.3 Horizonte zur Erschließung

Der Trend geht immer stärker zu der bereits angesprochenen „grünen Tribologie“. Kernpunkte sind dabei:¹⁰

- ökologisch verträgliche Schmierstoffe,
- neue Prinzipien der Selbst-Schmierung,
- Oberflächenstrukturierung und biomimetische Ansätze sowie
- nachhaltige Ingenieurskonzepte.

In diesem Kontext ist insbesondere die Lasertechnologie als prominentes Beispiel zu nennen, die schnell, präzise und flexibel unter verschiedenen tribologischen Rahmenbedingungen die Reibung in bestimmten Grenzen steuern und die Verschleißbeständigkeit positiv beeinflussen kann. Allerdings gibt es hinsichtlich der Größe, Verteilung und Geometrie der mittels Laser eingebrachten Strukturen (noch) keine allgemeingültigen Designregeln. Die optimalen Parameter müssen in enger Abstimmung mit kontaktmechanischen Berechnungen ermittelt werden und gelten somit nur für die jeweilige Applikation. Generell erfordert die Tribologie eine noch engere Verzahnung der daran beteiligten natur- und ingenieurwissenschaftlichen Disziplinen insbesondere mit der Materialforschung. Gerade die Fortschritte in der Analyse von tribologisch bedingten Schadensfällen mithilfe modernster materialwissenschaftlicher Methoden eröffnen bisher ungeahnte Möglichkeiten und geben mikrostrukturelle Einblicke in die komplexen Wirkzusammenhänge dieses spannenden und ökonomisch bedeutenden Bereiches.

7.2.4 Fazit

Die Tribologie als interdisziplinäre Wissenschaft hat einen erheblichen Einfluss auf verschiedene Bereiche des Alltags. Die umsichtige materialwissenschaftliche Betrachtungsweise tribologischer Systeme mit dem Ziel der Reibungsminimierung sowie das Erarbeiten von Strategien zur Vermeidung verschleißbedingter Ausfälle von zum Beispiel Energieanlagen kann maßgeblich zu längeren Standzeiten von Anlagen und somit zu einer Kostensenkung und deutlich höheren Ressourceneffizienz beitragen. Gerade im Bereich erneuerbarer Energien sind die Herausforderungen im Hinblick auf die Langlebigkeit der Komponenten enorm. Windkraftanlagen sind hierfür ein Paradebeispiel, da oft die Zugänglichkeit zur Reparatur im Off-Shore-Sektor erschwert ist. Meist versagen dabei die Getriebe, die einerseits salzhaltiger Luft und damit Korrosion sowie andererseits Temperaturschwankungen und variierenden Lasten und Schwingungen durch die

transienten Eigenschaften des Windes ausgesetzt sind. Außerdem spielen Kontaminationen der eingesetzten Schmierstoffe durch Wasser und Partikel eine entscheidende Rolle¹¹. Hier kann die Materialforschung neuartige Lösungsansätze bieten. Einerseits können Oberflächen hinsichtlich ihrer Topographie, der Oberflächenchemie und der Mikrostruktur optimiert werden, und andererseits ermöglichen hochauflösende Mikroskopieverfahren eine detaillierte Untersuchung der Wechselwirkung zwischen Schmierstoffadditiven und resultierender Triboreaktionsschicht. Dies kann direkt zur Vermeidung von reib- und verschleißbedingten Energieverlusten führen und spiegelt daher die zentrale Rolle der Tribologie und Materialforschung in den Energiesystemen der Zukunft wider.

Literatur

Fenske, G.: „Impact of Friction Reduction Technologies on Fuel Economy“. In: *Chicago Chapter Meeting of the Society of Tribologists and Lubricated Engineers*, 2009.

Holmberg, K.: „Friction Science Saves Energy“. In: *Science and Foresight VTT Impulse*, 2012.

Holmberg K./Andersson, P./Erdemir, A.: „Global Energy Consumption Due to Friction in Passenger Cars“. In: *Tribology International*, 47, 2012, S. 221–234.

Nosonovsky, M./Bhushan, B.: „Green Tribology: Principles, Research Areas and Challenges“. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 368: 1929, 2010, S. 4677–4694.

Rosenkranz, A./Heib, T./Gachot, C.: „Oil Film Lifetime and Wear Particle Analysis of Laser-patterned Stainless Steel Surfaces“. In: *Wear*, 334, 2015, S. 1–12.

