

# POSITIONSPAPIER



## Chemie als ein Innovationstreiber in der Materialforschung



DECHEMA

DGM

GDCh

GESELLSCHAFT  
DEUTSCHER CHEMIKER



VCI

## IMPRESSUM

### Herausgeber

**DBG** – Deutsche Bunsen-Gesellschaft für Physikalische Chemie e.V.  
Theodor-Heuss-Allee 25, 60486 Frankfurt am Main, [www.bunsen.de](http://www.bunsen.de)

**DECHEMA** – Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.  
Theodor-Heuss-Allee 25, 60486 Frankfurt am Main, [www.dechema.de](http://www.dechema.de)

**DGM** – Deutsche Gesellschaft für Materialkunde e.V.  
Senckenberganlage 10, 60325 Frankfurt am Main, [www.dgm.de](http://www.dgm.de)

**GDCh** – Gesellschaft Deutscher Chemiker e.V.  
Varrentrappstraße 40-42, 60486 Frankfurt am Main, [www.gdch.de](http://www.gdch.de)

**VCI** – Verband der Chemischen Industrie e.V.  
Mainzer Landstraße 55, 60329 Frankfurt am Main, [www.vci.de](http://www.vci.de)

unter Vorsitz von Prof. Dr. Michael Dröscher, GDCh, Frankfurt am Main

### Verantwortlich im Sinne des Presserechts

DECHEMA e.V.  
Dr. Andreas Förster  
Theodor-Heuss-Allee 25  
60486 Frankfurt am Main

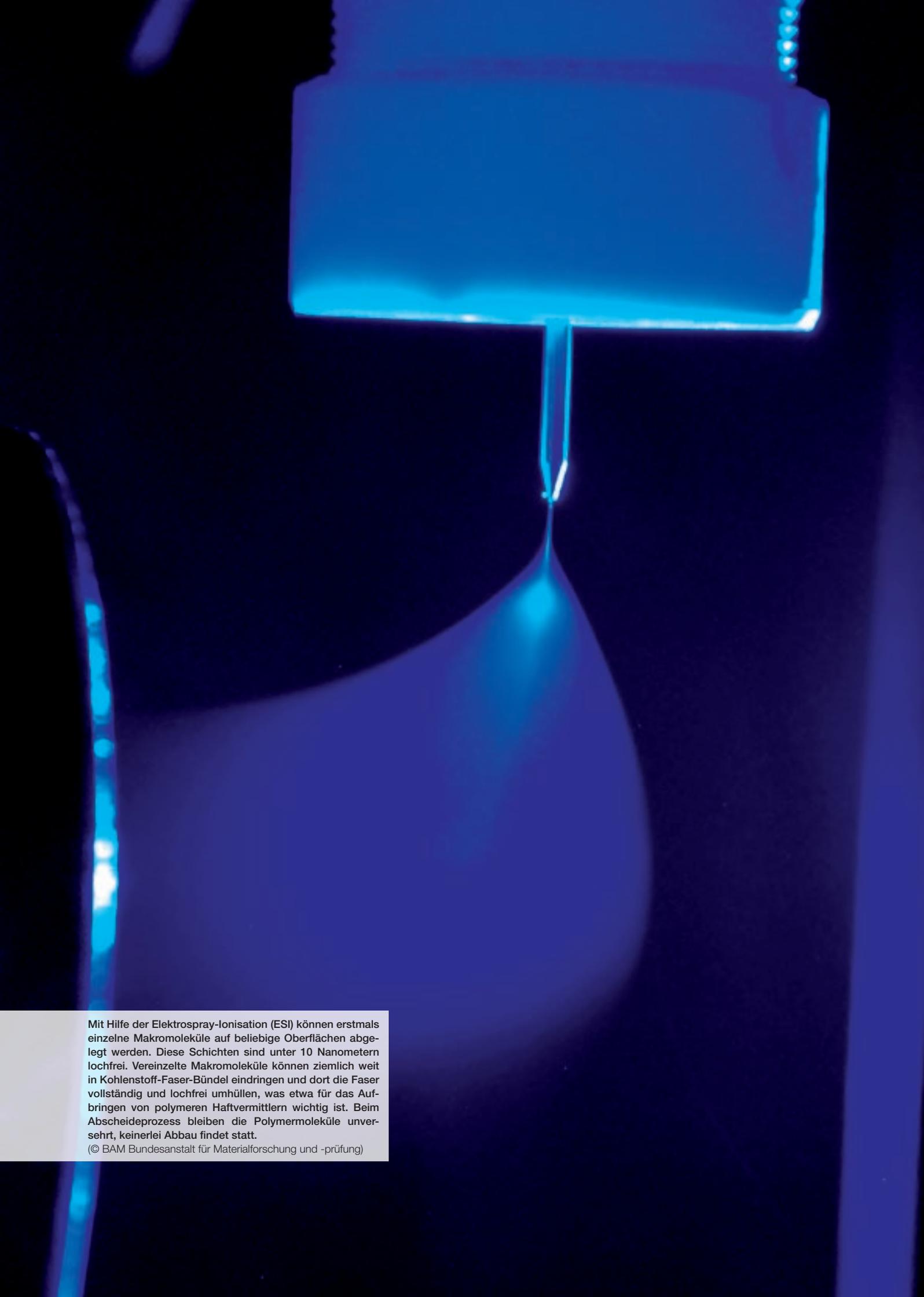
Erschienen im Dezember 2012

ISBN: 978-3-89746-140-6

### Fotonachweis:

Bilder von Fotolia.com: Titelbild o. R. v.l.: Thaut Images, Stefan Körber, Erwin Wodicka, Fantasista, catsnfrogs; Titelbild u. R. ab 2. v.l.: richterfoto, Ingo Bartussek, adimas; S. 6: Lemonade; S. 9: luchschen@web.de (oben), Stefan Körber (unten); S. 10: C.S. Drewer; S. 29: J. Scheffl; S.40: violetkaipa; S. 46: arsdigital; S. 49: Ingo Bartussek; S. 50: Maria Aloisi; S. 60: Max Diesel; S. 65: Stefan Körber, Erwin Wodicka.  
Weitere Bilder: Titelbild u. R. links: iStockphoto.com/Shawn Hempel; S. 27: Thomas Track.

<b>1.</b>	<b>Einführung und Zielsetzung</b>	<b>5</b>
<b>2.</b>	<b>Die Rolle der Chemie in der Materialforschung</b>	<b>6</b>
<b>3.</b>	<b>Innovationspotential der chemischen Materialforschung – Beispiele</b>	<b>8</b>
<b>4.1</b>	<b>Materialien für die Energieversorgung</b>	<b>10</b>
4.1.1.	Gewinnung von Strom aus Sonnenlicht	10
4.1.2.	Brennstoffzellentechnik	13
4.1.3.	Thermoelektrika	15
4.1.4.	Weiterentwicklung von Kraftwerkstechnologie	16
4.1.5.	Wärmedämmschichten	18
4.1.6.	Materialien für Kollektoren	18
<b>4.2</b>	<b>Materialien für die Energiespeicherung</b>	<b>20</b>
4.2.1.	Stromspeicherung	20
4.2.2.	Thermische Energiespeicher	23
<b>4.3.</b>	<b>Materialien für den Umweltschutz</b>	<b>25</b>
4.3.1.	Stoffabtrennung und -reinigung	25
4.3.2.	Wasser- und Abwasseraufbereitung	26
<b>4.4.</b>	<b>Materialien für die Mobilität</b>	<b>29</b>
4.4.1.	Leichtbau	29
4.4.2.	Korrosionsschutz	33
4.4.3.	Mobile Stromspeicher	34
4.4.4.	Hochtemperaturprozesse	36
<b>4.5.</b>	<b>Materialien für die medizinische Technik</b>	<b>37</b>
<b>4.6.</b>	<b>Materialien für die Informations- und Kommunikationstechnik (IKT)</b>	<b>40</b>
4.6.1.	Organische Transistoren	40
4.6.2.	Organische Speicher	41
4.6.3.	Organische Leuchtdioden	42
<b>4.7.</b>	<b>Materialien für die Sicherheitstechnik</b>	<b>46</b>
4.7.1.	Detektionssysteme	46
4.7.2.	Persönliche Schutzausrüstung	48
<b>4.8.</b>	<b>Materialien für Bedarfsgegenstände</b>	<b>50</b>
4.8.1.	Materialien und Gegenstände mit Lebensmittelkontakt	51
4.8.2.	Kunststoffverpackungen	52
4.8.3.	Textilien	54
4.8.4.	Waschmittel und Reinigungsmittel	57
4.8.5.	Klebstoffe	58
<b>4.9.</b>	<b>Materialien für Bauen, Wohnen und Infrastruktur</b>	<b>60</b>
<b>5.</b>	<b>Rohstoffsicherung durch Recycling und effiziente Kreislaufwirtschaft</b>	<b>65</b>
<b>6.</b>	<b>Liste der Autoren</b>	<b>71</b>



Mit Hilfe der Elektrospray-Ionisation (ESI) können erstmals einzelne Makromoleküle auf beliebige Oberflächen abgelegt werden. Diese Schichten sind unter 10 Nanometern lochfrei. Vereinzelt Makromoleküle können ziemlich weit in Kohlenstoff-Faser-Bündel eindringen und dort die Faser vollständig und lochfrei umhüllen, was etwa für das Aufbringen von polymeren Haftvermittlern wichtig ist. Beim Abscheideprozess bleiben die Polymermoleküle unversehrt, keinerlei Abbau findet statt.

(© BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung)

# 1. Einführung und Zielsetzung

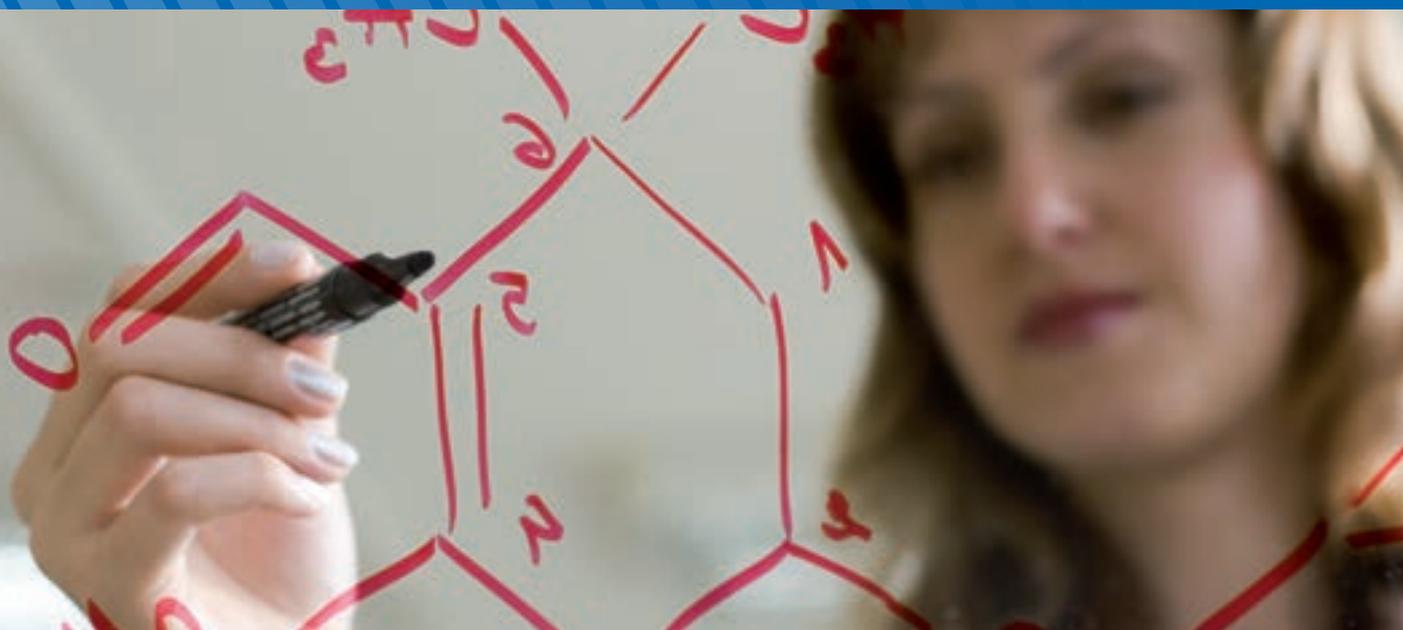
Die Entwicklung neuer Materialien zur Lösung drängender Zukunftsfragen ist eine der großen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts. Diese neuen Materialien sind der Schlüssel für die Gestaltung der Zukunft: Sie müssen unter anderem einen nachhaltigen Umgang mit Ressourcen, eine nachhaltige Energieversorgung, Mobilität, Konsum sowie neue Diagnose- und Therapiemöglichkeiten im Gesundheitswesen ermöglichen. Ein vertieftes Verständnis von Materialien und Werkstoffen, ihrer chemischen Natur, Architektur, Funktionalisierung, Verarbeitungs- und Einsatzmöglichkeiten bildet die Grundlage für die Wettbewerbsfähigkeit des produzierenden Gewerbes und der Industrie in Deutschland und Europa. Die gegenwärtig auf europäischer Ebene diskutierte Stärkung der industriellen Basis setzt eine weitere Intensivierung der Material- und Werkstoffforschung voraus. Aufgrund seiner hohen Bedeutung für die Zukunft unserer Gesellschaft ist das Thema der Materialwissenschaft und Werkstofftechnik ein wichtiger Aspekt in der Hightech-Strategie der Bundesregierung. Dies wird unter anderem im 10-Punkteprogramm des Bundesministeriums für Bildung und Forschung verdeutlicht.

Die Materialforschung ist ein dynamisches Arbeitsgebiet, in dem der Erfolg auf der Zusammenarbeit verschiedener Disziplinen beruht. Je nach Zielrichtung arbeiten Chemiker, Physiker, Ingenieure, Materialwissenschaftler und Werkstofftechnologe gemeinsam mit Biologen, Medizinern und Experten anderer Fachrichtungen an speziellen Lösungen auf Basis innovativer Materialien und Werkstoffe für fast alle gesellschaftlichen Bedarfsfelder. Dieses Papier setzt sich insbesondere mit der Rolle der Chemie innerhalb dieses Entwicklungsprozesses auseinander. Zur Etablierung von innovativen Materialien leistet die Chemie einen wichtigen Beitrag.

Die Chemie ist die „Wissenschaft der Stoffe“, der stofflichen Veränderungen und der Verknüpfung von Aufbau und Materialeigenschaften. Dabei beschreibt sie die Wechselwirkungen zwischen einzelnen Substanzen und untersucht deren Stabilität und Reaktivität. Optimierte Materialeigenschaften benötigen ein vertieftes Verständnis von Materialstruktur und –zusammensetzung, inklusive der Funktionsweise von Additiven und vielem mehr. Daher haben zahlreiche neue Materialien ihren Ursprung in chemischen Laboratorien. Zudem ist chemische Erfahrung notwendig für das Verständnis der Produktion, Verarbeitung und Anwendung von Materialien mit optimaler Funktion und Qualität. Sie leistet somit über die gesamte Wertschöpfungskette einen Beitrag zur Materialwissenschaft und Werkstofftechnik.

Im vorliegenden Papier wird dargestellt, welchen Beitrag die Chemie zur Materialforschung, bezogen auf verschiedene Bedarfsfelder, leistet. Die Entwicklungspotentiale und der entsprechende Forschungsbedarf für das nächste Jahrzehnt werden zusammengefasst.

Durch explizite Fördermaßnahmen zur Stärkung der Chemie- und Materialforschung in enger Vernetzung mit allen beteiligten Fachdisziplinen können rasch optimale Lösungen für die drängenden Zukunftsfragen der jeweiligen Bedarfsfelder entwickelt werden. Diese Maßnahmen müssen sowohl die Grundlagen- als auch die anwendungsorientierte Forschung umfassen, wobei insbesondere die Brücke zwischen der Grundlagenforschung und der Anwendungsforschung in Deutschland gestärkt werden sollte. Nur so ist der Hochtechnologiestandort Deutschland auch für zukünftige Herausforderungen auf dem Gebiet der Material- und Werkstoffwissenschaften gut aufgestellt; dies ist eine wesentliche Grundlage für die Wettbewerbsfähigkeit des produzierenden Gewerbes und der Industrie.



## 2. Die Rolle der Chemie in der Materialforschung

**Die Bedeutung der Chemie als ein Innovationstreiber in der Materialforschung nimmt stetig zu. Mit dem Anspruch, die gesamte stoffliche Welt zu erfassen und zu begreifen, ist die Chemie immer gefragt, wenn es um die Suche nach neuen Materialien geht.**

Das grundlegende Verständnis für die stofflichen Eigenschaften entsteht aus der Kenntnis und Kontrolle über Elemente, Verbindungen und Architekturen auf atomarer und molekularer Ebene. Dieses Verständnis ist unerlässlich, wenn Materialien gesucht werden, die besonderen Ansprüchen genügen sollen.

Die Kenntnis im Bereich der stofflichen Umwandlung, der Wechselwirkungen der einzelnen Stoffe und Materialien in Herstellung und Gebrauch sowie der bestmöglichen Rückführung am Ende ihrer Lebenszeit führen dazu, dass Chemiker benötigt werden, wenn grundsätzlich neue Wege und Lösungen gesucht werden müssen.

Zudem sind im Hinblick auf die Beurteilung von Stoffen bezüglich der gesetzlichen Vorgaben insbesondere die Chemiker innerhalb der Materialforschung gefragt. Chemiker haben somit eine wichtige Rolle entlang der gesamten Wertschöpfungskette der Materialwissenschaft und Werkstofftechnik inne und ermöglichen in Zusammenarbeit mit Akteuren anderer Fachdisziplinen durchgreifende Materialinnovationen.

Der Wirtschaftserfolg in Deutschland beruht zunehmend auf hoch entwickelten und veredelten Produkten mit hoher Wertschöpfung. Dagegen gerät die Produktion von Basismaterialien und -werkstoffen verstärkt unter Kostendruck. Deshalb spielt die Entwicklung von hochwertigen Hochleistungsmaterialien und Materialien mit ganz neuen Eigenschaften eine immer wichtigere Rolle für die Konkurrenzfähigkeit Deutschlands. Chemiker müssen heute mehr denn je die stofflichen Anforderungen von Technologien entlang der gesamten Wertschöpfungskette in unterschiedlichen Anwendungsgebieten bearbeiten. Dabei nimmt die Komplexität moderner Technologien weiter zu. Immer mehr Fragestellungen können überhaupt nur durch interdisziplinäre Ansätze gelöst werden. Gerade Chemiker verfügen über das Wissen und die Netzwerke, zusammen mit den Nachbardisziplinen erfolgreiche Lösungen zu erarbeiten. Sie sind die Experten für das chemisch Mögliche.