Tzanakis I./Hadfield, M./Thomas, B./Noya, S.M./Henshaw, I./Austen, S.: „Future Perspectives on Sustainable Tribology“. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16: 6, 2012, S. 4126–4140.

Wood, R.J.K./Bahaj, A.S./Turnock, S.R./Wang, L./Evans, M.: „Tribological Design Constraints of Marine Renewable Energy Systems“. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 368: 1929, 2010, S. 4807–4827.

10 | Vgl. Nosonovsky/Bhushan 2010, S. 4677–4696.

11 | Vgl. Wood et al. 2010, S. 480–4827.



8 Querschnittsthemen und Methoden

Isolde Arzberger, Harald Bolt, Forschungszentrum Jülich

Wie in den vorangegangenen Kapiteln dargestellt, ist ein beschleunigter Innovationszyklus im Bereich der Materialien und Werkstoffe Ausgangspunkt für die Wertschöpfung und letztlich für die erfolgreiche Implementierung der meisten Energietechnologien. Das Verständnis des Materialverhaltens und der bei Erzeugungs- und Wandlungsprozessen während des Betriebs von Energieanlagen auftretenden Vorgänge auf atomarer bis Gefüge-Ebene bildet als Startpunkt der Produktionskette die Grundlage für die Entwicklung effizienter Energietechnologien.

Eine maßgebliche Verkürzung der Entwicklungszeiten für neue Energiematerialien ist dann zu erwarten, wenn es gelingt, die Eigenschaften von Werkstoffen in Abhängigkeit von der Werkstoffzusammensetzung, den Herstellungsverfahren und der Verarbeitung zu Verbund, Komponente oder System vorherzusagen beziehungsweise Werkstoffe bereits in der Designphase gezielt mit den jeweils erforderlichen Eigenschaften maßzuschneidern.

Eine zentrale Anforderung an alle Energietechnologien besteht in der hohen Haltbarkeit von Anlagen und Komponenten, die mit typischerweise zehn bis vierzig Jahren eine Größenordnung über der Lebensdauer üblicher Konsumgüter liegt. Die notwendigen langfristigen Investitionsentscheidungen in diesem Sektor erfordern deshalb eine hohe Sicherheit in Bezug auf die Dauerhaftigkeit der verwendeten Anlagenkomponenten, welche sich in vielen Fällen auf Materialfragestellungen zurückführen lässt. Wissensbasierte Methoden zur Abschätzung der Lebensdauer von Bauteilen und Komponenten haben daher bedeutenden wirtschaftlichen Einfluss auf die Installation und den Betrieb von Energieanlagen. Den verschiedenen technologischen Anforderungen entsprechend sind dabei sowohl keramische als auch metallische Materialien und deren Verbunde zu betrachten, wobei die Anwendungen der Materialien sowohl im strukturellen als auch im funktionalen Bereich liegen können.

Zur Bearbeitung dieser Fragestellungen ist ein wissenschaftlicher Ansatz notwendig, der die enge Wechselwirkung der elektronischen, mechanischen und thermischen Struktur- und Betriebseigenschaften von Materialsystemen, Bauelementen und

Großkomponenten intensiv mit den Analysemethoden einerseits und den Herstellungsverfahren andererseits verknüpft. Dabei müssen Skalen von atomar bis makroskopisch und Zeiträume von Picosekunden über Reaktionen im Stundenbereich bis zur vollständigen Lebensdauer von Energiesystemen erfasst werden. Schlüssel zu diesen Erkenntnissen ist eine speziell auf Energiematerialien abzielende Weiterentwicklung methodischer Kompetenzen auf den Gebieten „Charakterisierung/Analytik“ und „Simulation/Materialmodellierung“. Besonderes Augenmerk ist in diesem Zusammenhang auf die querschnittliche und konzertierte Nutzung der Methoden zu legen, welche über die konkrete Energietechnologie hinaus reicht und somit Synergien im Hinblick auf eine wechselseitige Validierung der Ergebnisse schafft. Die Nutzung dieser Methoden ermöglicht eine gezielte Vorauswahl von Materialien im Sinne eines „Screening“, welches dazu beiträgt, Entwicklungszeiten wesentlich zu verkürzen.