Auch in Zukunft muss das Studium der Chemie dem Nachwuchs einen sowohl breiten wie auch tiefen Einblick in die stoffliche Vielfalt vermitteln, denn dieser befähigt den Chemiker in der Materialforschung zum Brückenschlag zwischen ganz verschiedenen Disziplinen – z.B. zwischen der anorganischen Chemie und der Medizin, zwischen der Polymerchemie und der Metallurgie. Um der stetig wachsenden Bedeutung der Chemie innerhalb der Materialforschung gerecht zu werden, ist es Voraussetzung, dass Studiengänge der Chemie dem Nachwuchs auch materialwissenschaftliche Grundlagen vermitteln. Im gleichen Zuge muss die Chemie einen noch besseren Eingang in materialwissenschaftliche und ingenieurtechnische Studiengänge finden. Grundsätzlich spielt die Intensivierung der Kommunikation zwischen den beteiligten Disziplinen in der Materialforschung eine wichtige Rolle.

Damit Deutschland weiterhin eine wissenschaftliche und wirtschaftliche Führungsrolle in der Materialwissenschaft und Werkstofftechnik einnehmen kann, führt an der Förderung von Forschung und Lehre in der Chemie kein Weg vorbei.

**Dazu müssen folgende Maßnahmen ergriffen werden:**

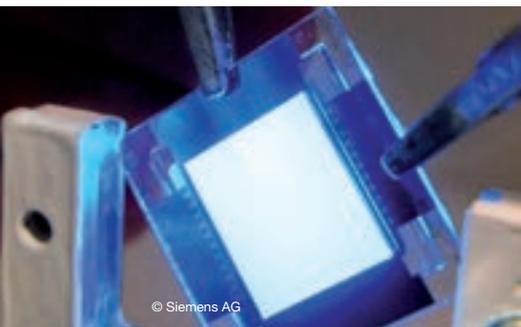
1. Die Chemie ist der Motor für stoffliche Innovationen. Dabei ist sie mehr als ein „Lieferant“ für neue Materialien – sie eröffnet vielmehr durch eine wissensbasierte Funktionalisierung von Materialien neue Wege in zukünftige Technologien. Hierfür sind verstärkte Anstrengungen in Forschung und Entwicklung gemeinsam mit den benachbarten Disziplinen notwendig.
2. Die Breite der chemischen Grundausbildung, bei Betonung materialwissenschaftlicher Fragestellungen, muss erhalten bleiben, um die Rolle des Chemikers als Experte für Materialien zu stärken.
3. Die Zusammenarbeit aller beteiligten Akteure entlang der gesamten Wertschöpfungskette von der Grundlagenforschung über die Verfahrenstechnik bis hin zur Produktion muss gestärkt werden.

### 3. Innovationspotential der chemischen Materialforschung – Beispiele

Neue Technologien sowie die dazugehörigen Produkte sind insbesondere mit der Entwicklung neuer Materialien verbunden. So haben beispielsweise Entwicklungen im Bereich der Metalllegierungen und ihrer Nanostrukturierung zur Entdeckung von Materialien mit speziellen magnetischen Eigenschaften beigetragen, womit Festplatten mit Speicherkapazitäten von mehreren Terabytes möglich wurden.

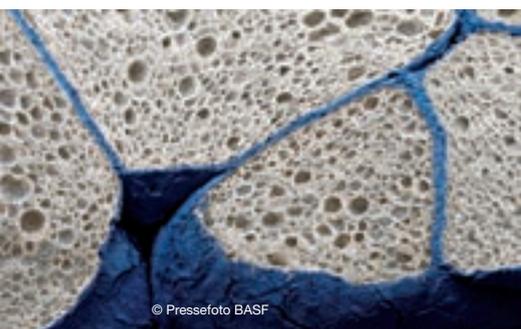
Doch nicht nur die Informations- und Kommunikationstechnologie benötigt verbesserte Funktionsmaterialien. Auch die anderen Bedarfsfelder der Hightech-Strategie der Bundesregierung sind zwingend auf neue Materialien angewiesen, um die Fragen der Zukunft zu beantworten.

Aus der Chemie kommen beispielsweise Katalysatoren für die effizientere und nachhaltigere Produktion von Kunststoffen oder Düngemitteln. Typische Chemieprodukte sind aber auch Farbstoffe, Lacke, Pharmazeutika oder Waschmittel. Doch die Chemie besitzt darüber hinaus im Bereich der Materialwissenschaft und Werkstofftechnik eine enorme, manchmal weniger sichtbare Bedeutung. Nachfolgend sind deshalb beispielhaft einzelne Themenfelder hervorgehoben, bei denen der Beitrag der Chemie besonders wichtig ist.



#### Funktionsmaterialien für Elektronik und Energie

In der Elektronik (zum Beispiel bei Organischen Leuchtdioden) und im Bereich der Energieversorgung (Brennstoffzellen, Photovoltaik, Batterie-/Stromspeicher, etc.) werden Hochleistungsmaterialien benötigt. Bei der Entwicklung dieser Materialien, an die extrem hohe Reinheitsanforderungen gestellt werden, wirken Chemiker maßgeblich mit, sei es bei der Entwicklung von Polymeren für OLEDs für neuartige Displayanwendungen, der Entwicklung von Elektrolytmaterialien im Bereich der stationären und mobilen Stromspeicher oder der Entwicklung geeigneter Membransysteme für die Brennstoffzellentechnik.



#### Leichtbaumaterialien

Die Entwicklung von Leichtbaumaterialien stellt weiterhin eines der dringendsten Themen in der chemischen Materialforschung dar. Eine nachhaltig und energie- und ressourceneffizient agierende Gesellschaft ist zwingend auf leichtere Materialien, die gleichzeitig steif und fest sind, angewiesen. Schon heute werden Erkenntnisse aus der Luft- und Raumfahrt in die Entwicklung neuer Kraftfahrzeuge einbezogen. Doch nicht nur im Mobilitätssektor ist die Entwicklung von kostengünstigen und in großer Menge produzierbaren Hochleistungs-Leichtbaumaterialien zwingend notwendig. Auch andere Branchen wie zum Beispiel der Energiesektor (u.a. Windräder) oder der Bereich

Bauen und Wohnen benötigen dringend neue Lösungen. Die Chemie entwickelt Hightech-Materialien, zum Beispiel Carbonfasern, spezielle Schaumstoffe sowie Beschichtungen, die Leichtbaumaterialien jahrelang vor Witterungseinflüssen schützen. Des Weiteren leistet die Chemie im Leichtbau einen verbindenden Beitrag: Ohne Klebstoffe oder spezielle Harz-Härter-Systeme wären neuartige Verbundwerkstoffe nicht vorstellbar. Die eingesetzten Klebstoffe müssen dabei selbstverständlich maßgeschneidert für den jeweiligen Anwendungszweck sein, also stabil bei verschiedenen Temperaturen oder unter UV-Einstrahlung. Intensiver Forschungsbedarf besteht weiterhin in der Entwicklung von neuartigen Kunststoffen und polymerbasierten Verbundwerkstoffen. Um zu einem wirtschaftlicheren Einsatz von Klebstoffen zu gelangen, ist es zudem wichtig, Klebstoffe mit schnellerer Härtung bei mildereren Bedingungen zu entwickeln. Dadurch wird sowohl der Energieverbrauch gesenkt, als auch die Produktivität gesteigert.

#### Korrosionsschutz

Im Bereich des Korrosionsschutzes ist es weiterhin zwingend notwendig, chemische Lösungen für die Vermeidung von Materialschäden und damit einhergehende wirtschaftliche Schäden zu finden. Insgesamt beträgt der korrosionsbedingte Schaden 3-4 % des Bruttonationaleinkommens (BNE).

Nicht nur der konventionelle Energiesektor, wie beispielsweise im Falle von Korrosion an Hochtemperaturkesseln oder Turbinen, ist davon betroffen. Auch erneuerbare Energien leiden unter Korrosionsschäden. Besonderen Belastungen sind beispielsweise (Off-shore)-Windräder ausgesetzt. Rotor-schäden durch Wind und Wetter können die Energieausbeute bis zu über 20% verringern. Andere Bereiche, wie die Geothermie, die Brennstoffzellentechnik, die Solarenergie, maritime Technik, Verbrennungsmotoren und viele mehr benötigen ebenfalls dringend innovative Korrosionsschutzkonzepte.



Hier gilt es, wegen der steigenden Anforderungen an die technischen Systeme bei gleichzeitiger Veränderung der Einsatzrandbedingungen vor allem Entwicklungen im Bereich der Beschichtungswerkstoffe voran zu treiben. Zudem bedarf es weiterer Forschungsanstrengungen im Bereich der chemischen Nanotechnologie und der Entwicklung umweltfreundlicher Korrosionsinhibitoren zum Einsatz selbstheilender Materialien im Korrosionsschutz. Allen voran steht jedoch das bessere Verständnis von Korrosionsvorgängen durch eingehende Untersuchungen mittels hochauflösender Analysemethoden, insbesondere im Bereich der Elektrochemie.

#### Stoffkreisläufe und Substitutionsmaterialien

Nicht nur im Bereich der Synthese neuer Materialien, der Materialentwicklung und -optimierung für den jeweiligen Anwendungszweck spielt die Chemie eine wichtige Rolle. Auch wenn es darum geht, Materialien im Stoffkreislauf zu halten (bspw. durch Recycling) oder kritische Materialien zu substituieren, leisten Chemiker wesentliche Beiträge.

Nur, wenn auch die end-of-use und end-of-life Phasen neuer Materialien bereits bei der Entwicklung mit betrachtet werden, ist es möglich, nachhaltige Materialien und somit eine nachhaltige Infrastruktur am Hochtechnologiestandort Deutschland zu schaffen. Somit beschäftigen sich Chemiker bereits in frühen Phasen der Materialentwicklung mit diesem Thema, um die Materialauswahl im Hinblick auf ein effizientes Recycling zu optimieren.

Zudem arbeiten sie intensiv an der Substitution kritischer Rohstoffe und, falls dies nicht möglich ist, an einer Verringerung des Materialeinsatzes, beispielsweise durch chemische Nanotechnologie. All dies trägt dazu bei, Ressourcenengpässe innerhalb Deutschlands zu vermeiden.

Mit dem Wissen der Chemie können mit Seltenen Erden dotierte Kondensatoren durch leistungsfähigere Seltene Erden freie Kondensatoren ersetzt werden, und somit neue noch kleinere Superkondensatoren für die Informations- und Kommunikationselektronik geschaffen werden.

Zukünftig gilt es, die Entwicklung solcher Substitutionsmaterialien zu forcieren und zudem wirtschaftlichere Recyclingverfahren mit chemischer Endbehandlung zur Rückgewinnung der wertvollen Materialien zu entwickeln.





4,5 Prozent des bundesdeutschen Stromverbrauchs werden bereits durch Photovoltaikanlagen abgedeckt. Neue, effiziente und langlebige Solarmodule können dafür sorgen, dass dieser Anteil bis zum Jahr 2020 auf 10 Prozent anwächst.

## 4.1 Materialien für die Energieversorgung

### 4.1.1. Gewinnung von Strom aus Sonnenlicht

#### 4.1.1.1. Stand der Technik

Die heute installierte Photovoltaikleistung in Deutschland beträgt über 31 Gigawatt. Aufgrund von technisch bedingten Verlusten und uneinheitlicher Wetterlage ist jedoch deutschlandweit nur an sehr wenigen Tagen im Jahr eine reale Stromgeneration oberhalb 70% der installierten Nennleistung zu erwarten. Der verhältnismäßig rasche Zuwachs in den letzten Jahren ist ganz wesentlich auf die Subventionierung durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) zurückzuführen. Über 90 % der heute bereits installierten Solarmodule sind aus kristallinen Siliciumwafern gefertigt. Der Rest beruht auf Dünnschichtsolarzellen, von denen erwartet wird, dass ihr Marktanteil bis 2020 auf 20 % steigt.

Vergleichsweise neu am Markt sind organische Solarzellen (OSC). Der zunehmende Einsatz organischer Solarmodule ist für einige Anwendungen notwendig, da man sich davon aufgrund des erwarteten günstigen Preises, der schnellen Amortisation von Kosten und Rückgewinnung des zur Herstellung erforderlichen Energieaufwands sowie der großen Gestaltungsfreiheit die Erschließung ungenutzter Flächen an Gebäuden verspricht. Kleinere flexible Module gibt es kommerziell seit 2009, z. B. in Solarzellentaschen, die genutzt werden können, um Mobiltelefone aufzuladen.

Die Solarenergie leistet bereits heute einen entscheidenden Beitrag im Kampf gegen den Klimawandel und zum Ressourcenschutz und Energiewandel. Für das Jahr 2012 wird eine erzeugte Strommenge von ca. 28.000 GWh durch Photovoltaikanlagen in Deutschland erwartet. Dies entspricht in etwa 4,5 % des bundesdeutschen Stromverbrauchs. Ein Anwachsen dieses Anteils auf 10 % in 2020 und auf 25-30 % bis zum Jahr 2050 scheint durch neue, effiziente und langlebige Solarmodule mehr als möglich.

#### 4.1.1.2. Relevanz

Aus heutiger Sicht müssen erneuerbare Energien signifikante Anteile des sich bis 2050 verdoppelten Energiebedarfs der Erde decken. Für Deutschland muss dieses Szenario bereits früher erreicht werden, da die Bundesregierung im vergangenen Jahr den Ausstieg aus der Atomenergie bis 2020 beschlossen hat. Das Potential von Wind-, Wasser-, Biomasse- und geothermischer Energie zusammen reicht für diese Herausforderung nicht aus. Im Gegensatz hierzu übertrifft die auf der Erde ankommende Strahlungsleistung der Sonne den Energiebedarf der Erde

um mehrere Größenordnungen. Ziel der Entwicklungen im Bereich der Solarzellen muss es daher sein, hinreichend kostengünstige, effiziente und langlebige Technologien zu entwickeln, mit denen die Energiequelle Sonne genutzt werden kann.

Insbesondere bei den organischen Solarzellen wird in Zukunft erwartet, dass sie kontinuierlich in Größe und Performance weiterentwickelt werden können. Da Effizienzen und Lebensdauern stetig gesteigert werden, ist es das Ziel, kurzfristig neue Märkte, wie z. B. in Gebäuden integrierte Photovoltaik, zu erschließen. Mittelfristig werden auch die Märkte der netzunabhängigen Energieerzeugung mit organischen Solarzellen adressiert. Beträgt der aktuelle Markt für gedruckte bzw. potentiell druckbare Photovoltaik noch 260 Millionen Euro (2011), so wird bereits für 2021 eine Steigerung auf etwa 5,7 Milliarden EUR vorausgesagt.<sup>1</sup>

#### 4.1.1.3. Technisch-wissenschaftliche Herausforderungen

Im Fall der **Siliciumwafer-basierten Photovoltaik**, die derzeit den Markt dominiert, hat die Chemie einen maßgeblichen Anteil am Erfolg: Herstellung des reinen Siliciums, Schmier- und Kühlmittel für das Schneiden der Siliciumscheiben, chemische Bäder zur Beseitigung von Sägeschäden und zur Erzielung der benötigten Oberflächenstruktur, hochreine Dotierstoffe. Ein wesentlicher ökonomischer Faktor ist die Dicke der Wafer und damit die pro Fläche benötigte Menge an teurem Silicium. Diese Dicke konnte in den letzten 10 Jahren um etwa die Hälfte auf 180 µm reduziert werden, und es wird erwartet, dass in den nächsten Jahren die Wafer nochmals deutlich dünner werden. Der Modulwirkungsgrad konnte auf derzeit etwa 15 – 20 % gesteigert werden, und als zukünftiges Ziel werden deutlich über 20 % angesetzt.

Das Prinzip von **Dünnschichtsolarellen** beruht auf der Beschichtung großflächiger Substrate (Glas oder temperaturstabile Polymerfolien) mit geeigneten Halbleitermaterialien. Bei den derzeit bereits produzierten Systemen handelt es sich um amorphes Silicium (Si:H, derzeitige Moduleffizienz: 5 – 8 %) CdTe (9 – 10 % Effizienz) sowie Cu(In, Ga)Se<sub>2</sub> (10 – 12 % Effizienz). Ein entscheidender Vorteil aller drei Systeme besteht darin, dass nur eine sehr dünne Schicht von ca. 1 – 2 µm auf das Substrat aufgebracht wird, d.h. es existiert ein Kostenvorteil gegenüber den Siliciumwafer-basierten Systemen aufgrund des deutlich geringeren Bedarfs an aktivem Material. Der Kostenvorteil ist jedoch nur dann relevant, wenn der derzeit noch vorhandene Effizienzverlust verkraftbar ist.

Eine viel versprechende alternative Technologie zu Solarmodulen auf Silicium-Basis ist die **organische Photovoltaik**. Es existieren drei Kategorien von Systemen: a) Organische bzw. polymere Heterojunctions, b) Farbstoffsensibilisierte Zellen (Grätzel-Zelle), c) Hybride organisch-anorganische Systeme. Die Systeme der ersten Kategorie haben bislang im Labor Energieeffizienzen von 10 % erreicht. Um wirtschaftlich mit den existierenden Systemen konkurrieren zu können, wird jedoch ein Modulwirkungsgrad von über 10 % benötigt, was einem Zellwirkungsgrad von ca. 13 – 15 % im Labor entspräche. Derzeit rechnet man bis 2015 mit einer Verbesserung des Zellwirkungsgrades auf 12 %<sup>2</sup>. Ein Problem besteht auch in der Lebensdauer; hier werden je nach Zelltyp bisher nur einige Jahre erreicht, wohingegen für den praktischen Einsatz zehn Jahre angestrebt werden. Der große Vorteil dieser Systeme besteht darin, dass sie in einem kostengünstigen Verfahren, wie z. B. in einem Druck- oder Vakuumbeschichtungsverfahren, gefertigt werden können. Daher werden im Gegensatz zu heute um den Faktor zwei bis drei geringere Kosten erwartet. Mit dieser Technik könnten völlig neuartige Solarmodule hergestellt werden, die ein sehr niedriges Gewicht aufweisen und aufgrund ihrer Farbigekeit und Flexibilität neue Spielräume für Architektur und Design ermöglichen würden. Die Langzeitstabilität der organischen Photovoltaiksysteme wird durch drei Faktoren bestimmt: Die intrinsische Stabilität der Moleküle in der aktiven Schicht, die Stabilität der Nanomorphologie der Zelle und die Stabilität des Kontakts zwischen Organik und leitfähiger Schicht (Indiumzinnoxid, ITO bzw. Metall). Hinzu kommt das zu lösende Problem der langzeitstabilen Verkapselung, ohne dass hierdurch (beispielsweise durch Verwendung von Glas) der Vorteil der Flexibilität des Gesamtsystems verloren gehen darf. Im Falle der farbstoffsensibilisierten

<sup>1</sup> Organic and Printed Electronics, 4<sup>th</sup> Edition, 2011, OE-A Organic Electronics Association, VDMA, Frankfurt

<sup>2</sup> Die organische Photovoltaik holt auf, vdi-nachrichten, 2.12.2011

Solarzellen wurde im Labor bislang ein Wirkungsgrad von 11 % erreicht. Ein wesentliches Problem bei diesem System besteht in dem aggressiven Elektrolytssystem und den damit einhergehenden Anforderungen an Korrosionsbeständigkeit.

#### 4.1.1.4. Lösungsansätze und Verbesserungspotential

Für die **Siliciumwafer-basierte Photovoltaik** bietet nicht nur die Herstellung des Halbleitersmaterials, sondern auch die Integration in die Module weiteres Entwicklungspotential: Die heute übliche Verkapselung mittels polymerer Materialien, in einem Aluminiumrahmen zusammen mit einer Glasschicht als Schutz, macht etwa 30 % der Modulkosten aus und bedeutet auch einen nicht unerheblichen energetischen Aufwand.

Für die **Dünnschichtsolarzellen** wird erwartet, dass sich unter Nutzung von Erfahrungen aus anderen Branchen (z. B. Flachbildschirme) deutliche Fortschritte bei den Produktionstechnologien für große Mengen erzielen lassen. Somit sinken die Preise für einzelne Module, da die relativen Kosten der Produktionstechnologien pro Produkteinheit geringer sind. Weitere Vorteile liegen in einem vereinfachten Zusammenbau der Module und der Möglichkeit, flexible Module mit geringem Gewicht durch den Einsatz dünner Polymersubstrate herzustellen.

Im Falle der **organischen Photovoltaik** (organisch/anorganische Hybridstrukturen) wird versucht, die gut und flexibel einstellbaren Lichtabsorbereigenschaften der organischen Schichten mit dem verlustarmen Ladungstransport im anorganischen Material zu kombinieren. Hierbei wird an neuen Morphologien der anorganischen Komponenten z. B. zur Vergrößerung der Schichtoberfläche und zur Erzielung von Lichtstreuungseffekten sowie an der Erhöhung der Absorptionseffizienz der Farbstoffmoleküle gearbeitet.

#### 4.1.1.5. Forschungsbedarf

##### Siliciumwafer-Module

- » Kostengünstigere Herstellverfahren für hochreines kristallines Silicium
- » Verbesserte und kostengünstigere Fertigungstechnik für dünnere Wafer mit verbesserter Oberflächentextur
- » Neue Kontaktierungsverfahren (von der Rückseite) z. B. auch unter Einsatz leitfähiger Klebstoffe
- » Günstigere Verkapselungstechnologien unter Einsatz von Materialien mit höherer Beständigkeit und verbesserten optischen Eigenschaften
- » Neuartige bleifreie Lote
- » Reduzierung/Ersatz von Leitsilber

##### Dünnschichtsolarzellen

- » Neue Halbleitersmaterialien mit höherer Energieeffizienz und auf Basis verfügbarer Rohstoffe (Vermeidung von Indium)
- » Bessere/kostengünstigere Produktionstechnologien; hier sind insbesondere Technologien zu nennen, die kein Vakuum benötigen: Roll-to-Roll Prozesse, Nanopartikeldruck, Elektrodeposition und Monograin layer (MGL)
- » Billigere, transparente Elektrodenmaterialien mit verbesserten elektrischen und optischen Eigenschaften
- » Polymere und Komposite für die dauerhafte Verkapselung der aktiven Schicht über die gesamte Lebensdauer des Moduls
- » Materialien mit verschiedenen Bandlücken zur Nutzung eines größeren Anteils des Sonnenlichtspektrums (Tandem- und Triple-Zellen), sowie Konzepte für eine bedarfsgerechte Kombination der Materialien in den Modulen.
- » Erforschung neuer Konzepte zur Nutzung des roten und infraroten Anteils (Upconversion durch Zwei-Photonenprozesse) bzw. des kurzwelligen Anteils (Down-conversion zur Generierung von zwei Photonen niedrigerer Energie). Beispielsweise werden für beide Konzepte der Einsatz von Nanomaterialien und Fluoreszenzfarbstoffen diskutiert.

### Organische Photovoltaik

- » Erforschung organischer und metallorganischer Materialien mit speziell einzustellenden Eigenschaften wie lösungsprozessierbare „Low-Bandgap“ und n-Typ Halbleiter
- » Entwicklung von Materialien mit höherer Ladungsträger-Beweglichkeit
- » Verfeinerte Morphologien durch Nanostrukturierung
- » Erhöhung der Lebensdauer durch Dünnschicht-Verkapselungstechnologien mit verbesserten Barriereigenschaften gegenüber Sauerstoff und Wasser, sowie Prozessentwicklung für die großtechnische Herstellung
- » Energieeffizienz >20-25 % ohne nennenswerte Wärmeverluste durch Nutzen des Sonnenlichts in mehreren Stufen; Entwicklung mehrlagiger, in Serie geschalteter Zellen oder Konversion von Anregungsenergien durch 2-Photonenprozesse
- » Forschung zu alternativen Elektrolyten für farbstoffsensibilisierte Zellen
- » Nutzung mechanisch flexibler Trägermaterialien wie Folien oder textiler Halbzeuge

## 4.1.2. Brennstoffzellentechnik

### 4.1.2.1. Stand der Technik

Es gibt bereits eine große Anzahl verschiedener Brennstoffzellentypen. Die Entwicklungslinien basieren auf verschiedenen Materialkombinationen, die wiederum verschiedene Betriebstemperaturen bedingen. Brennstoffzellen können zum Antrieb eines Elektromotors, als mobiler oder portabler Stromgenerator oder zur stationären Erzeugung von Strom und Wärme dienen. Durch Kraft-Wärme-Kopplung ließen sich bereits heute, ohne neue Infrastruktur, wesentliche Beiträge zur Effizienzsteigerung leisten, wenn Brennstoffzellen zu wettbewerbsfähigen Kosten zur Verfügung stünden. Als einsetzbare Energieträger in der Brennstoffzellentechnik dienen z. B. Wasserstoff für den Automobylantrieb, Methanol und andere flüssige Energieträger für Anwendungen im kleineren Leistungsbereich und Erdgas oder Biogas für den stationären Bereich. Die großtechnische Wasserstoffherzeugung aus fossilen Energieträgern ist bekannt. Bei Brennstoffzellensystemen sind oft dezentrale Einheiten im kleineren Leistungsbereich gefragt, zumindest als Übergangstechnologie, bis regenerativer Strom für die elektrolytische Wasserstoffherstellung zur Verfügung steht.

### 4.1.2.2. Relevanz

Die Effizienz der Energiewandlung wird einen Beitrag zur Ressourcenschonung fossiler Energieträger und zum Klimaschutz leisten. Brennstoffzellensysteme sind effizient, auch im kleinen Leistungsbereich. Die Entwicklung der Brennstoffzellentechnik wird wegen der günstigen Eigenschaften von Brennstoffzellen (hoher elektrischer Wirkungsgrad, Schadstoffarmut, modularer Aufbau, weiter Leistungs- und Anwendungsbereich und sehr gute Eignung zur Kraft-Wärme-Kopplung) international mit erheblichem Aufwand vorangetrieben.

### 4.1.2.3. Technisch-wissenschaftliche Herausforderungen

Ziel muss es sein, kostengünstige Brennstoffzellensysteme mit langer Lebensdauer zu entwickeln, die als Baustein einer zukünftigen Energieversorgungsstruktur dienen. Hierfür sind hohe Stromdichten von bis zu einigen Ampere pro  $\text{cm}^2$ , sichere Trennung von Brenngas und Last sowie eine, analog den bisherigen Technologien, lange Lebensdauer bei gleichzeitig deutlich reduzierten Materialkosten notwendig. Das Erreichen dieser ambitionierten Ziele ist nur mit der Entwicklung neuer Materialien möglich. Hierbei ist die Membran und die optimierte Herstellung der Membran-Elektrodeneinheiten die zentrale Herausforderung.

Perfluorierte Membrane für die **Membran-Brennstoffzelle** sind chemisch sehr stabil, aber noch zu teuer, bis 80-100 °C leitfähig und verlangen ein genaues Wassermanagement. Die **Schmelzcarbonat-Brennstoffzelle** arbeitet bei 650 °C mit einer Salzschnmelze als Elektrolyt. Hier sind Korrosionsfragen und die Löslichkeit des Kathodenmate-

rials in dem Elektrolyten zu klärende Materialaspekte. Yttriumdotiertes Zirkoniumoxid ist zwar ein guter Sauerstoffionenleiter für die **Festoxid-Brennstoffzelle**, aber erst bei Temperaturen von 900-1000 °C einsetzbar, was wiederum für andere Werkstoffe eine schwierige Herausforderung darstellt. Dies liegt vor allem daran, dass bei elektrolytgestützten Zellen eine relativ dicke Elektrolytschicht zur Gewährleistung einer ausreichenden mechanischen Stabilität erforderlich ist. Ein Weg zur Reduzierung der Elektrolytschichtdicke und konsequenterweise der Betriebstemperatur (bis 650-700°C) stellt den Einsatz von anoden- bzw. interconnect-gestützten Zellen dar. Als Nachteil ist die geringere Langzeitstabilität des Systems im Vergleich zu den elektrolyt-gestützten Zellen zu nennen.

#### 4.1.2.4. Lösungsansätze und Verbesserungspotential

Sowohl für die Membran-, die Schmelzcarbonat- als auch für die Festoxid-Brennstoffzelle sind insbesondere Weiter- und Neuentwicklungen im Materialbereich essentiell. Für die **Membran-Brennstoffzelle** spielen neue Elektrolyte, anorganisch-organische Hybridmembranen oder auch intrinsisch leitfähige Polymere eine bedeutende Rolle, die hinsichtlich ihrer Stabilität und der Kosten optimiert werden müssen. Bei den **Schmelzcarbonat-Brennstoffzellen** ist die Modifikation neuer Materialien von Interesse, die die Korrosionsgeschwindigkeit verringern. Für die **Festoxid-Brennstoffzelle** muss wiederum nach neuen Elektrolyten gesucht werden, die bei niedriger Temperatur eine ausreichende Ionenleitfähigkeit haben, aber gleichzeitig gut verarbeitbar sind.

#### 4.1.2.5. Forschungsbedarf

##### Membran-Brennstoffzellen

- » Entwicklung von Elektrolyten und Membranen mit besserer Leitfähigkeit und Lebensdauer und für Arbeitstemperaturen über 100 °C
- » Entwicklung anorganisch-organischer Hybridmembrane inklusive effizienter Herstellungstechnologien für diese Membranen
- » Entwicklung von korrosionsstabilen Katalysatorträgern als Ersatz für den herkömmlichen Kohlenstoffruß
- » Steigerung der katalytischen Aktivität des Kathodenkatalysators für die Sauerstoffreduktion von stabilen und/oder Platin-freien Katalysatoren
- » Entwicklung von CO-toleranten Katalysatoren
- » Entwicklung von Membranen mit reduzierter Methanoldurchlässigkeit und hoher Leitfähigkeit für die Direktmethanol-Brennstoffzelle
- » Steigerung der Leitfähigkeit und Langzeitstabilität von Anionen-Austauschermembranen für die alkalische Polymermembran-Brennstoffzelle
- » Weiterentwicklung funktionalisierter siliciumorganischer Membranen
- » Entwicklung intrinsisch leitfähiger, stabiler Polymere für eine wasserfreie hohe (Protonen-) Leitfähigkeit
- » Entwicklung faser- bzw. textilverstärkter Membransysteme insbesondere für die Nutzung im Mobilbereich

##### Schmelzcarbonat-Brennstoffzellen

- » Modifikation bekannter Materialien zur Verringerung der Korrosionsgeschwindigkeit
- » Optimierung von Materialeigenschaften in Langzeitversuchen

##### Festoxid-Brennstoffzelle

- » Entwicklung neuer Elektrolyten mit ausreichender Ionenleitfähigkeit bei niedriger Temperatur (z. B. Cer, Gadolinium oder Scandium)
- » Gute Verarbeitbarkeit der Systeme mit passenden thermischen Ausdehnungskoeffizienten und niedrigen elektronischen Leitfähigkeiten sowie ausreichender Verfügbarkeit

- » Steigerung der Oxidationsstabilität und Verkokungsbeständigkeit der Nickel Cermet-Anode für den Betrieb mit Erdgas bzw. Biogas
- » Füge- und Dichtungswerkstoffe mit angepasster thermischer Ausdehnung

### 4.1.3. Thermoelektrika

#### 4.1.3.1. Stand der Technik

Derzeit findet die thermoelektrische Stromerzeugung nur begrenzt Anwendung, wird jedoch seit Jahrzehnten vor allem in der Raumfahrt und der Telekommunikationsindustrie eingesetzt. Zudem laufen seit einiger Zeit Feldversuche in den USA, in denen die elektrische Energie, gewonnen aus der Abwärme von Dieselmotoren, zum Antrieb der elektrischen Geräte der Fahrzeuge eingesetzt wird.

#### 4.1.3.2. Relevanz

Etwa zwei Drittel des Energiegehalts derzeit genutzter fossiler Brennstoffe geht bei der Verbrennung als Abwärme verloren. Prominentestes Beispiel hierfür sind Kraftfahrzeuge. Im Zuge der CO<sub>2</sub>-Diskussion hat daher der Wunsch nach Verwertung der Abwärme mit Hilfe der Thermoelektrik signifikant zugenommen. Für einen kommerziellen Einsatz muss allerdings eine deutliche Steigerung der Effizienz der thermoelektrischen Materialien erreicht werden.

#### 4.1.3.3. Technisch-wissenschaftliche Herausforderungen

Die zurzeit verwendeten Materialien arbeiten mit einem Wirkungsgrad von deutlich unter 10 %. Hier müssen insbesondere neue innovative Materialien mit höherer Effizienz entwickelt werden.

Einer großflächigen Nutzung steht derzeit jedoch der Mangel an standardisiertem Angebot von thermoelektrischen Wandlern (auch Module genannt) für die Anwendung bei höheren Temperaturen entgegen. Derartige Mitteltemperaturmodule – typischer Einsatz bis ca. 500°C – sind die wohl wesentlichste Voraussetzung, um Kfz-Abwärme in elektrische Energie umzuwandeln und in weitem Maße zur Versorgung z. B. der Bordelektronik zu nutzen. Konsequenterweise gibt es weltweit umfangreiche Aktivitäten, entsprechende thermoelektrische Materialien mit gegenüber dem Stand der Technik deutlich gesteigerter Effizienz zu entwickeln. Bisherige Erfolge liegen im Wesentlichen im akademischen Bereich.

#### 4.1.3.4. Lösungsansätze und Verbesserungspotential

Zielsetzung muss es sein, entweder die Wärmeleitfähigkeit bekannter Materialien herabzusetzen, ohne die elektrische Leitfähigkeit zu verringern, oder neue Materialien zu synthetisieren und hinsichtlich ihrer thermoelektrischen Eigenschaften zu optimieren. Ziel ist es, den thermoelektrischen Gütewert ZT, der sich aus spezifischen Werkstoffeigenschaften und der Temperatur berechnet, von derzeit ca. eins auf Werte über zwei zu steigern. Hierdurch könnte sich eine großflächige Nutzung der thermoelektrischen Elektrizitätsgewinnung aus Abwärme und Sonnenwärme ableiten. Fortschritte werden insbesondere über neuartige thermoelektrische Nanokomposite erwartet.

#### 4.1.3.5. Forschungsbedarf

- » Standardisierte Materialien (Nanokomposite) für den Einsatz bei Temperaturen bis 500°C
- » Entwicklung von Hybridmaterialien mit denen eine großflächige Herstellung von Thermoelektrika möglich ist
- » Materialkombinationen zur optimalen Ausnutzung großer Temperaturdifferenzen
- » elektrische Kontakte für Hochtemperaturmaterialien für z. B. Oxide und Silicide
- » Aufbau- und Verbindungstechniken mit Langzeitstabilität bei hohen Temperaturen
- » Temperaturwechselbeständigkeit der Materialien zwischen Raumtemperatur und hohen Temperaturen
- » Entwicklung von Materialien, die bei sehr kleinen Temperaturdifferenzen effektiv arbeiten

## 4.1.4. Weiterentwicklung von Kraftwerkstechnologie

### 4.1.4.1. Stand der Technik

Ca. 70 % der weltweiten Stromversorgung wird durch kohlebefeuerte Dampfkraftwerke oder gas- und ölgefeuerte Gas- und Dampfturbinenkraftwerke (GuD) mit einer installierten Kapazität von ca. 3000 GW sichergestellt. CO<sub>2</sub>-Emissionen aus kohlebefeuerten Kraftwerken sind heute für rund 30 % der in Deutschland emittierten CO<sub>2</sub>-Mengen verantwortlich. Gegenüber dem heutigen weltweiten Durchschnittswirkungsgrad von 30 % können mit modernen Steinkohle-Dampfkraftwerken Wirkungsgrade von 46 %, mit Braunkohle-Dampfkraftwerken von 44 % und mit GuD-Kraftwerken von über 60 % erreicht werden. Damit lassen sich spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen von unter 800 g CO<sub>2</sub>/kWh für Kohle und unter 350 g CO<sub>2</sub>/kWh für Gas erreichen.

### 4.1.4.2. Relevanz

Kohle befeuerte Kraftwerke werden noch auf lange Zeit wesentlich zur Versorgung mit elektrischer Energie beitragen. Die Weiterentwicklung der Kraftwerkstechnologien sollte daher in erster Linie die Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen durch eine Erhöhung des Wirkungsgrades zum Ziel haben. Eine Möglichkeit, die bereits seit langem diskutiert wird, in Deutschland aber umstritten ist, sind Kraftwerkskonzepte, bei denen die CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Abscheidung und Ablagerung des CO<sub>2</sub> in unterirdischen Speichern (CCS – Carbon Capture and Storage) vermieden werden. Durch die Verabschiedung des Kohlendioxid-Speicherungsgesetzes (KSpG) im Juni 2012 wurde in Deutschland die gesetzliche Grundlage für die Durchführung erster CCS-Modellprojekte geschaffen.