Eine große Bandbreite an Methoden zur Materialcharakterisierung gewährt heute auf verschiedenen räumlichen und zeitlichen Skalen Einblicke in die strukturellen und funktionalen Eigenschaften von Energiematerialien und liefert entscheidende Erkenntnisse für ihre Anwendungspotenziale. Neben der Weiterentwicklung der verschiedenen Struktursonden beispielsweise aus den Bereichen Elektronenmikroskopie oder Tomographie erfordern die Fragestellungen zur Funktionalität beziehungsweise Haltbarkeit von Materialien unter Betriebsbedingungen aber zunehmend neue beziehungsweise kombinierte Techniken, welche die In-situ- beziehungsweise In-operando-Beobachtung von Werkstoffen und Komponenten erlauben. Dies ist besonders wichtig für elektrochemische und elektronische Materialien, hat aber auch hohe Bedeutung für Materialien unter extremen beziehungsweise schnell wechselnden Betriebsbedingungen, wie sie durch den zunehmenden Anteil an fluktuierenden Quellen im Energiesystem generiert werden. Die Entwicklung und Nutzung experimenteller Schlüsseltechnologien für die Materialforschung erfordert einen multidisziplinären Ansatz und ist kosten- und zeitaufwendig. Daher ist für die Entwicklung von Energiematerialien über die Weiterentwicklung einzelner Charakterisierungsmethoden hinaus eine synergetische Nutzung vielfältiger Techniken sinnvoll, die eine komplementäre Gesamtschau auf Materialstrukturen oder Herstellungsprozesse ermöglicht. Es sind also Strategien zu entwickeln, bei denen verschiedenste der aktuellsten analytischen Methoden Anwendung finden und Ergebnisse aus diesen parallel betrachtet werden, da nur auf diese Weise komplexe Multiskalenprobleme bei Energiematerialien gelöst werden können. Eine Möglichkeit hierfür bieten auf verschiedenen Ebenen entstehende Nutzerplattformen mit spezieller Ausrichtung auf die Charakterisierung von Werkstoffen der Energietechnik.

Wie insgesamt für die Prozessoptimierung in Wirtschaft und Wissenschaft hat die Modellierung und Computersimulation im vergangenen Jahrzehnt auch eine Schlüsselrolle für die Werkstoff- und Bauteilentwicklung übernommen. Die virtuelle Laborumgebung der numerischen Berechnung und der hochauflösenden Visualisierung stellt eine moderne, zeit- und ressourcensparende Technologie zur Entwicklung von Werkstoffen zur Verfügung. Für die Entwicklung von Energiematerialien müssen skalenübergreifende Modellierungsansätze (von Atomen/Ionen bis zum Werkstoffverbund und auf allen Zeitskalen) eingesetzt werden, um das Gefüge von der Nano- bis zur Mesostruktur in den verschiedenen Funktionszusammenhängen korrekt darzustellen und zu modellieren. Dies beinhaltet auch die Modellierung von Grenzflächenvorgängen (externe und interne Grenzflächen sowie Korngrenzen), die Eigenschaften und Werkstoffverhalten komplett verändern können. Insbesondere die Modellierung und Simulation von Degradationsprozessen nimmt bei der Materialentwicklung eine wichtige Rolle ein, da hierdurch das grundlegende Prozessverständnis vom Nano- beziehungsweise Mikrostrukturlevel auf das mesoskopische und das makroskopische Niveau übertragen werden kann und sich auch große Zeitskalen betrachten lassen, die experimentell nur selten zugänglich sind, aber für die Lebensdauer von Energieanlagen essenzielle Bedeutung haben.

Der Zugang zu umfassenden und effizienten Modellierungsmethoden in Verbindung mit der Nutzung von Höchstleistungsrechnern ermöglicht die notwendige skalenübergreifende Modellierung von Herstellprozessen, Eigenschaften und Betriebsverhalten von Energiewerkstoffen. Die Fragestellungen umfassen neben thermodynamischen, optischen und elektronischen Eigenschaften zunehmend auch die Simulation komplexer, dynamischer 3D-Transportmechanismen. Die Anwendung entsprechender Hochleistungsrechenmethoden zur Darstellung dieser komplexen Materialfragestellungen bei Energietechnologien ist folglich zu einem entscheidenden wissenschaftlichen Instrument geworden. Eine entsprechende Vorgehensweise erfordert Rahmenbedingungen, welche die intensive multidisziplinäre Zusammenarbeit der nah an den Energieanwendungen arbeitenden Werkstoffwissenschaften mit den Hochleistungsrechenmethoden ermöglichen und fördern.