### 4.1.4.3. Technisch-wissenschaftliche Herausforderungen

Die Steigerung des Kraftwerkswirkungsgrades erfordert bei grundsätzlicher Beibehaltung des Prozesses die Anhebung des Dampfdrucks und der Temperatur. Zur Beherrschung dieser erhöhten Zustände ist die grundsätzliche Entwicklung neuer Werkstoffe erforderlich, die bis zu heute angestrebten Temperaturen von 700 °C und darüber einsetzbar sind.

Hinsichtlich der CO<sub>2</sub>-Abscheidung ist die große Herausforderung, Prozesse zu entwickeln, die bei den in der Kraftwerkstechnik üblich großen Betriebseinheiten wirtschaftlich und mit hoher Verfügbarkeit betreibbar sind und die gegenwärtig auftretenden Effizienzverluste am Gesamtprozess minimieren. Entwicklungsschwerpunkte sind die Demonstration geeigneter Kohlevergasungsverfahren, die Entwicklung der Sauerstoffverbrennung und die Entwicklung und Erprobung großer Wasserstoffturbinen. Weiterhin müssen neuartige Waschflüssigkeiten zur Abscheidung des CO<sub>2</sub> entwickelt werden und der Energieaufwand bei der Regeneration der Waschlösungen muss vermindert werden. Weitere Schwerpunkte sind die Erarbeitung von Verfahren zur CO<sub>2</sub>-Abtrennung, die zur Nachrüstung bestehender Kraftwerke eingesetzt werden können (Postcombustion).

### 4.1.4.4. Lösungsansätze und Verbesserungspotential

Hinsichtlich der Kraftwerkswirkungsgradsteigerung werden bereits neue Materialien entwickelt und erprobt. Hierdurch sind Verbesserungen des Wirkungsgrades um bis zu vier Prozentpunkte absehbar.

Im Hinblick auf die CO<sub>2</sub>-Abtrennung werden vier verschiedene Varianten erprobt. Die sogenannte Pre-Combustion Technologie basierend auf dem IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle) Prozess, bei dem die Kohle zunächst in einem Vergasungsschritt in Synthesegas umgewandelt wird. Bei einer nachfolgenden Konvertierung unter Wasserdampfzugabe wird ein Brenngas erzeugt, das im Wesentlichen aus CO<sub>2</sub> und Wasserstoff besteht. Das CO<sub>2</sub> wird vor dem eigentlichen Kraftwerksprozess in einer Synthesegaswäsche abgetrennt. Die Energie des wasserstoffreichen Gases wird in einem kombinierten Gas- und Dampfturbinenprozess in Strom umgewandelt.

Die zweite Prozessroute ist das Oxyfuel-Verfahren, bei dem mit Hilfe einer vorgeschalteten Lufterlegungsanlage der Stickstoff abgetrennt und nur der verbleibende Sauerstoff der Verbrennung zugeführt wird. Das den Dampferzeuger verlassende Rauchgas besteht dann zu etwa 70 % aus Kohlendioxid. Der Rest besteht im Wesentlichen aus

Wasserdampf, der durch Kühlung der Rauchgase auskondensiert werden kann. Die dritte Prozessroute besteht in der Abtrennung von CO<sub>2</sub> aus dem Rauchgas eines konventionellen Kraftwerksprozesses (Post-Combustion). Derzeit sind für die Rauchgaswäsche verschiedene Verfahren in der Diskussion. In dem vierten Prozess, dem Chemical Looping, werden Metalloxide oder Kalkstein (Carbonat-Looping-Verfahren) eingesetzt, um das CO<sub>2</sub> rein zu gewinnen. Im Vergleich zu den o.g. Verfahren ist das Chemical Looping noch in einer frühen Entwicklungsphase und lässt sich für feste Brennstoffe nur bedingt einsetzen.

Alle zum CO<sub>2</sub> freien Kraftwerk führende Verfahren haben gemeinsam, dass ein Verlust des Kraftwerkswirkungsgrades von 5 bis 14 Prozentpunkten – am höchsten beim Post-Combustion-Verfahren – einzukalkulieren ist. Durch Weiterentwicklung der Verfahren und der Membranmaterialien ist zu erwarten, dass sich abhängig von den verschiedenen Prozessen, Effizienzsteigerungen von ein Prozent (Pre-Combustion-Verfahren) bis zwei Prozent (Post-Combustion-Verfahren bzw. Oxyfuel-Verfahren) ergeben können.

### 4.1.4.5. Forschungsbedarf

- » Entwicklung und Qualifizierung von (faserverstärkten) hochtemperaturresistenten (Verbund-)Werkstoffen und Bauteilen, bspw. aus Nickelbasislegierungen, sowie von Schichtsystemen zur Reduzierung von Oxidation und Korrosion für Dampfkraftwerke, die bei 700 °C und darüber betrieben werden
- » Weitere Verbesserung der Kühlung der heißgasführenden Bauteile in Gasturbinen und Nutzung von Dampf als Kühlmedium für höhere Turbineneintrittstemperaturen
- » Erhöhung des Wirkungsgrades von stationären Gasturbinen durch Einsatz von CMC-Werkstoffen (Flammrohre, Flammhalter, Leit- und Laufschaufeln), die höheren Betriebstemperaturen standhalten als die bisher verwendeten Metall-Keramik-Verbundmaterialien.
- » Optimierung der Expansions- und Kompressionswirkungsgrade der Turbomaschinen
- » Generell: Reduzierung der Effizienzverluste durch CO<sub>2</sub>-Abtrennung von heute 9-13 % auf künftig 6-11 %
  - Post-Combustion-Verfahren
    - Forschung und Entwicklung chemisch stabiler Waschlösungen zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung aus Rauchgasen mit geringem Energiebedarf zur Lösungsmittelregenerierung
  - Oxyfuel-Verfahren
    - Verbesserung der existierenden Sauerstofftransportmembranen
  - Pre-Combustion-Verfahren
    - Optimierung der Wassergas-Shiftreaktion durch geeignete Reaktorkonzeption
  - Chemical-Looping
    - Verbesserung der geeigneten Sauerstoffträgermaterialien
    - Synthese stabiler Calciumcarbonat-Modifikationen
- » Optimierung der Anlagenintegration hinsichtlich Wirkungsgrad, Verfügbarkeit, Wirtschaftlichkeit und CO<sub>2</sub>-Abscheidemöglichkeit
- » Groß-Demonstrationsanlagen für 700°C-Dampfkraftwerke, Braunkohlevortrocknung sowie für die Prozessrouten der CO<sub>2</sub>-Abscheidung

## 4.1.5. Wärmedämmschichten

### 4.1.5.1. Stand der Technik

Wärme­kraft­ma­schin­en für Trans­port und Ener­gie­ge­win­nung, z. B. Tur­bi­nen, sind nach dem von Carnot formulierten Zusammen­hang desto effizienter, je höher die Ver­bren­nung­tem­pe­ra­turen sind. Durch Reduktion des Brennstoff­be­darfs wer­den letzt­en­dlich die CO<sub>x</sub>- und NO<sub>x</sub>-Emissionen reduziert. Die maximale Ver­bren­nung­tem­pe­ra­tur eines Pro­zesses wird durch die Stabi­li­tät der Mate­ri­alien des Reak­tors oder Motors bestimmt. Stand der Technik ist be­spie­ls­wei­se für Tur­bi­nen die Ver­wen­dung Nickel-basierter Superlegierungen, die mit Wärmedämmschichten (thermal barrier coatings, TBCs) aus stabilisiertem Zirkonoxid geschützt werden. Thematisch eng verwandt zu den TBCs sind so genannte EBCs (environmental barrier coatings), bei denen der Schutz gegen eine möglicherweise aggressive Gasatmosphäre und nicht die thermische Stabilität im Vordergrund steht.

### 4.1.5.2. Relevanz

Besondere mechanische Stabilität von neuen Wärmedämmschichten bei hohen Temperaturen, niedriger Dichte und hoher Oxidationsstabilität erlauben die Steigerung der Verbrennungstemperaturen von Turbinen um 150 – 200 °C, was die Energieeffizienz und den ökonomischen Gewinn dramatisch steigert, insbesondere dann, wenn die Turbinen nicht mehr gekühlt werden müssen. Wenn eine 240 Megawatt Gasturbinenanlage 2 % mehr elektrische Energie gewinnen könnte bei gleich bleibendem Brennstoffverbrauch, würden die CO<sub>2</sub>-Emissionen um 24.000 Tonnen pro Jahr reduziert.

### 4.1.5.3. Technisch-wissenschaftliche Herausforderungen

Zirkonate, die sich durch niedrige Wärmeleitfähigkeit und die Phasenstabilität von Raumtemperatur bis zum hohen Schmelzpunkt auszeichnen, werden ebenso wie neuartige precursor-abgeleitete Keramiken auf Si-C-Basis untersucht, um gegenüber den konventionellen Materialien bessere Eigenschaften für den Einsatz als Schutzschichten für Verbrennungsmaschinen zu erzielen. Als neuartige Substrate mit überlegenen Eigenschaften werden beispielsweise Refraktärmaterialien auf Mo-Si-B-Basis diskutiert. Hier müssen jedoch geeignete Haftvermittlungsschichten (bond coats) entwickelt werden, die zwischen Substrat und TBCs angebracht werden, um die Unterschiede im Wärmeausdehnungskoeffizienten auszugleichen und die Oxidationsstabilität dieser Hochtemperaturwerkstoffe zu verbessern.

### 4.1.5.4. Lösungsansätze und Verbesserungspotential

Neben den bereits untersuchten amorphen Si-B-N-C-Keramiken und Zirkonaten sind weitere Refraktärmaterialien auf Borid-, Nitrid-, Silicid- und Carbid-Basis sowie komplexe Oxide attraktiv bezüglich der gewünschten Eigenschaftsprofile.

### 4.1.5.5. Forschungsbedarf

- » Untersuchung der Korrosionsstabilität der Hochtemperaturwerkstoffe gegen wasserdampf- und schwefelhaltige Verbrennungsatmosphären bei hohen Temperaturen
- » Analyse der Phasengleichgewichte in Mehrphasen- und -komponentensystemen

## 4.1.6. Materialien für Kollektoren

### 4.1.6.1. Stand der Technik

Für die Solar- und Geothermie benötigt man Kollektoren, die Solarenergie oder Erdwärme absorbieren und speichern. Erreichbar sind bei Sonnenkollektoren zurzeit Wirkungsgrade von bis zu 75 %. Derzeit werden verschiedene Typen von Kollektoren (Flachkollektoren, Vakuumröhrenkollektoren und konzentrierende Parabolinnenkollektoren) eingesetzt. Diese enthalten als wichtigste Komponenten Absorbermaterialien, Dämmschichten (Polyurethanschaum und/oder Mineralwolle), Reflektoren und Wärmeträger. Als Wärmeträger werden in der Regel Mischungen

aus Wasser und Propylen- oder Ethylenglycol eingesetzt. Die Absorber müssen schwarz, dünn und gut wärmeleitend sein. Hierfür werden hochselektiv beschichtete Metallbleche (Kupfer oder Aluminium) oder Glasrohre eingesetzt, die bezüglich maximaler Absorption und minimaler Emission optimiert sind. Beschichtungen bestehen entweder aus „Schwarz“-Chrom oder „Schwarz“-Nickel, das galvanisch aufgebracht wird und Absorptionskoeffizienten bis zu 96 % und Emissionskoeffizienten bis zu 12 % erreicht. Alternativ werden im Hochvakuum Schichten aus Aluminiumnitrid, Metallcarbid oder blauem Titanoxidnitrid aufgedampft oder gesputtert. Mit letzteren lassen sich sehr gute Emissionskoeffizienten um 5 % erreichen, die damit vor allem bei hohen Betriebstemperaturen deutlich höhere Leistungen erzielen können. Hierdurch werden Adsorptionswerte von 94 % für das Sonnenlicht und Emissionswerte von weniger als 6 % erreicht. Für die Abdeckung der Kollektoren werden Gläser mit besonders hohem Transmissionsgrad eingesetzt. Hierbei handelt es sich um spezielle eisenarme und gehärtete Borosilicat- oder Anti-Reflex-Gläser.

Bei der konzentrierenden Solarthermie werden als Reflektoren zunehmend sogenannte Compound Parabolic Concentrator Reflektoren eingesetzt, die die Strahlung innerhalb eines bestimmten Winkelbereichs einsammeln und auf den Absorber fokussieren. Außerdem gibt es weiße, diffuse Reflektoren aus hochreinem Aluminium.

### 4.1.6.2. Relevanz

Die Solarkollektorfläche in Deutschland wuchs in den vergangenen Jahren auf einen Wert von 15,3 km<sup>2</sup> in 2011. Ca. 90 % der Fläche bestehen aus Flachkollektoren, der Rest aus Vakuumröhrenkollektoren. Die durch Solarthermie bereitgestellte Wärmeleistung ist in den vergangenen Jahren auf mittlerweile 10,7 GW gestiegen, nimmt damit aber immer noch weniger als ein Prozent des gesamten bundesdeutschen Wärmeverbrauchs ein. Durch Innovationen in den kommenden Jahren sowie den Bau größerer Solarwärmeeinheiten für Mehrfamilienhäuser und gewerbliche Anwendungen und dem Bau solarthermischer Großanlagen erscheint eine Steigerung dieses Anteils auf ca. 10 Prozent bis zum Jahre 2030 als realistisch.

Bei kleineren Anlagen liegt der solare Deckungsgrad im Sommer deutlich über 100 %, im Winter werden jedoch deutlich niedrigere Werte erreicht. Um den Energieüberschuss der Sommersonne auch im Winter nutzen zu können, bedarf es der zusätzlichen Entwicklung saisonaler Speicher.

### 4.1.6.3. Technisch-wissenschaftliche Herausforderungen

Der reale Wirkungsgrad der Anlagen ist niedriger als oben angegeben, da die optimale Anbringung der Kollektoren von den baulichen Gegebenheiten abhängig ist. Ein weniger winkelabhängiges Konstruktionsprinzip würde die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens erheblich begünstigen. Vakuumröhrenkollektoren stellen hier bereits eine Verbesserung dar, ihre Schwachstelle ist jedoch die langfristige Dichtigkeit.

### 4.1.6.4. Lösungsansätze und Verbesserungspotential

Ein interdisziplinärer Ansatz von Materialsynthese und Abscheidung dünner Schichten wird zu neuen, besseren Absorbersystemen führen. Die Konditionierung und Aufbringung muss modifiziert werden, um eine größere Toleranz bezüglich des Einfallswinkels von Solarstrahlung zu erreichen.

### 4.1.6.5. Forschungsbedarf

- » Neue Polymermaterialien für solar-thermische Komponenten und Systeme mit spezifischen mechanischen, elektrischen und optischen Eigenschaften, die für Temperaturen bis 250° C geeignet sind
- » Nanostrukturierte schmutzabweisende Oberflächen
- » Speichermaterialien mit einer höheren Wärmedichte
- » Dämmwerkstoffe mit deutlich verbesserter Isolierwirkung (nanoporöse Schäume)
- » Senkung der Kosten für die Dämmung saisonaler Speicher
- » Verbesserung der Wirkungsgrade bei Hochtemperatur-Selektivbeschichtungen/Senkung der Kosten



Bei den abgebildeten Partikeln handelt es sich um sogenannte Einschlussverbindungen. Die Lithium-Ionen sind im Kristallgitter eines Metalloxyds eingeschlossen, während die Elektronen im gesamten Partikel verteilt sind.

(© Pressefoto BASF)

## 4.2 Materialien für die Energiespeicherung

Die anstehende Modernisierung der Stromversorgung in Deutschland und die politischen Vorgaben zum Ausbau der erneuerbaren Energien rücken die Fragen der elektrischen Speicherung und der Entwicklung von neuen Speichertechnologien in den Mittelpunkt.

Die zunehmende Durchdringung von fluktuierenden erneuerbaren Energiequellen wie Wind- und Sonnenenergie in die elektrischen Netze erfordert auf absehbare Zeit die Integration von elektrischen Speichern, um einen Ausgleich von Angebot und Nachfrage von elektrischer Energie zu ermöglichen. Dieser künftig zu erwartende Bedarf für Speichertechnologien zur Stabilisierung des Stromangebotes tritt etwa zeitgleich mit einer verstärkten „Elektrifizierung“ von Fahrzeugen auf, was auch auf der Nachfrageseite einen wachsenden Bedarf nach elektrischen Speichern erwarten lässt.

Strom ist die wertvollste Form von Energie. Er lässt sich am besten in andere Energieformen umwandeln. Diese Umwandlung jedoch sollte mit möglichst kleinen Wirkungsgradverlusten passieren.

Da der Bedarf in Deutschland absehbar nicht durch die derzeit verfügbaren Infrastrukturen (z. B. Druckluftspeicher oder Pumpspeicher) kompensiert werden kann und der Strom zukünftig außerdem über größere Zeiträume in eine speicherfähige Form überführt werden muss, ist es eine vorrangige Aufgabe von Wissenschaft und Forschung, hier neue Möglichkeiten zu eröffnen.

### 4.2.1. Stromspeicherung

#### 4.2.1.1. Supercaps

##### 4.2.1.1.1. Stand der Technik

Das Prinzip der elektrischen Energiespeicherung in Super-Kondensatoren, auch Supercaps genannt, ist rein physikalischer Natur und beruht auf der Umladung der elektrolytischen Doppelschicht (Helmholtz-Schicht), die sich an der Phasengrenze eines Elektronenleiters im Kontakt mit einem Elektrolyten ausbildet. Die ersten Patente zur Anwendung solcher Doppelschichtkondensatoren wurden bereits 1957 angemeldet. Im Vergleich zu konventionellen

Kondensatoren besitzen Supercaps eine wesentlich höhere Speicherkapazität, typisch sind Werte von 100 Farad/g bezogen auf Aktivkohle als aktives Elektrodenmaterial mit ca. 1000 m<sup>2</sup>/g spezifischer Oberfläche. Damit können Energiedichten von 5-10 Wh/kg erreicht werden. Im Vergleich zu den Batterien können Super-Kondensatoren bei der Entladung diese Energie sehr schnell abgeben und kurzfristig hohe elektrische Leistungen von > 20 kW/kg bereitstellen. Die spezifische Energie ist allerdings deutlich geringer als bei Batterien. Im Vergleich zu anderen Stromspeichern, bei denen elektrische Energie als Wärme oder mechanische Energie statisch oder dynamisch gespeichert wird, besitzen Supercaps höhere Wirkungsgrade und Leistungsdichten. Ideal sind auch die günstigen Betriebsbedingungen, die den mobilen oder stationären Einsatz bei relativ niedrigen Temperaturen erlauben.

### 4.2.1.1.2. Relevanz

In einer hochtechnisierten Gesellschaft besitzt die elektrische Energie einen besonderen Stellenwert, da sie nahezu universell und an jedem Ort einsetzbar ist und in andere Energieformen wie Licht, Wärme oder mechanische Energie umgewandelt werden kann.

### 4.2.1.1.3. Technisch-wissenschaftliche Herausforderungen

Anwendungen von Doppelschichtkondensatoren zusammen mit Batterien oder Brennstoffzellen zielen auf die Erhöhung der Leistung und Lebensdauer der elektrischen Komponenten ab. Unter Umständen könnten Supercaps auch als Batterieersatz verwendet werden. In den 90er Jahren des letzten Jahrhunderts fanden sie im Zusammenhang mit der Entwicklung von Hybridfahrzeugen starke Beachtung. Sie erfüllen dabei die Funktion eines Kurzzeitspeichers, der neben der Brennstoffzelle oder der Batterie Spitzenleistungen abdeckt und zusätzlich Bremsenergie rückspeichern kann. Um einen wesentlichen Marktanteil zu erreichen, müssen die spezifische Energie und Leistungsdaten von Supercaps deutlich verbessert werden.

### 4.2.1.1.4. Lösungsansätze und Verbesserungspotential

Ein Weg zur Erhöhung der Energie und Leistungsdichte führt über die Erhöhung der Nennspannung von ca. 2,5 Volt auf 3 Volt bei gleichzeitiger Zyklusstabilität von etwa 500.000 Lade-/Entlade-Zyklen. Dazu ist die Erforschung neuer Elektrodenmaterialien (hochporöse Kohlenstoffmaterialien) und Elektrolyte, unter anderem ionischer Flüssigkeiten (bislang noch zu teuer), von zentraler Bedeutung. Die Optimierung des Designs mit Volumen und Gewichtseinsparungen ist eine weitere Option. Maßgeschneiderte Porensysteme und funktionelle Eigenschaften der dreidimensionalen Elektronen-leitenden Strukturen können zur Verbesserung führen. Synergien in der Entwicklung von Dünnschichtkondensatoren und Batterien sollten insgesamt stärker genutzt werden.

### 4.2.1.1.5. Forschungsbedarf

- » Weiterentwicklung und Untersuchung neuer Elektrodenmaterialien und Elektrolyte
- » Optimierung des Designs mit Volumen und Gewichtseinsparungen
- » Entwicklung und Untersuchung maßgeschneiderter Porensysteme mit funktionellen Eigenschaften
- » Nutzung von Synergien in der Entwicklung von Dünnschichtkondensatoren, Lithium-Ionenbatterien und Post-Lithium-Ionenbatterien

## 4.2.1.2. Stationäre Stromspeicher

### 4.2.1.2.1. Stand der Technik

Elektrochemische Speicher bieten eine der wichtigsten Optionen für die Speicherung von Energie in der Zukunft. Frühere Ansätze, Strom im Megawattstundenbereich mit Hilfe von Bleibatterien zu speichern, waren nur bedingt erfolgreich. Die stationäre Natrium-Schwefel-Batterie mit keramischen Elektrolyten als Separatoren tritt in Japan gerade ihren Siegeszug an. Diese beiden Systeme sind als klassische Batterien modular aufgebaut: Jede Einzelzelle enthält die gesamte redox-aktive Masse, was zu hohen Kosten führt. Die modulare Begrenzung wird mit Redox-

Flow-Batterien gesprengt, die die elektrochemische Zelle von der Vorratshaltung der Redoxsysteme trennen. Die Redox-Flow-Batterie ist damit der derzeit einzige elektrochemische Energiespeicher, in dem Energiemenge und Leistung gänzlich unabhängig voneinander skaliert werden können. Jedoch sind auch die Redox-Flow-Batterien nicht günstig, da große Mengen an Chemikalien benötigt werden. Redox-Flow-Batterien wurden bisher nur bis zum Pilotmaßstab entwickelt, wobei kanadische, englische und japanische Unternehmen führend sind. In den letzten Jahren wurde vor allem die Vanadium-Redox-Flussbatterie, insbesondere Vanadium-Bromid-Verbindungen finden hier als Elektrolyt Verwendung, als vielversprechend eingestuft.

Weiterhin werden Batterien auf Lithium-Technologiebasis untersucht. Sie zählen derzeit zu der besten, kommerziell verfügbaren, elektrochemischen Speichertechnologie. Der Wirkungsgrad zwischen Ein- und Ausspeichern liegt bei 95 Prozent – eine Effizienz, die von keiner anderen Speichertechnologie erreicht, geschweige denn übertroffen wird. Gleichzeitig verfügt die Lithium-Batterietechnologie über eine hohe Ein- und Ausspeicherdynamik, die sowohl in leistungs- als auch energieorientierten Netzanwendungen vorteilhaft eingesetzt werden kann. Die Selbstentladung liegt bei ca. einem Faktor zehn unter der der Bleitechnologie bei einer gleichzeitig deutlich niedrigeren Wartungsintensität. Batteriesysteme auf Basis der Li-Ionen-Technologie weisen wegen ihrer hohen Energiedichte ein relativ niedriges Bauvolumen auf. Ihre modulare Skalierbarkeit ist insbesondere vor dem Hintergrund des Dezentralisierungszieles der Energieversorgung und damit auch -speicherung von zunehmender Bedeutung. Unter modularer Skalierbarkeit wird auch die kommunikative Zusammenschaltung vieler kleiner Speicher zu einem virtuellen Großspeicher verstanden. Damit ist die Chance gegeben, eine Vielzahl von Problemen beim Netzausbau zu vermeiden, mindestens jedoch durch bessere Netzauslastung abzumildern.

#### **4.2.1.2.2. Relevanz**

Die verstärkte Bedeutung der regenerativen Stromerzeugung, insbesondere nach der von der Bundesregierung beschlossenen Energiewende, führt die vorhandenen Stromnetze an die Grenzen ihrer Belastbarkeit. Die zunehmende Diskrepanz zwischen Stromangebot und Bedarf kann nur durch Erweiterung der Speicherkapazitäten gedeckt werden. Aufgrund der großen räumlichen Entfernung zwischen Windparks und Pumpspeicherkraftwerken muss in den Ausbau der Netze investiert werden. Die Kosten hierfür und die begrenzten hydroelektrischen Speicherkapazitäten zwingen dazu, weitere Lösungen wie z. B. stationäre Stromspeicher zu suchen.

#### **4.2.1.2.3. Technisch-wissenschaftliche Herausforderungen**

Redox-Flow-Batterien im Multimegawattbereich sind Großanlagen in der Leistungsklasse von Chloralkalielektrolysen. Die Auswahl und Bewertung möglicher Redoxsysteme muss wie für ein sicheres, kostengünstiges chemisches Großverfahren erfolgen.

Die Li-Technologie hat derzeit den Nachteil, ein hohes Kostenniveau zu besitzen, bei gleichzeitiger Unsicherheit der Vorhersagen zur Lebensdauer (10 - 20 Jahre). Grundlegende Idee zukünftiger Forschung und Entwicklung muss es daher sein, kostengünstigere elektrochemische Batteriespeicher mit hoher Leistungsdichte, hohem Wirkungsgrad und hoher Zuverlässigkeit und Sicherheit für stationäre Anwendungen zu suchen. Der Schlüssel für bessere Speicher sind preisgünstige und effiziente Materialien und größere Elektroden. Die wissenschaftlichen Herausforderungen liegen daher ganz allgemein in der Entwicklung von effizienteren Aktiv- und Nichtaktivmaterialien sowie in verbesserten Herstelltechnologien zur optimalen Funktion dieser Materialien im gewünschten System.

#### **4.2.1.2.4. Lösungsansätze und Verbesserungspotential**

Obwohl etliche der o.g. Technologien in Deutschland entwickelt wurden, sind diese Entwicklungslinien hier aufgegeben worden. Ein großer Teil des Knowhows ist nicht mehr in Deutschland verfügbar. Um den Anschluss an die internationale Entwicklung wieder zu erlangen, müssen innovative Neuansätze erprobt werden. Hierbei sind insbesondere Forschungsaktivitäten z. B. bei der Entwicklung neuer Festelektrolyte, innovativer Separatoren und

Elektronenleiter sowie Elektrodenmaterialien notwendig. Eine Bündelung der Entwicklungslinien bei den o.g. Materialien ist zwingend notwendig.

Es ist zu wünschen, dass die Intensität der zukünftigen Förderung das erfreuliche Niveau wie bei der Nationalen Plattform Elektromobilität (NPE) erreichen wird. Erste positive Aktivitäten hierzu, wie beispielsweise das Helmholtz-Institut für Elektrochemische Energiespeicherung, sind bereits erkennbar. Der Markt der stationären Stromspeicher ist zunächst ein Markt am Standort Deutschland mit einem erheblichen Potential für wirtschaftliche Dynamik, insbesondere auch im Bereich der kleinen und mittelständischen Unternehmen, die Elektroden entwickeln und herstellen.

### 4.2.1.2.5. Forschungsbedarf

- › Entwicklung alternativer kostengünstiger Elektrolytmaterialien
- › Entwicklung und Untersuchung neuer Festelektrolyte, Separatoren, Elektronenleiter und Elektrodenwerkstoffe

## 4.2.2. Thermische Energiespeicher

### 4.2.2.1. Stand der Technik

Thermische Speichermedien kommen in vielfältigen Anwendungsgebieten zum Einsatz. Die Anforderungsprofile an die thermischen Speichermedien unterscheiden sich je nach verfolgter Anwendung und Temperaturbereich erheblich. In dem unteren Temperaturbereich (20-120 °C) dominieren derzeit Wasserspeicher. Daneben werden auch Phasenwechselmaterialien (engl. Phase-Change-Materials, PCM) eingesetzt, die die thermische Energie in Form eines Phasenüberganges (z. B. von fest nach flüssig) speichern. Bei der Entladung wird diese Energie wieder freigesetzt. Im Gegensatz zu Speichermedien, die sensible Wärme (auch: fühlbare Wärme) speichern, verbleibt der Speicher während der Be- und Entladung auf der gleichen Temperatur. Als PCMs werden z. B. Paraffinwachsmischungen im Temperaturbereich von 20-25°C zur passiven Gebäudeklimatisierung eingesetzt, finden aber auch Anwendung in hohen Temperaturbereichen, z. B. als Salzschnmelzen. Die Kapazität und der Einsatzbereich des Speichers werden wesentlich von der Enthalpie und der Temperatur des Phasenüberganges bestimmt.

Sorptionsspeicher dagegen nutzen reversible Desorptions-/ Adsorptionsvorgänge aus, um in Temperaturbereichen zwischen 100-150 °C thermische Energie zu speichern. Bei hohen Temperaturen (bis 1000 °C) wird bisher die Wärme in Form von sensibler Wärme gespeichert.

### 4.2.2.2. Relevanz

Der größte Teil des Endenergieverbrauchs in Deutschland<sup>3</sup> (2010), nämlich 58 %, wird zur Wärmeerzeugung für die Sektoren Industrie, GHD (Gewerbe, Handel, Dienstleistungen) und Haushalte benötigt. Wichtigste Energieträger im Wärmemarkt sind Erdgas und Mineralöl. Hiermit werden Anwendungen sowohl im Niedertemperaturbereich (bis ca. 120 °C) zur Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser als auch im Hochtemperaturbereich zur Erzeugung von Prozesswärme (bis über 1000 °C) abgedeckt. Erhebliches Einsparpotential beim Verbrauch der fossilen Brennstoffe besteht in einer Erhöhung der Effizienz thermischer Prozesse, einer verstärkten Abwärmenutzung industrieller Prozesswärme, insbesondere bei Anlagen mit einem hohen Wärmeverlust durch nicht-kontinuierlichen Betrieb, dem vermehrten Einsatz erneuerbarer Energien zur Wärmeerzeugung (bisher etwa vier Prozent) und in einem deutlichen Ausbau von Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen. Die Verfügbarkeit effizienter und wirtschaftlicher thermischer Energiespeicher ist dabei der Schlüssel, dieses Potential zu erschließen. Weiterhin spielen thermische Speicher eine zentrale Rolle, um Energie aus solarthermischen Kraftwerken über den gesamten Tages- und Nachtzyklus verfügbar zu halten.

<sup>3</sup> Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen, erschienen in „Energiedaten“ des BMWi, Stand 27.10.2011

### 4.2.2.3. **Technisch-wissenschaftliche Herausforderungen**

Thermische Speicher bilden ein Gesamtsystem, das auf die jeweilige Anwendung zugeschnitten ist. Die Speicher-materialien sind ein integraler Bestandteil und bewegen sich daher in dem komplexen Anforderungsprofil, das durch die Anwendung vorgegeben ist. Thermische Speicher müssen neben der Wirtschaftlichkeit, eine hohe Robustheit, Wartungsfreiheit und Benutzerfreundlichkeit unter Beweis stellen. Eine erhöhte Speicherdichte der Materialien stellt ebenfalls eine besondere Herausforderung dar. Darüber hinaus wird der Einsatz reversibler thermochemischer Reaktionen diskutiert, um höhere Energiedichten zu erschließen.

### 4.2.2.4. **Lösungsansätze und Verbesserungspotential**

Die Entwicklung von Materialien, die einen möglichst großen Temperaturbereich abdecken, ist auch weiterhin geboten. Neue Konzepte können vollständig neue Materialklassen erschließen. Latentwärmespeicher und thermochemische Reaktionen haben das größte Entwicklungspotential. Systeme, die z. B. Sorption mit einer thermochemischen Reaktion kombinieren, könnten verschiedene Temperaturbereiche überstreichen und zur kontrollierten Bereitstellung von Wärme oder Kälteenergie genutzt werden. Die Entwicklung thermischer Speicher muss systemisch angegangen werden, da eine ausschließliche Fokussierung auf das Speichermaterial für die anwendungsorientierten Problemstellungen unzureichend ist.

Reversible chemische Reaktionen eignen sich ebenfalls für den Einsatz als thermische Speichermedien. Beim Beladen des Speichers wird das Gleichgewicht der Reaktion durch die Zuführung der Wärme in eine Richtung verschoben. Beim Entladen verläuft die Gegenreaktion ab, bis das Gleichgewicht wieder hergestellt ist. Dabei wird die Reaktionswärme abgegeben. Chemische Reaktionen haben ein großes Potential zur Speicherung großer Wärmemengen, da die Reaktionsenthalpien die Phasenübergangsenthalpien und die Speicherung von sensibler Wärme deutlich übertreffen. Chemische Reaktionen können, wo die Trennung der Produkte erfolgt, eine sichere, dauerhafte und zuverlässige Speicherung der Wärmeenergie in Form von chemischen Substanzen ermöglichen. Wesentlich für den Einsatz chemischer Reaktionen als Speicher ist die sichere und zuverlässige Integration der Reaktion in das Speichersystem.

### 4.2.2.5. **Forschungsbedarf**

- » Reduzierung der Investitionskosten für thermische Speicher
- » Steigerung der Energiedichte
- » Verbesserung der relevanten thermo-physikalischen Eigenschaften
- » Steigerung der Energieeffizienz (Verminderung von Wärmeverlusten und Exergieverlusten)
- » Verbesserte Systemintegration
- » Entwicklung neuer Materialien mit hoher Sorptionskapazität
- » Kombination von Aktivkomponenten mit Trägern
- » Chemische Reaktion als thermische Speicher



Membranen sind heutzutage eine der innovativsten Technologien zum Trennen und Reinigen von Stoffen. So werden sie zur Reinigung von Trinkwasser, Prozesswasser und Abwasser ebenso eingesetzt wie in der Lebensmittelindustrie, Chemikalientrennung und zur Dialyse. Bei der Trinkwasserreinigung säubern Ultrafiltrationsmembranen das Wasser von krankheitserregenden Bakterien, deren Zerfallsprodukten und Viren. © Pressefoto BASF

## 4.3 Materialien für den Umweltschutz

### 4.3.1. Stoffabtrennung und -reinigung

#### 4.3.1.1. Stand der Technik

Mit Katalysatoren zur Luftreinhaltung werden seit vielen Jahren die verschiedenen Emissionen reduziert – vor allem im Bereich Verkehr und Transport (Autoabgaskatalysator), bei Kraftwerken (Rauchgasentschwefelung und –entstickung), aber auch aus diversen industriellen und gewerblichen Anwendungen. Die katalytische Behandlung von Industrieabgasen ist somit bereits auf hohem Niveau in den Industriestaaten etabliert.

Zudem werden in der chemischen Industrie zahlreiche thermische Trennoperationen wie Destillation, Flüssig-Flüssig-Extraktion, Kristallisation und Chromatographie eingesetzt, die aufgrund ihrer Energie- und Materialintensität zwischen 40 und 70 % der Investitions- und Betriebskosten der chemischen Prozesse ausmachen. Im Trend zu immer niedrigeren Grenzwerten verschieben sich die einzusetzenden Prozesse der Stoffabtrennung und -reinigung auf Verfahren, die auf hochwertige Material- und Stoffeigenschaften aufbauen. Zu nennen sind hier insbesondere Membranverfahren.

In der stoffwandelnden und stoffaufbereitenden Industrie nehmen zudem Adsorbentien eine Schlüsselrolle ein. Materialien mit maßgeschneiderten Eigenschaften zur physikalischen und chemischen Sorption aber auch als Katalysatorträger werden in vielfältigen Verfahren der Stofftrennung verwendet. Einerseits tragen sie maßgeblich zur Selektivität und Ausbeute der Produktionsprozesse bei und sind damit ein wesentlicher Hebel des produktionsintegrierten Umweltschutzes. Andererseits werden Adsorbentien im großen Umfang im additiven Umweltschutz benötigt. Darüber hinaus finden Adsorptionsmaterialien zunehmenden Einzug in Energieverfahren (Wärmepumpen, Kälteerzeugung).