Weiterführendes Ziel und verbindende Grundidee der übergreifenden methodischen Ansatzpunkte bei der Entwicklung von Energiematerialien ist das proaktive computergestützte Design von Materialien mit gezielt an die Anwendung angepassten Eigenschaften. In enger Wechselwirkung mit und Rückkopplung der Ergebnisse aus der Computersimulation werden strukturelle

und funktionale Eigenschaften mit besonderem Augenmerk auf In-situ- beziehungsweise In-operando-Verhalten der Materialien experimentell untersucht. Die entsprechenden Charakterisierungsmethoden liefern einerseits wichtige Eingangsparameter für die Simulation und sind andererseits für die Überprüfung der im Labor entwickelten Strukturen und Eigenschaften unverzichtbar. Modellierungs-, Simulations- und Charakterisierungsmethoden greifen folglich ineinander, indem die Ergebnisse aus der Modellierung in die Materialentwicklung einfließen und umgekehrt eine direkte Rückkopplung der Ergebnisse der Charakterisierung beziehungsweise Untersuchungen unter Lastbedingungen in die Modellbildung erfolgt. Beginnend bei der atomaren Skala soll so der Einfluss der Struktur und Strukturbildung auf die elektrischen, elektronischen oder mechanischen Eigenschaften und damit auf die Funktionalität der Materialien vorausgesagt werden. Simulationen auf der mesoskopischen und makroskopischen Ebene sollen schließlich Vorhersagen des Verhaltens von Materialien und Bauelementen, Baugruppen oder Systemen in ihren jeweiligen Funktionsumfeldern ermöglichen.

Eine zielgerichtete, beschleunigte Entwicklung und Optimierung von Materialien für Energieanwendungen erfordert somit die parallele Nutzung von experimentellen analytischen Methoden sowie die konzertierte Weiterentwicklung von Modellierungs- und Simulationstools im Sinne einer Multiskalenbetrachtung. Gemeinsame Plattformen und Infrastrukturen in Bezug auf Materialentwicklung, Herstellprozesse, Materialcharakterisierung und Werkstoffmodellierung und -simulation können folglich für Forschung und Industrie die Voraussetzungen schaffen, um diese Querschnittskompetenzen in optimaler Weise zur Beschleunigung der Innovationszyklen in der anwendungsbezogenen Entwicklung von Energiewerkstoffen zu nutzen.

Literatur

Dosch, H./Van de Voorde, M.H. (Hrsg.): „Energy Technology“ (Kapitel 5.6), „Key Challenges for Nanomaterial Technologies – Energy Technology“ (Kapitel 11.5.6). In: *GENNESYS (Grand European Initiative on Nanoscience and Nanotechnology Using Neutron- and Synchrotron Radiation Sources) White Paper*, 2009.

Europäische Kommission (Hrsg.): *Implementation of the SET Plan Roadmap Materials for Low Carbon Technologies. Recommendations to the SET Plan Steering Group and to the European Commission*, 2013.



Europäische Kommission (Hrsg.): *Technology and Market Perspective for Future Value Added Materials*, 2012.

European Technology Platform for Advanced Engineering Materials and Technologies (Hrsg.): *Strategic Research Agenda*, 2. Auflage, 2012.

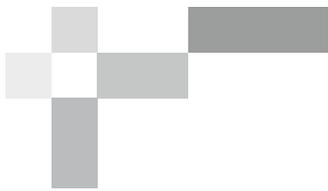
U.S. Department of Energy/Energy Efficiency & Renewable Energy (Hrsg.): *Linking Transformational Materials and Processing for an Energy Efficient and Low-Carbon Economy: Creating the Vision and Accelerating Realization* (mehrphasige Projektstudie), USA, 2010-2012.



acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften

acatech vertritt die deutschen Technikwissenschaften im In- und Ausland in selbstbestimmter, unabhängiger und gemeinwohlorientierter Weise. Als Arbeitsakademie berät acatech Politik und Gesellschaft in technikwissenschaftlichen und technologiepolitischen Zukunftsfragen. Darüber hinaus hat es sich acatech zum Ziel gesetzt, den Wissenstransfer zwischen Wissenschaft und Wirtschaft zu unterstützen und den technikwissenschaftlichen Nachwuchs zu fördern. Zu den Mitgliedern der Akademie zählen herausragende Wissenschaftler aus Hochschulen, Forschungseinrichtungen und Unternehmen. acatech finanziert sich durch eine institutionelle Förderung von Bund und Ländern sowie durch Spenden und projektbezogene Drittmittel. Um den Diskurs über technischen Fortschritt in Deutschland zu fördern und das Potenzial zukunftsweisender Technologien für Wirtschaft und Gesellschaft darzustellen, veranstaltet acatech Symposien, Foren, Podiumsdiskussionen und Workshops. Mit Studien, Empfehlungen und Stellungnahmen wendet sich acatech an die Öffentlichkeit. acatech besteht aus drei Organen: Die Mitglieder der Akademie sind in der Mitgliederversammlung organisiert; das Präsidium, das von den Mitgliedern und Senatoren der Akademie bestimmt wird, lenkt die Arbeit; ein Senat mit namhaften Persönlichkeiten vor allem aus der Industrie, aus der Wissenschaft und aus der Politik berät acatech in Fragen der strategischen Ausrichtung und sorgt für den Austausch mit der Wirtschaft und anderen Wissenschaftsorganisationen in Deutschland. Die Geschäftsstelle von acatech befindet sich in München; zudem ist acatech mit einem Hauptstadtbüro in Berlin und einem Büro in Brüssel vertreten.

Weitere Informationen unter www.acatech.de



Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Harald Bolt
Forschungszentrum Jülich GmbH
Wilhelm-Johnen-Straße
52425 Jülich

Isolde Arzberger
Forschungszentrum Jülich GmbH
Wilhelm-Johnen-Straße
52425 Jülich

Prof. Dr.-Ing. Christina Berger
Technische Universität Darmstadt
Institut für Werkstoffkunde
Grafenstraße 2
64283 Darmstadt

Reihenherausgeber:
acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, 2017

Geschäftsstelle
Karolinenplatz 4
80333 München
T +49 (0)89/52 03 09-0
F +49 (0)89/52 03 09-900
info@acatech.de
www.acatech.de

Hauptstadtbüro
Pariser Platz 4a
10117 Berlin
T +49 (0)30/2 06 30 96-0
F +49 (0)30/2 06 30 96-11

Brüssel-Büro
Rue d'Egmont/Egmontstraat 13
1000 Brüssel (Belgien)
T +32 (0)2/2 13 81-80
F +32 (0)2/2 13 81-89

Empfohlene Zitierweise:

Bolt, H./Arzberger, I./Berger, C. (Hrsg.): *Werkstoffe und Materialien für die Energiewende* (acatech MATERIALIEN), München: Herbert Utz Verlag 2017.