#### 4.3.1.2. Technisch-wissenschaftliche Herausforderungen

Insbesondere die Einhaltung bzw. Unterschreitung neuer gesetzlicher Grenzwerte, beispielsweise bei Emissionen organischer Lösemittel, von Stickoxiden oder Kohlenmonoxid und –dioxid, fordert dauerhafte Anstrengungen auf dem Gebiet der Stoffabtrennung und -reinigung. Forschungsaktivitäten in diesen Materialklassen sind somit unver-

mindert zwingend erforderlich. Ein Motor dieser Innovationen ist die Breite des Einsatzspektrums in nahezu allen Industriezweigen von der Schwerindustrie, der Gießereitechnik, der chemischen und pharmazeutischen Industrie, der Elektronikindustrie bis hin zur Lebens- und Futtermittelindustrie.

Im Bereich der katalytischen Nachbehandlung von (Industrie-)Abgasen gilt es u.a. durch die Kombination von mehreren Verfahrensschritten zu neuen Durchbrüchen in der Stoffabtrennung und –reinigung zu gelangen.

Der Einsatz von Membranen im Bereich organischer Medien blieb aufgrund der mangelnden Robustheit geeigneter Membranmaterialien, d.h. fehlender Lösungsmittelstabilität der verwendeten Membranen verbunden mit entsprechendem Trennschärfeverlust, limitiert. Dieser Herausforderung gilt es zukünftig zu begegnen, um die in diesem Gebiet dominierenden thermischen Trennverfahren für die Aufarbeitung organischer Medien abzulösen. Mittels Membranverfahren wären deutlich energieeffizientere Trennungen möglich.

#### 4.3.1.3. Forschungsbedarf

- » Entwicklung robusterer Membran- und Filtermaterialien: bessere Lösemittelstabilität bei gleichzeitig hoher Trennschärfe und niedrigen Einsatzdrücken.
- » Ausweitung der katalytischen Reduzierung der Treibhausgase (z. B. Methan, N<sub>2</sub>O) auf neue Anwendungsgebiete (Klärschlammverbrennung, Wirbelschichtverfahren, Gasmotoren, Zement- und Glasindustrie)
- » Entwicklung effizienter Adsorptionsmethoden für flüchtige Kohlenwasserstoffe aus z. B. Lackierereien/Druckereien.
- » Entwicklung von Adsorptions- und Oxidationsverfahren für Spurengase aus der Halbleiterindustrie.
- » Entwicklung neuer Katalysatoren für die Tieftemperaturreduktion von NO und N<sub>2</sub>O sowie der Tieftemperaturoxidation von schwer oxidierbaren Kohlenwasserstoffen, insbesondere Methan.

### 4.3.2. Wasser- und Abwasseraufbereitung

#### 4.3.2.1. Stand der Technik

Das Wasserrecycling und damit auch die Rückgewinnung von Roh- und Reststoffen sind in der industriellen Wassertechnik, besonders für deutsche Akteure in einem globalen Markt, von zunehmender Bedeutung. Die Aufbereitung und Schließung von Industrierwasserkreisläufen sind essentielle Umweltschutzbeiträge.

Im Zuge von zunehmender Rohstoffknappheit und steigenden Rohstoffpreisen ist zukünftig eine Verschärfung dieses Trends erkennbar. Zudem enthalten Industrierwasserkreisläufe auch kritische Rohstoffe, wie beispielsweise Gallium, deren Rückgewinnung aus strategischen Gründen angestrebt wird. Darüber hinaus ist das Kreislaufwirtschaftsgesetz zu berücksichtigen, welches die Rückgewinnung von Stoffen in Deutschland gesetzlich vorschreibt.

Verschiedensten Aufbereitungstechnologien wie Fällung/Flockung, Oxidation/Reduktion, Ionenaustausch, Membranfiltration, Destillation etc. alleine oder in Kombination, auch mit weiteren Verfahren, kommt hier eine tragende Rolle zu.

Etwa eine Milliarde Menschen haben heute keinen Zugang zu sauberem Trinkwasser. Die Weiterentwicklung von Adsorbentien zur Reinigung von belasteten Wässern in Kombination mit Katalysatoren, Additiven und innovativen Verfahren liefert essentielle Beiträge zur Minderung dieses erheblichen sozialen Konfliktpotentials und der Verbesserung der Lebensqualität. Ebenso bieten sie die Möglichkeit, z. B. durch Extraktion wertvoller (Spuren-)Elemente aus hochverdünnten Medien (z. B. strategisch wichtige Metalle aus Meerwasser) eine größere Unabhängigkeit bezüglich der Versorgung mit kritischen Rohstoffen zu erzielen.

### 4.3.2.2. Ionenaustauscher/Adsorbentien

#### 4.3.2.2.1. Technisch-wissenschaftliche Herausforderung

In den vergangenen Jahrzehnten wurde wertvolle Forschungsarbeit auf dem Gebiet der Adsorption von anorganischen Stoffen geleistet. Jedoch sieht man sich in der Wasser-/Abwasseraufbereitung zunehmend neuen Herausforderungen gegenüber gestellt: Bereits heute sind zahlreiche Oberflächen- und Grundwässer mit einer Vielzahl von anthropogenen Substanzen, z. B. Pflanzenschutzmitteln und deren Metaboliten, halogenierten oder halogenfreien Kohlenwasserstoffen, Nitrat sowie pharmakologisch und endokrin wirksamen Substanzen belastet. Diese Situation wird sich in den nächsten Jahren und Jahrzehnten verschärfen - es gilt ihr unter anderem durch die Erforschung der selektiven Adsorption von organischen Verbindungen zu begegnen.

#### 4.3.2.2.2. Forschungsbedarf

- » Deutliche Erweiterung der zur Auswahl stehenden selektiven Adsorber. Hierbei sind neue funktionelle Gruppen für Selektiv-Ionenaustauscher, Metall- oder Metalloxid-dotierte Polymere, oder Festkörper mit spezifisch geformten Adsorptionszentren (MIPs: Molecular Imprinted Polymers) von großem Interesse.
- » Preiswerte Sorbentien mit hoher Selektivität und Kapazität sind notwendig für die Abtrennung/Trennung von Alkalimetallen, Seltenen Erden, Halbmetallen (wie Selen, Tellur, Arsen, Bismuth, Bor, Gallium, Germanium), Anionen (wie Fluorid, Nitrat, Chlorid, Sulfat, Bromid, Iodid) und auch einer Vielzahl von organischen Verbindungen mit endokrinen, carcinogenen, antibiotischen, xenobiotischen sowie persistenten oder aber auch antioxidativen und therapeutischen Eigenschaften.
- » Weitere Fortschritte im Bereich der selektiven Adsorption von organischen Verbindungen sind notwendig.



Die (industrielle) Abwasseraufbereitung trägt eminent zur Steigerung der Lebensqualität bei und kann zudem kritische Rohstoffe aus Industriewasserkreisläufen zurück gewinnen.

### 4.3.2.3. Membrane

#### 4.3.2.3.1. Technisch-wissenschaftliche Herausforderung

Neben der Membran als solches bietet auch das Membranmodul bei einigen Anwendungen Spielraum für weitere Verbesserungen. Hier ist, insbesondere bei großen Modulen, die strömungstechnische Optimierung sowie auch eine angepasste Materialwahl zu nennen. Des Weiteren ist die energetische Effizienzsteigerung der Filtrationsprozesse Voraussetzung dafür, keramische Membranen einem deutlich erweiterten Anwenderkreis (z. B. Vorbehandlung von Meerwasser zur Umkehrosmose (UO)) zugänglich zu machen.

Zukünftig gilt es, weitere Anwendungsmöglichkeiten für keramische Membranen zu erschließen, wie beispielsweise die Teilentsalzung von Lösungen, die Trennung verschiedener Zuckerfraktionen oder die Kreislaufschließung durch Rückhaltung von kleinen Molekülen aus Flüssigkeiten. Oft sind hier Polymermembranen prinzipiell anwendbar, aber chemisch und/oder mechanisch nicht stabil. Bei den keramischen Membranen ist die Trenngrenze, das heißt die wirksame Porengröße hier der limitierende Faktor.

#### 4.3.2.3.2. Forschungsbedarf

Im Bereich der keramischen Membranen besteht Forschungsbedarf in folgenden Punkten:

- » Entwicklung von Membrangeometrien mit hoher volumenspezifischer Membranfläche
- » Verfahrensentwicklung zur Optimierung von Filtrationsleistung und Energieverbrauch
- » Entwicklung keramischer NF-Membranen mit Trenngrenze von 200 g/mol
- » Keramische Ultrafiltrations- und Nanofiltrations-Membranen hoher pH-Stabilität
- » Modifikation keramischer Membranen zum Einsatz in organischen Flüssigkeiten
- » Verfahrenskombinationen

Für Polymermembranen werden folgende Entwicklungsschwerpunkte gesehen:

- » Höhere Durchsatzleistungen der Module bei geringerem Energieaufwand
- » Verbesserung der chemischen, mechanischen und thermischen Stabilität
- » Verbesserung der Selektivität ohne Einschränkung der Produktivität
- » Neue Modulkonzepte und Membranen für Anwendungen zur besseren Ausnutzung regenerativer Energien (z. B. Biokraftstoff- sowie Biogas-, Synthesegas- und Erdgasreinigung, osmotische Destillation, Direktosmose, Wasserrückgewinnung aus Verbrennungsabgasen u.v.m.)
- » Verbesserung der Antifouling-Eigenschaften und der Erhöhung der Lebensdauer von Polymermembranen



Stetig wachsende Verkehrsaufkommen verursachen starke Belastungen für Mensch, Umwelt und Klima. Neue Leichtbaumaterialien und mobile Stromspeicher helfen dabei, nachhaltige Mobilitätssysteme zu entwickeln.

## 4.4. Materialien für die Mobilität

### 4.4.1. Leichtbau

Einheiten für den Transport von Menschen und Gütern sollen leicht, sicher, sparsam und zugleich ökologisch verträglich sein – und dies bei hoher Wettbewerbsfähigkeit und möglichst großer Wertschöpfung. Hiermit sind die Zielkonflikte, aber auch der Trend zur leichtbaugerechten Mischbauweise mit ihrer Werkstoffvielfalt und den damit einhergehenden Vor- und Nachteilen bereits vorgezeichnet.

Der Sinn des Einsatzes von modernen Leichtbauwerkstoffen in der Mobilitätsindustrie liegt zum einen in der Reduzierung des Treibstoffverbrauches durch die Verminderung der zu bewegenden Massen.

Verglichen mit anderen Alternativen, wie der Verminderung des Roll- und Luftwiderstandes sowie der Verbesserung des Wirkungsgrades beim Antriebsstrang, ist der Leichtbau hier der vielversprechendste Weg.

Bei Fahrzeugen mit elektrischen oder Hybrid-Antrieben ist zudem die Kompensation des durch die Batterien und die elektrischen Motoren verursachten Mehrgewichts der entscheidende Grund für den Einsatz derartiger Leichtbaulösungen.

Auch die Funktionsintegration stellt bei Materialien für die Mobilität einen zentralen Aspekt dar. Während im Bereich der Personenbeförderung z. B. Structural Health Monitoring, Sicherheitsaspekte (Sensoren), Innenraumbeleuchtung (Lumineszenz-Elemente) und intuitive Bedienelemente (Schalter) von besonderem Interesse sind, spielen für den Transport von Gütern thermische Isolation, Anti-Fouling und Qualitätssicherung eine wichtige Rolle.

Erkenntnisse im Leichtbau könnten auch der Windenergie-Branche (größere Windkraftträder) zu Gute kommen.

#### 4.4.1.1. Stand der Technik

Bei modernen Leichtbaustrukturen wird derzeit eine Vielzahl unterschiedlicher metallischer, polymerer bzw. keramischer Werkstoffe verwendet, die dem Anforderungsprofil hinsichtlich der mechanischen, thermischen und medialen Belastungen entsprechen müssen. Hierbei ist aufgrund ihres breit einstellbaren Eigenschaftsspektrums ein zunehmender Einsatz von Kunststoffen in aktuellen Produkten zu beobachten. Zur Erhöhung vor allem der thermomecha-

nischen Kennwerte und der Formstabilität bei Temperaturwechseln werden die Strukturen mit Faser- und Partikelmaterialeinverstärkt. Dezierte Faserverbundwerkstoffe mit polymerer Matrix und einer Endlosfaserverstärkung aus Hochleistungsfasermaterialien wie Glas- und Kohlenstofffasern sowie hochfesten Polymeren, kommen dort zum Einsatz, wo an Bauteile und Baugruppen hohe mechanische Anforderungen gestellt werden und gleichzeitig niedriges Gewicht gefordert ist. Weiterhin ist eine hohe Energieabsorption insbesondere für Crashelemente hinsichtlich des Fahrgast-Schutzes, eine wichtige Eigenschaftskomponente.

Neben der Endlosfaserverstärkung spielt die Verstärkung von Polymeren durch Kurzfasern und anschließendem Spritzguss bei der Realisierung komplexer Geometrien im Leichtbau, vor allem auch im Automobilbau, eine wichtige Rolle. Derzeit werden ca. 1 Million Tonnen dieser Materialien im Jahr in Europa produziert. Die Wachstumsraten liegen im zweistelligen Bereich.<sup>4</sup>

Eine andere Möglichkeit zur Verbesserung der Bauteileigenschaften ist die Verwendung von Hochleistungspolymeren, Polymerblends, Copolymeren und Sandwich-Strukturen. Bei letzteren kommt zusätzlich dem Design der inneren und äußeren Grenzflächen zentrale Bedeutung zu. Weiterhin hat neben den klassischen Leichtbaumaterialien Titan, Aluminium und Magnesium auch der Leichtbau mit modernen Stahlwerkstoffen stark an Bedeutung gewonnen. In der Automobilindustrie dominieren beim Karosseriebau die neuen Stahlwerkstoffe, bei denen eine Kombination aus hoher Festigkeit bei gleichzeitiger guter Verarbeitbarkeit im Vordergrund der Entwicklungen steht.

Die Funktionsintegration auf Werkstoffebene ist noch nicht weit verbreitet. Im Bereich der Luftfahrt werden vereinzelt Ansätze zum Structural Health Monitoring verfolgt. Durch in die Struktur integrierte Sensoren werden z. B. Lastzyklen kontinuierlich überwacht und damit eine zustandsbasierte Wartung ermöglicht. Hierdurch können die Wartungskosten gegenüber der zeitbasierten Wartung enorm gesenkt werden.

#### 4.4.1.2. Defizite und Entwicklungsziele

Bei der Entwicklung von Leichtbaukomponenten im Bereich der Mobilität kommt der Erfassung der komplexen Belastungszustände sowie der werkstoff- und strukturgerechten Umsetzung in ein entsprechendes Konstruktionskonzept – unter Einbeziehung allfälliger Fertigungsrestriktionen – ein hoher Stellenwert zu. Derzeit ist hier eine weitgehende konstruktive und werkstoffliche Trennung der Tragfunktion etwa vom Korrosions- und Verschleißschutz zu beobachten. Dies ist darin begründet, dass die zur Verfügung stehende Werkstoffpalette nur eingeschränkt die thermomechanischen, medialen und tribologischen Anforderungen erfüllen kann. Auf Tragstrukturen werden aus diesem Grund zusätzliche Verschleiß- und Korrosionsschutzschichten separat aufgetragen. Ziel werkstofftechnischer und konstruktiver Entwicklungen sind daher neuartige Leichtbaustrukturen mit hoher Funktionsintegration, bei denen etwa durch den Einsatz neuer Leichtbauwerkstoffe und werkstoffverbunde sowohl die thermomechanischen als auch die funktionellen Anforderungen erfüllt werden.

Zudem wird beim Einsatz von z. B. Hochleistungsfaserverbundwerkstoffen heute noch häufig das Konzept des „Black Metal Design“ verfolgt, es werden also für Faserverbundwerkstoffe bestehende konstruktive Lösungen aus dem Metallbau direkt übernommen. Diese Lösungen sind dann aber nicht faserverbundgerecht konstruiert und schöpfen das Potential der neuen Werkstoffkombinationen bei weitem nicht aus. Gleiches gilt für die Verarbeitungsverfahren.

Die Integration zusätzlicher Funktionen in die strukturellen Elemente scheidet derzeit häufig an fehlenden Erfahrungen mit den neuen Technologien und bestehender produktionstechnischer Fragestellungen. Insbesondere die Kontaktierung leitender Schichten und integraler Sensoren ist technologisch und produktionstechnisch hoch anspruchsvoll.

Die Umsetzung faserverbundbasierter Leichtbauweisen in die Serienproduktion beispielsweise im Automobilbau steht zusätzlich vor der großen Herausforderung, kurze Zykluszeiten zu realisieren. Hierfür werden neue Formulierungen

<sup>4</sup> AVK Composites-Marktbericht 2011, S. 10

für duromere Matrix-Werkstoffe einerseits und höhere Belastbarkeiten (thermisch, mechanisch) für kostengünstige thermoplastische Matrizes andererseits benötigt. Weiterhin sind neue Prozessketten und die erforderlichen Technologien für die kosteneffiziente und zykluszeiten-orientierte Fertigung von Faserverbund-Komponenten notwendig. Ein gezieltes Grenzflächendesign zwischen Matrix-Werkstoff und Verstärkungsfaser ist zur Ausnutzung der Festigkeiten/Steifigkeiten von Hochleistungsfasermaterialien notwendig. Weiterhin müssen Hochmodulfasern kostengünstiger werden, um einem breiten Einsatz im Automobilbau zugeführt werden zu können. Ebenso stellen mid-tech Carbonfasern ein eigenes Entwicklungsziel dar, wobei deren Eigenschaften deutlich oberhalb von Glasfasern liegen sollen, jedoch aus Kostengründen nicht das Niveau der Polyacrylnitril (PAN)-basierten Carbonfasern erreichen können.

### 4.4.1.3. Technisch-wissenschaftliche Herausforderungen

Während in der Verfahrenstechnik u.a. die spezifischen Temperatureinsatzgrenzen von Kunststoffen und Faserverbundwerkstoffen mit polymerer Matrix deren großtechnischen Einsatz beschränken, stehen im Bereich der Mobilität wirtschaftliche Herausforderungen ihrer breiten Einführung entgegen. Die starke gegenseitige Beeinflussung von Materialeigenschaften, Produktionsverfahren und Bauteileigenschaften erfordern ganzheitliche Ansätze für die wirtschaftliche Herstellung von Faserverbundwerkstoffen und verwandten mehrphasigen Werkstoffsystemen. Prozesshilfsmittel wie polymere Bindermaterialien stellen ein enormes Potential für robuste und wirtschaftliche Fertigungsprozesse dar, sind jedoch bezüglich ihrer Auswirkungen auf die Faser-Matrix-Grenzfläche und damit die Bauteileigenschaften nur unzureichend untersucht.

Die Entwicklung kostengünstiger Carbonfasern erfordert die Untersuchung alternativer Precursorsysteme, bei denen derzeit der biobasierte Holzbestandteil Lignin eingehender untersucht wird. Die wissenschaftlich-technischen Herausforderungen umfassen hier, neben dem Precursor-Spinnprozess, vor allem die Entwicklung angepasster, effektiver Stabilisierungs- und Carbonisierungsregimes. Darüber hinaus wird der Herstellungsprozess vom Precursor zur beschichteten Carbonfaser betrachtet.

Im Bereich der Funktionsintegration limitieren produktionstechnische Fragestellungen einen breiten Einsatz. Auch die Problematik der Grenzflächen zwischen Festigkeitsträger bzw. Sensor und Werkstoff ist nicht in allen Fällen befriedigend geklärt. Die Entwicklung von flüssigen Beschichtungen (Schichten) für die Festigkeitsträger, um u.a. die mechanische Belastung zu reduzieren und die Haftungsvermittlung positiv zu beeinflussen, stellt eine zentrale Aufgabe dar.

### 4.4.1.4. Lösungsansätze

Zur Lösung des grundlegenden Zielkonfliktes – kosteneffiziente Verbesserung der Eigenschaften – ist eine nachhaltige enge Zusammenarbeit von Werkstoffentwicklern, Konstrukteuren und Technologen entlang der gesamten Wertschöpfungskette erforderlich. Neben der Entwicklung neuartiger Kunststoffe und polymerbasierter (Faser-) Verbundwerkstoffe mit einsatzorientierten Eigenschaften sowie alternativer Verstärkungsfasern, wie mid-tech Carbonfasern, ist die Weiterentwicklung von textilen Verfahren für eine kostengünstige Bauteilherstellung zielführend.

Durch die Verwendung spezieller Copolymerisate können neue Leichtbaumaterialien für unterschiedlichste industrielle Anwendungen bereitgestellt werden. Hierdurch können sowohl die geforderten thermomechanischen Kennwerte, als auch funktionelle Eigenschaften (wie etwa akustische, tribologische oder elektrische) eingestellt werden.

Besonderes Potential bieten neuartige beanspruchungsgerechte Textilverstärkungen in Kunststoffen. Die variierbaren, richtungsabhängigen Struktureigenschaften von Komponenten aus Textilverbunden entstehen in einem simultanen Prozess von Werkstoffkonstruktion und Bauteilgestaltung, was – im Unterschied zu konventionellen Werkstoffen – eine besonders enge Verzahnung aller Prozessstufen erzwingt. Dazu müssen grundlegende Erkenntnisse für alle Stufen der Wertschöpfungskette, beginnend vom Filament über Hybridgarn, Halbzeug und textile Preform bis hin zu konsolidierten Komponenten und Bauteilen in funktionsintegrierender Mischbauweise mit reproduzierbarer Qualität und kurzen Taktzeiten erarbeitet werden.

Bei den metallischen Werkstoffen liegen die derzeitigen Forschungsschwerpunkte in unterschiedlichsten Bereichen: Sie gilt es zukünftig für Ihren jeweiligen Einsatz weiter zu optimieren und besonders zu kostengünstigeren Produktionsmethoden zu gelangen.

Die Weiterentwicklung von Leichtbauwerkstoffen birgt erhebliches Potential zur Energieeinsparung. Beim Automobilbau könnte die Reduzierung von 5 % des Karosseriegewichtes in etwa 3 % Einsparung des Kraftstoffverbrauches bewirken.

Ferner ermöglicht die Entwicklung intelligenter Sensormaterialien neue integrale Bauweisen. Dies gilt insbesondere für die damit verbundenen Möglichkeiten der Strukturüberwachung (Structural Health Monitoring) und der Integration smarterer Elemente (Schalter und Sensoren) im Automobilbau. Die Funktionalisierung der Oberflächen mittels Anti-Fouling ist u.a. für Anwendungen im Schiffsbau oder für Transportcontainer vielversprechend.

## Materialien für extreme Anwendungen

Eine ganz besondere Herausforderung, gerade für die auf organischen Werkstoffen (Kunststoffe und Kunststoff-Verbunde) basierenden Leichtbauteile, besteht in ihrem Einsatz unter Extrembedingungen, wie sie beispielsweise die Raumfahrt mit sich bringt. Einerseits drängt sich der Einsatz dieser Leichtbauwerkstoffe aufgrund ihres gewichtsbezogen extrem günstigen Eigenschaftsprofils geradezu auf, andererseits sind gerade sie unter den dort herrschenden Extrembedingungen (Temperatur, Temperaturwechsel, Einwirkung hochenergetischer Strahlung, Kollision mit hochschnellen Partikeln) besonders anfällig. Sollen künftige Transportsysteme, Satelliten und Missionsmodule bezahlbar und mit akzeptabler Umweltbelastung betreibbar werden, so müssen organische und hybride Werkstoffe weit mehr als heute Verwendung finden. Insbesondere die Verbundhaftung unter thermomechanischer und medialer Belastung, die Tieftemperatur-Schlagzähigkeit, die Hochtemperatur-Formstabilität und die Strahlungsbeständigkeit gilt es hierfür systematisch zu verbessern. Für alle diese Fragen gibt es bereits erste Ansätze vor allem aus dem zivilen und militärischen Flugzeugbau, die es systematisch erheblich weiterzuentwickeln gilt. Umgekehrt werden die damit erzielten Verbesserungen auch wieder den erdnäher betriebenen Systemen zugutekommen.

Eine gezielte Gestaltung des Interieurs von Fahrzeugen wird hinsichtlich der Aspekte Komfort, Sicherheit, Wandelbarkeit und Funktionalisierung immer wichtiger. Funktionen sind hier thermische und akustische Isolation, Funktionsintegration, Haptik, Schmutzabweisung, Wandelbarkeit des Innenraums und eine recyclinggerechte Gestaltung. Die Kombination von faserbasierten Werkstoffen mit weiteren Werkstoff-Systemen und die Gestaltung entsprechender Prozessketten zu Herstellung und Montage ermöglichen die Integration von Elementen der energieeffizienten Klimatisierung, Sensorik, Aktuatorik, Beleuchtung (Ambient Lighting) oder Fahrerassistenz-Systemen in das Interieur. Mit dem Wandel hin zur E-Mobilität und zu adaptiven/wandelbaren Fahrzeugen werden diese Ansätze an Bedeutung zunehmen.

### 4.4.1.5. Forschungsbedarf

- » Neuartige Kunststoffe und polymerbasierte Verbundwerkstoffe
- » Grundlegende Erkenntnisse der Wertschöpfungskette im Bereich textilverstärkte Kunststoffe um so gezielte Struktureigenschaften solcher Materialien in einem simultanen Prozess von Werkstoffkonstruktion und Bauteilgestaltung entstehen zu lassen
- » Neue Produktionsmethoden für die Herstellung hoch legierter Stähle
- » Neue Verfahren und Beschichtungen für das Warmumformen von Stählen
- » Verbesserung bzw. Substitution des Herstellungsverfahrens von Titan mit dem Ziel den hohen Materialpreis zu senken
- » Entwicklung schweißgeeigneter Aluminium-Legierungen
- » Entwicklung gut verformbarer und kostengünstiger Magnesium-Blechwerkstoffe für den Automobilbau
- » Intelligente Sensormaterialien
- » Verbesserte Anti-Fouling-Beschichtungen, insbesondere Untersuchung der Alterung und Ermüdung der Schichten, um geeignete Maßnahmen zur dauerhaften wie auch umweltverträglichen Stabilisierung (einschließlich Brandschutz) zu entwickeln
- » Neue Compounds zur Verbesserung von Formgebung und Dimensionsstabilität für Exterieur-Anwendungen
- » Entwicklung neuartiger Hybrid-Werkstoffe für die Integration funktionaler Elemente in das Interieur von Fahrzeugen

## 4.4.2. Korrosionsschutz

In vielen technischen Anwendungen und insbesondere bei technischen Systemen im Bereich der Mobilität werden Komponenten neben anderen Belastungen häufig einer korrosiven Beanspruchung ausgesetzt. Durch Korrosionsschäden können Funktionsstörungen auftreten, die bis zu einem völligen Funktionsverlust des technischen Systems führen und somit hohe Kosten zur Folge haben können. Weltweit durchgeführte Studien sprechen von einem Gesamtschaden durch Korrosion in Höhe von ca. \$ 1,8 Bio. und ca. 3-4 % des BNE (Bruttonationaleinkommen, früher: Bruttosozialprodukt) der Industrienationen.<sup>5</sup>

### 4.4.2.1. Stand der Technik

Der Korrosionsschutz wird durch aktive oder passive Maßnahmen erreicht. Insbesondere auf dem Gebiet des passiven Korrosionsschutzes durch Schutzschichten gibt es etablierte Verfahren und Werkstoffe, mit denen technische Systeme mit dem notwendigen Schutz versehen werden können. Werkstoffseitig kommen organische, anorganische oder metallische Beschichtungen je nach Einsatzbedingungen zum Einsatz. Die Beschichtungsverfahren weisen eine große Palette an Möglichkeiten, vom Lackieren und Pulverauftragsverfahren über galvanische Verfahren bis hin zu thermischen und vakuumbasierten Beschichtungsverfahren auf. Je nach Einsatzrandbedingungen und Bauteilgeometrie müssen hoch entwickelte multifunktionale Werkstofflösungen verwendet werden, da im technischen Einsatz neben der Korrosion andere Belastungen, wie z. B. tribologische oder thermische Belastungen, zusätzlich wirken. Nicht zuletzt durch steigende Anforderungen, durch z. B. Erhöhung von Leistungsdichten, stoßen die etablierten Verfahren und Werkstofflösungen an ihre Grenzen. Auch durch gestiegene Umwelt- und Gesundheitsanforderungen wird ein großer Bedarf an Substitutionsverfahren zu etablierten Systemen, wie z. B. der Chromatierung, ausgelöst.

### 4.4.2.2. Technisch-wissenschaftliche Herausforderung

Bedingt durch steigende Anforderungen an die technischen Systeme bei gleichzeitiger Veränderung der Einsatzrandbedingungen werden Entwicklungen im Bereich der Beschichtungswerkstoffe notwendig. Die besondere Herausforderung liegt dabei in der Entwicklung neuer multifunktionaler Werkstoffe, die den notwendigen Schutz über die Betriebsdauer hinweg gewährleisten. Erschwert wird diese Entwicklung dadurch, dass für einen potentiellen Werkstoff die Beschichtungsverfahren weiterentwickelt werden müssen, so dass die Beschichtungen bei veränderten geometrischen Randbedingungen immer noch auf die Funktionsflächen aufgebracht werden können. Als Beispiel sei hier die Entwicklung im Bereich des Motorenbaus genannt, wo eine Erhöhung der Leistungsdichte bei modernen Diesellaggregaten zu ca. 100 kW Leistung pro Liter Hubraum führt. Dies wird nur durch eine Verschärfung der Betriebsrandbedingungen, z. B. Erhöhung von Verbrennungstemperaturen gekoppelt mit einer Verschärfung von Korrosionsvorgängen, bei gleichzeitiger Bauteilverkleinerung erreicht.

### 4.4.2.3. Forschungsbedarf

- » Besseres Verständnis von Korrosionsvorgängen, bspw. an neuen Leichtbauwerkstoffen oder in neuen Kraftstoffen anhand von hochauflösenden elektrochemischen Untersuchungsmethoden
- » Kombination unterschiedlicher Werkstoffklassen durch maßgeschneiderte Werkstoffarchitekturen sowie neue, angepasste Fügetechnologien unter Berücksichtigung der lokalen Korrosionseigenschaften.
- » Entwicklung von leistungsfähigeren Werkstoffen in Form von Kompositen, Mehrlagen- oder Gradientenstrukturen sowie neue Werkstoffverbünde
- » Steigerung der Ressourceneffizienz, bspw. durch den Einsatz selbstheilender Materialien im Korrosionsschutz unter Anwendung der chemischen Nanotechnologie
- » Verwendung natürlicher, biogener oder biotechnologisch herstellbarer Substanzen als nachhaltige Beschichtungsmaterialien (z.B. Biopolymere, Lackharze ohne fossilen Kohlenstoff, biobasierte Bindemittel, Beschichtungsstoffe auf Basis pflanzlicher Öle und Zucker)

<sup>5</sup> G. Schmitt: Global Needs for Knowledge Dissemination, Research, and Development in Materials Deterioration and Corrosion Control, World Corrosion Organization, 2009

- » Substitution kritischer Elemente (Chrom, Nickel, ...) in Beschichtungen, Überzügen und chemischen Konversionsschichten durch Entwicklung neuer chemischer und plasma-chemischer Behandlungsverfahren für Multimetall-Anwendungen

### 4.4.3. Mobile Stromspeicher

#### 4.4.3.1. Stand der Technik

Bisher haben bereits eine Reihe von Akkumulator-Systemen die technische Marktreife erreicht und sind kommerziell verfügbar. Eine dominierende Stellung nimmt der Blei-Akku ein, dessen technische Entwicklung und Optimierung für unterschiedliche Anwendungen am weitesten fortgeschritten ist. Er besitzt ein breites Anwendungsspektrum, das von der Starterbatterie, über die Notstromversorgung, den Antrieb von Schienenfahrzeugen und Booten bis hin zur Bordelektronik in Flugzeugen und Schiffen reicht. Nachteil des Blei-Akkus ist seine relativ niedrige Energiedichte, d.h. er liefert für viele Anwendungen zu wenig Energie pro Gewicht. Für mobile Kleingeräte sind daher die technisch leichter handhabbaren Ni-Cadmium-, Ni-Metallhydrid- und vor allem Li-Ionen-Batterien besser geeignet. Sie sind für den Betrieb von elektronischen Hightech-Geräten, wie Mobiltelefon, digitale Foto- und Videokamera oder den Laptop unentbehrlich.

Insbesondere durch die starke Förderung der Elektromobilität findet die Li-Ionen-Batterie als Teil alternativer Antriebe auch zunehmend Einzug als Ergänzung oder gar Ersatz des Verbrennungsmotors bei Straßenfahrzeugen. Zurzeit kommen dabei noch vermehrt Ni-Metallhydridbatterien zum Einsatz. Mittelfristig geht die Entwicklung jedoch in Richtung der Hochleistungs- und Hochenergie-Lithium-Ionen-Batterie, der aus technischen und ökonomischen Gründen bessere Chancen als Standardtechnologie eingeräumt wird. Langfristig geht die Entwicklung in Richtung Lithium-Schwefel- bzw. Lithium-Sauerstoff-Batterien. Der Markt von Lithium-Hochenergiebatterien für mobile Geräte wird überwiegend von Herstellern aus dem asiatischen Raum bedient. Eine Reihe deutscher Unternehmen hat sich jedoch bereits in der Lithium-Technologie entlang der Wertschöpfungskette (Materiallieferant-Komponentenhersteller-Zellenhersteller-Batterieassembler-Systemintegrator) engagiert, um gemeinsam mit etablierten Forschungseinrichtungen einen Technologievorsprung und die Marktführerschaft bei Lithium-Großbatterien zu erlangen.

Die Batterien auf Li-Technologiebasis zählen derzeit zu der besten, kommerziell verfügbaren, elektrochemischen Speichertechnologie. Der Wirkungsgrad zwischen Ein- und Ausspeichern liegt bei 95 Prozent – eine Effizienz, die von keiner anderen Speichertechnologie erreicht, geschweige denn übertroffen wird. Gleichzeitig verfügt die Li-Batterietechnologie über eine hohe Ein- und Ausspeicherdynamik, die sowohl in leistungs- als auch energieorientierten Netzanwendungen vorteilhaft eingesetzt werden kann. Die Selbstentladung liegt bei ca. einem Faktor zehn unter der der Bleitechnologie bei einer gleichzeitig deutlich niedrigeren Wartungsintensität. Batterien auf Basis der Li-Ionen-Technologie weisen wegen ihrer hohen Energiedichte ein relativ niedriges Bauvolumen auf.

#### 4.4.3.2. Entwicklungsziele

Für den mobilen Einsatz von Batterien werden sich in Zukunft weitere Anwendungsmöglichkeiten eröffnen. Im Consumer-Bereich weitet sich der Akkubetrieb von elektrischen Werkzeugen, wie Schrauber und Bohrer (cordless tools) und Kleingeräten (Rasenmäher) weiter aus. Dazu werden verbesserte Hochleistungsbatterien mit hoher Energiedichte benötigt.

Im Automobilbereich hat sich Deutschland zum Ziel gesetzt bis 2020 eine Million zugelassene Elektrofahrzeuge vorzuweisen.<sup>6</sup>

Weiterhin werden Stromspeicher für die lokale Spitzenlastabdeckung der Stromnetze benötigt, sowie Systeme, die als Puffer in diskontinuierlich arbeitenden, netzfernen Sonnen- oder Windkraftwerken Verwendung finden. Für diese

<sup>6</sup> Fortschrittsbericht der Nationalen Plattform Elektromobilität (Dritter Bericht), Berlin, Mai 2012

Anwendungen sind Akkumulatoren mit hoher Speicherkapazität erforderlich, die bisher dafür nicht verfügbar sind. Die Aktivitäten zur Forschung und Entwicklung moderner Akkumulatorsysteme könnten auch in diese Richtung erheblich ausgeweitet werden.

### 4.4.3.3. Technisch-wissenschaftliche Herausforderung

Die Arbeiten auf dem Gebiet der Elektromobilität zeigten in den vergangenen Jahren, dass nicht mehr der Verbrennungsmotor das Herzstück des Automobils der Zukunft ist, sondern der Elektromotor. Nun hat Deutschland im internationalen Vergleich sowohl eine starke Automobilindustrie als auch eine Spitzenposition in der Energieversorgung einschließlich erneuerbarer Energien. In der Lithium-Batterieentwicklung ist Deutschland durch die fehlende Unterhaltungselektronikindustrie im Laufe der letzten Jahrzehnte jedoch weit abgeschlagen. Dies gilt für den industriellen Bereich genauso wie für den Hochschulbereich, wo erst seit wenigen Jahren rege Aktivitäten vorhanden sind.