ISSN 2191-8481/ISBN 978-3-8316-4505-3

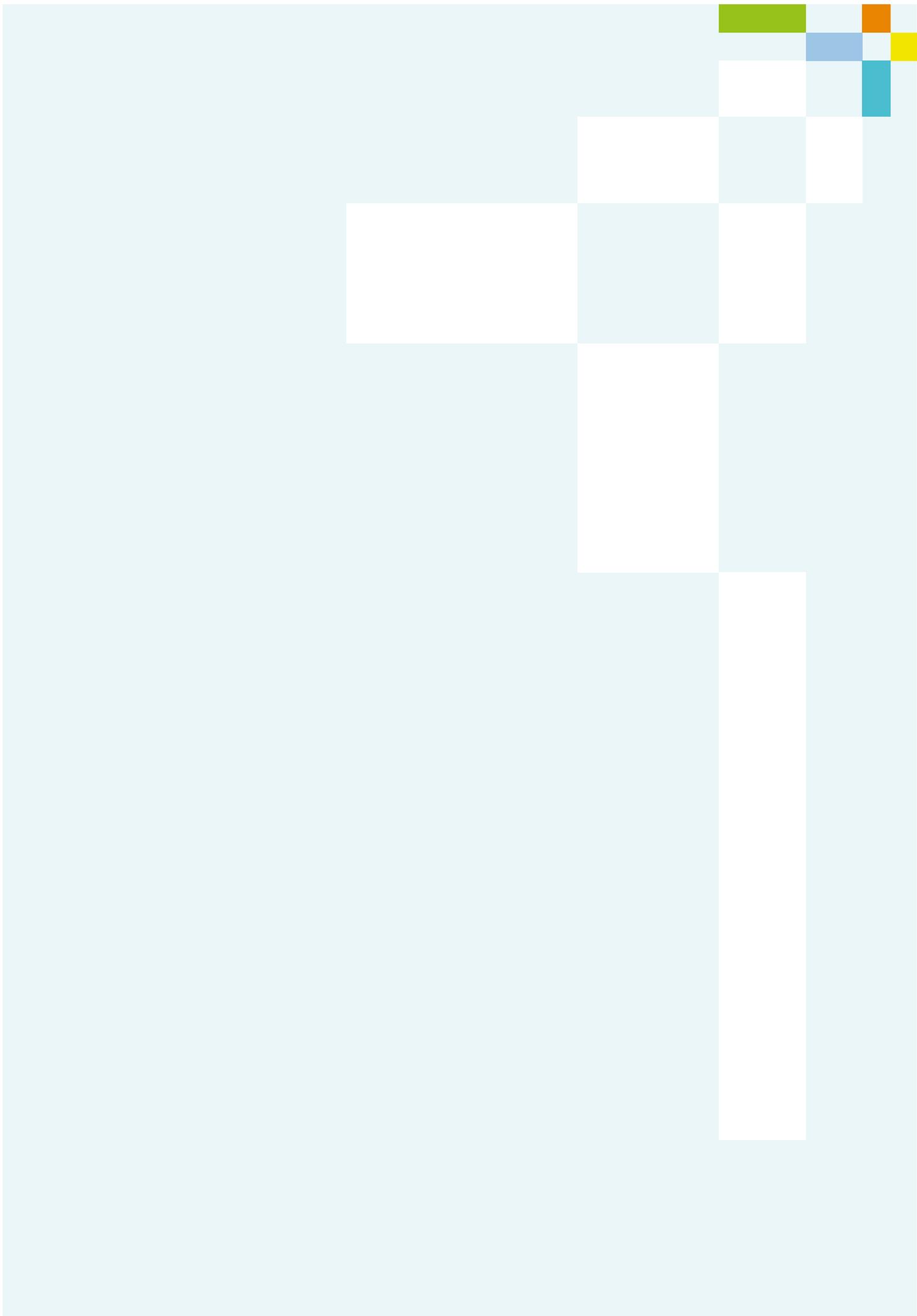
Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie;
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

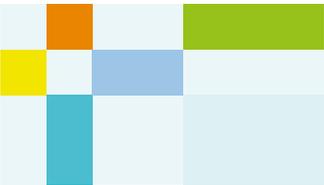
Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Widergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH • 2017

Koordination: Dr. Martina Kohlhuber
Redaktion: Dr. Isolde Arzberger, Dr. Martina Kohlhuber
Layout-Konzeption: Groothuis, Hamburg
Konvertierung und Satz: Fraunhofer IAIS, Sankt Augustin

Printed in EC
Herbert Utz Verlag GmbH, München
Die Originalfassung der Publikation ist verfügbar auf www.utzverlag.de





Fragen der Material- und Werkstoffkunde spielen für den Umbau des Energiesystems in Deutschland eine wichtige Rolle. Der Betrieb bestehender Energieanlagen lässt sich durch den Einsatz alternativer Werkstoffsysteme optimieren und verlängern. Neuartige Material- bzw. Werkstoffsysteme ermöglichen zugleich Produktinnovationen im Bereich der regenerativen Energieversorgung. Für die Beurteilung und Entwicklung neuer Materialien und Werkstoffe gewinnt ein modell- und simulationsbasiertes Vorgehen zunehmend an Bedeutung.

Die vorliegende acatech Publikation analysiert die Rolle von Materialien und Werkstoffen in den für den Energiesektor wesentlichen Funktionsbereichen. Der Fokus liegt auf Materialklassen mit elektrochemischen und photoelektronischen Eigenschaften, Werkstoffen für Leichtbauanwendungen sowie Werkstoffen für lastflexible Kraftwerke. Beleuchtet werden zudem spezifische Anforderungen an materialwissenschaftliche Methoden, insbesondere an Modellierung und Simulation, sowie die Rolle der Charakterisierung von Materialien.

ISBN 978-3-8316-4505-3



9 783831 645053