Nachteil der Li-Technologie derzeit ist das hohe Kostenniveau und die gleichzeitige Unsicherheit bei Vorhersagen zur Lebensdauer (10-20 Jahre). Grundlegende Idee zukünftiger Forschung und Entwicklung muss es daher sein, kostengünstigere elektrochemische Batteriespeicher mit hoher Leistungsdichte, hohem Wirkungsgrad und hoher Zuverlässigkeit und Sicherheit für stationäre Anwendungen zu suchen. Der Schlüssel für bessere Speicher sind bessere Materialien. Die wissenschaftlichen Herausforderungen liegen daher ganz allgemein in der Entwicklung von effizienteren Aktiv- und Nichtaktivmaterialien sowie in Technologien zur optimalen Funktion dieser Materialien im System Elektrode und Zelle. Hinzu kommen hohe Sicherheitsanforderungen.

Neueste Entwicklungen im Materialbereich sind in Bezug auf Erhöhung der Zuverlässigkeit und Lebensdauer vielversprechend.

Neben der hochaktuellen Li-Ionen-Technologie gilt es auch parallel, andere Optionen für Batterien zu prüfen. Die Vorteile im Vergleich, der Anwendungsbezug, und die Innovation im Vergleich zum Status quo sollten hierfür der Maßstab sein.

### 4.4.3.4. Lösungsansätze

Im Bereich Li-Ionen-Batterien sind Fortschritte in Richtung höherer Performance durch neue Elektrodenmaterialien und Elektrolyte notwendig. Es müssen Anoden und Kathoden mit höherer Lade-/Entladekapazität entwickelt werden (Lithium-Interkalation). Höhere Energiedichten können auch durch eine höhere Zellspannung erreicht werden, dabei ist der Reaktivität der Elektroden/Elektrolyt-Grenzfläche (SEI = Solid-Electrolyte-Interface) besondere Aufmerksamkeit zu schenken. Durch Nanostrukturierung könnten Alternativen zum konventionellen Graphit gefunden werden. Höhere Sicherheit und Stabilität der Lithium-Systeme kann durch Substitution der organischen Flüssigelektrolyte durch Polymerelektrolyte, stabilere Elektrolytsalze und Elektrolytadditive sowie durch neue Überladungsschutz-mechanismen erreicht werden.



Keramik von der Rolle: Keramische Separatoren steigern die Sicherheit von Lithium-Ionen Akkus (© Evonik)

### 4.4.3.5. Forschungsbedarf

- » Anoden und Kathoden mit höherer Lade-/Entladekapazität
- » Erhöhung der Zellspannung, bspw. durch Kathoden aus Mischoxiden vom Typ  $\text{LiMPO}_4$  mit ( $M = \text{Co}, \text{Ni}, \text{Mn}$ )
- » Alternativen zum konventionellen Graphit, bspw. durch Nanostrukturierung erzeugte neue meso-poröse Kohlenstoffstrukturen
- » Bei Lithium-Systemen: Substitution der organischen Flüssigelektrolyte durch Polymerelektrolyte, stabilere Elektrolytsalze und -additive

## 4.4.4. Hochtemperaturprozesse

### 4.4.4.1. Stand der Technik

Unter der Vielzahl hochschmelzender, harter und inerte Substanzen werden bislang vor allem die Oxide sowie Wolframcarbid und Siliciumcarbid als Refraktärmaterialien für Hochtemperaturprozesse eingesetzt. Eine Erweiterung des Substanzspektrums würde höhere Arbeitstemperaturen ermöglichen und somit zu einer Effizienzsteigerung von Prozessen führen. Bei intermetallischen Verbindungen zum Beispiel als Materialien für Flugturbinen stehen heute Titanaluminidlegierungen an erster Stelle.

Der Ersatz von etablierten Legierungen und Refraktärmaterialien durch temperaturstabilere Werkstoffe brächte erhebliche Effizienzsteigerungen zum Beispiel im Lufttransport. Die Gesamtemissionen von – und Verunreinigungen durch – Flugzeuge sind um mehr als 15 % in den letzten 30 Jahren reduziert worden. Dies wurde zu einem großen Teil durch neue Materialien erreicht, insbesondere durch Veränderung der Motoren bzw. Turbinen. Wenn beispielsweise ein Airbus 320 2700 l Kerosin pro Flugstunde verbraucht, erzeugt er siebeneinhalb Tonnen  $\text{CO}_2$ , etwa drei Tonnen  $\text{H}_2\text{O}$  und setzt in Abhängigkeit von den Flugbedingungen und der Höhe 5 bis 40 kg  $\text{NO}_x$  sowie 1,5 bis 5,5 kg CO an Verbrennungsprodukten frei.

### 4.4.4.2. Technisch-wissenschaftliche Herausforderungen

Jenseits der etablierten Materialien erfordert die Einführung neuer Werkstoffe umfangreiche Testungen und Anpassungen bestehender Techniken und Methoden. Insbesondere die Verarbeitung von hochschmelzenden Materialien, aber auch ihre reproduzierbare Herstellung und sichere Charakterisierung stellt an Wissenschaftler und Ingenieure besondere Herausforderungen. Höchstschmelzende Verbindungen wie Hafniumdiborid, -nitrid, Tantalzirconiumcarbid oder Rheniumwolframid sind erst oberhalb 3000 °C reaktiv und somit schwer verdichtbar.

### 4.4.4.3. Lösungsansätze und Verbesserungspotential

Die Suche nach weiteren Precursor-basierten Synthesewegen zu Hochtemperaturwerkstoffen sowie die Fortentwicklung und Etablierung von modernen Verdichtungs- und Beschichtungsmethoden birgt großes Potential, um moderne Hochtemperaturwerkstoffe einsetzbar zu machen. Reaktives Sintern und Plasmaspritzen sind Beispiele für Techniken, die fortentwickelt werden müssen, damit viel versprechende Substanzen den Weg vom Labor in die Technik finden.

### 4.4.4.4. Forschungsbedarf

- » Auf der Grundlagenseite ist vor allem die Forschung im Bereich ternärer Boride, Carbide und Silicide, die Untersuchung ihrer mechanischen wie elektrischen Eigenschaften und die Feststellung der Korrosionsstabilität besonders notwendig.
- » Weiterer Forschungsbedarf entsteht an der Schnittstelle zwischen Synthese und Charakterisierung neuer Substanzen in der Chemie, der Kompaktierung oder Beschichtung von Bauteilen mit diesen Substanzen in den Material- und Werkstoffwissenschaften sowie der Bauteilentwicklung im Maschinenbau.



Polymere Intraokularlinse (IOL) auf Methacrylat-Basis samt Wirkstoff-Depot zur medikamentösen Behandlung des Nachstars. Mittels der Haptik wird die eigentliche Linse im Kapselsack gegen Verrutschen gesichert.  
(© Angewandte Biophysikalische Chemie/Philipps-Universität Marburg)

## 4.5. Materialien für die medizinische Technik

### 4.5.1. Stand der Technik

Seit Jahrzehnten sind aus der medizinischen Technik Werkstoffe auf Keramik-Basis sowie Titan und Titanlegierungen nicht mehr wegzudenken. Insbesondere die Titanwerkstoffe genießen hohe Anerkennung als Implantatmaterial: Da sie im Körper rasch eine Oxidschicht ausbilden, wird eine Abwehrreaktion des Immunsystems weitestgehend verhindert. Eine moderne Medizin jedoch erscheint heute ohne den Einsatz von hoch entwickelten Polymermaterialien nicht mehr denkbar. Polymere werden in einer breiten Palette sehr unterschiedlicher Gebiete eingesetzt. Typische Anwendungsgebiete reichen von medizinischen Einwegartikeln wie Handschuhen, Pflastern, Blutbeuteln und Spritzen bis zu Kontaktlinsen und Dentalmaterialien, polymerbasiertem Herzklappenersatz, ophthalmologischen Implantaten oder Nahtmaterialien für den Wundverschluss. Dies sind jedoch nur wenige, nahezu willkürlich ausgewählte Beispiele aus einer sehr langen Liste von Anwendungen von Polymeren in den unterschiedlichsten Bereichen der Medizin. In den medizintechnischen Anwendungsgebieten, die aktuell die größten Marktvolumina besitzen, liegt der Schwerpunkt des Einsatzes von Polymeren vor allem als Verbrauchs- oder Konstruktionsmaterial. Auf der anderen Seite besteht nun schon seit einiger Zeit ein mehr und mehr an Bedeutung gewinnender Trend, dass zunehmend komplexe Einsatzgebiete entwickelt werden, bei denen biomedizinische und pharmakologische Funktionen von Polymeren im Fokus stehen. Bei diesen sind die Polymere integrale Bestandteile der medizinischen Diagnostik und Therapie.

Infektionen können in praktisch allen medizinischen Gebieten durch den Einsatz von sterilen Einwegartikeln bedeutsam reduziert werden. Blutbeutel, Handschuhe, sterile Verpackungen, Katheter und Schlauchsysteme sind hier nur ein paar Beispiele für Gegenstände, die nach Kontakt mit potentiell oder tatsächlich infektiösen Materialien einfach und problemlos entsorgt werden können und so die medizinische Hygiene bedeutsam verbessert haben.

Ein Kernvorteil von polymeren Materialien im Vergleich zu Glas oder metallischen Werkstoffen ist die hervorragende Verarbeitbarkeit von Kunststoffen. Sie erlaubt es, in einfachen und massenproduktionsfähigen Prozessschritten, ein breites Spektrum von Formen und Geometrien von medizintechnischen Gegenständen mit einem genau definierten Eigenschaftsspektrum zu generieren. So können beispielsweise in sehr einfachen Produktionsprozessen transparente Einwegspritzen mit einem geringen Totvolumen oder flexible Beatmungsschläuche (Endotrachealtuben) mit geeigneten mechanischen Eigenschaften oder komplex strukturierte Bauteile von medizinischen Geräten erzeugt werden.

Derartige Einsatzgebiete von Polymeren sind nicht nur aus medizinischer Sicht bedeutsam, sondern auch aus wirtschaftlicher Sicht attraktiv. Aus einem einfachen und preiswerten Kunststoff kann durch eine entsprechende Verarbeitung und Funktionsgebung ein sehr hochwertiger und für einen medizinischen Einsatz geeigneter Gegenstand werden. Dabei erlaubt das auf diesem Gebiet erarbeitete technologische Know-how die Herstellung von Massenprodukten mit einer einzigartig hohen Wertschöpfung. Wie wohl in keinem anderen Gebiet der Materialforschung sind dabei Innovationskraft und Sicherstellung eines hohen Qualitätsniveaus die zentralen Faktoren, um sich auf diesem Markt behaupten zu können.

Eine vollständig neue Qualität der Anforderungen an die eingesetzten Materialien ist dann gegeben, wenn diese dauerhaft in unmittelbarem Kontakt mit menschlichem (oder auch tierischem) Blut oder Gewebe kommen. In solchen Fällen spielt die Frage der biologischen Verträglichkeit der eingesetzten (Bio-)Materialien eine zentrale Rolle. Beispiele hierfür sind Dialysemembranen aus Polymerfasern, die Patienten mit Störungen der Nierenfunktion ein langfristiges Überleben bei sehr häufig relativ guter Lebensqualität erlauben, oder Polymere in Hüftimplantaten oder künstliche Intraokularlinsen (IOL), bei denen die Polymermaterialien in ähnlich intensiven Kontakt mit dem biologischen System des Patienten geraten. Während im ersteren Beispiel die Blutverträglichkeit (Hämokompatibilität) zwar sehr gut sein, aber nur für einen begrenzten Zeitraum gewährleistet werden muss, sind bei den beiden letztgenannten Anwendungen die Implantate über - im Idealfall - viele Jahre in Kontakt mit dem biologischen System. Dabei müssen häufig komplexe Anforderungen berücksichtigt werden, beispielsweise muss der Randbereich einer Intraokularlinse von Zellen bewachsen werden, um eine gute Integration in das Auge zu gewährleisten. Der zentrale Bereich muss aber zellabstoßend sein, damit die Linse nicht durch Überwucherung mit Zellen getrübt wird. Dies erreicht man durch eine orts aufgelöste Oberflächenmodifizierung.

Neben den medizintechnischen Anwendungen wurden in den letzten Jahren Polymere als sehr wirksame Werkzeuge für ein breites Spektrum von biomedizinischen und pharmakologischen Anwendungen entwickelt. Dabei ist der Kontakt mit dem menschlichen oder tierischen Organismus noch weiter intensiviert, da die Polymere integraler Bestandteil des biologischen Systems werden. Ein erstes Beispiel für derartige Anwendungen war der Einsatz von Polymeren wie Polyvinylpyrrolidon oder perfluorierten Polyethern als Blutplasmaexpander im zweiten Weltkrieg. In den siebziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts wurden erstmalig polymerbasierte bzw. polymerkonjugierte Wirkstoffe eingesetzt, bei denen entweder das Polymer selbst als Medikament oder zumindest als Trägersubstanz für einen niedermolekularen Wirkstoff agierte. Nach diesen ersten Gehversuchen wurde in den vergangenen Jahren eine sehr große Anzahl von Materialien für einen derartigen Einsatz vorbereitet. Sie agieren als Transportmittel bzw. Maskierungsagens für Wirkstoffe, Transportagens für Gene (gene carrier, gene delivery), dreidimensionale Gerüstsubstanzen in der regenerativen Medizin und in der gezielten Wirkstofffreisetzung (controlled drug delivery). Gerade in den letzten Jahren haben trans- und interdisziplinäre Anstrengungen neue Möglichkeiten für den Einsatz von Polymeren in diesen Arbeitsfeldern entwickelt und so zum enormen Fortschritt von Anwendungen in den Lebenswissenschaften beigetragen.

#### **4.5.2. Technisch-wissenschaftliche Herausforderungen**

Anwendungen von Polymeren in der Medizin besitzen bereits jetzt eine erhebliche wirtschaftliche Bedeutung und erlauben, die Lebensqualität von Menschen in signifikantem Maße zu verbessern. Die derzeitigen Einsatzgebiete stellen jedoch erst einen Anfang dar. Die aktuelle Forschung wird in den nächsten Jahren eine erhebliche Verbreiterung des Anwendungsspektrums von Polymeren in der Medizin ermöglichen und wichtige Beiträge im Bereich der personalisierten Medizin, bei Implantaten und bei biomedizinischen Anwendungen leisten.

Die großen Herausforderungen für die Forschung bei medizinischen Anwendungen von Polymeren bestehen dabei sicherlich nach wie vor auf dem Gebiet der Verbesserung ihrer Biokompatibilität. Dies ist ein zentraler Aspekt für alle Werkstoffe, die in direkten Kontakt mit dem menschlichen Körper kommen, und dies gilt sowohl für Anwendungen von Polymeren in Implantaten (z. B. künstlichen Blutgefäßen, Herzklappen oder Gelenkprothesen) als auch für

direkte biomedizinische Anwendungen, wie zum Beispiel bei der kontrollierten Medikamentfreisetzung (controlled drug delivery systems). Bei solchen Anwendungen dürfen die Polymere keine schädigende Wirkung auf den Organismus besitzen. Sie dürfen weder toxisch noch mutagen sein oder langandauernde Entzündungen hervorrufen, sondern müssen vom Körper toleriert oder im günstigsten Fall wie körpereigenes Material akzeptiert werden. Sie dürfen nicht durch Biofilme auf den Oberflächen belegt werden (fouling), was insbesondere eine Herausforderung bei langer Einsatzdauer darstellt. Zudem wurde bislang die Langzeitstabilität der eingesetzten Materialien eher empirisch ermittelt und eine Vorhersage des Langzeitverhaltens der Biomaterialien ist nur in Ansätzen möglich.

In vielen Einsatzgebieten kann man sich vorstellen, dass Polymere nur eine unterstützende Funktion einnehmen und eine körpereigene Funktion so lange übernehmen, bis die Regeneration des Körpers soweit fortgeschritten ist, dass die Funktionen erneut vom wiederhergestellten körpereigenen Material übernommen werden können. Einfache Beispiele wären polymere Stützgewebe, Knochenschrauben und Nahtmaterialien. In solchen Fällen sollte das Polymermaterial nach Erfüllung seiner Aufgaben wieder komplett abgebaut werden und gewissermaßen spurlos verschwinden. In all solchen Ansätzen ist die Erforschung von geeigneten, biologisch abbaubaren Materialien von großer Bedeutung.

Ein weiteres, wichtiges aktuelles Forschungsgebiet beim Einsatz von Polymeren in medizinischen Anwendungen ist die Herstellung von integrierten Systemen. Dies betrifft zum einen bioanalytische Systeme, wie zum Beispiel Biochips oder kassettenbasierte Analysensysteme oder Lab-on-CD Devices, bei denen ein komplettes bioanalytisches Labor auf einer CD untergebracht ist. Zum anderen betrifft dies aber auch die Herstellung von implantierbaren Mikrosystemen wie zum Beispiel implantierbaren Insulinpumpen, Blutdruckmessgeräten oder Hirnelektroden. In solchen Systemen spielt die Vermeidung unspezifischer Adsorption eine wesentliche Rolle. In der Miniaturisierung von implantierbaren Sensoren oder Mikrogeräten sind große Zukunftsperspektiven für eine verbesserte, personalisierte Medizin gelegen. So könnten beispielsweise Risikopatienten mit implantierten miniaturisierten Messgeräten eine lückenlose Überwachung ihres Gesundheitszustands vornehmen und das Messgerät könnte in bestimmten krisenhaften Situationen, wie zum Beispiel bei einem starken Blutdruckabfall, automatisch über ein Handy Hilfe alarmieren. Solche Systeme können zwar aus mikrotechnologischer Sicht mehr oder weniger leicht hergestellt werden, die Biokompatibilität der eingesetzten Materialien stellt jedoch bislang ein so großes Problem dar, dass ein Routineeinsatz bislang nicht möglich ist.

### 4.5.3. Forschungsbedarf

- » Entwicklung von medizinisch genutzten Polymeren mit verbesserter Biokompatibilität
- » Untersuchung der molekularen und mesoskopischen Ursachen, auf denen Veränderungen in den Materialien während des Einsatzes im Organismus beruhen
- » Entwicklung von Materialien für die medizinische Technik mit herausragenden Eigenschaften auf Basis biologisch abbaubarer Stoffe und gleichzeitiger gezielter Kontrolle des Materialabbaus bzw. eventuell sogar durch einen äußeren Stimulus gezielt induzierter Materialabbau
- » Entwicklung geeigneter Beschichtungen für implantierte Mikrosysteme, beispielsweise durch entsprechend biologisch verträgliche Polymere





## 4.6. Materialien für die Informations- und Kommunikationstechnik (IKT)

### 4.6.1. Organische Transistoren

#### 4.6.1.1. Stand der Technik

Organische Feldeffekttransistoren (OFETs) werden schon seit etwa 25 Jahren untersucht. Mit ihren Vorteilen wie geringem Gewicht, geringen Platzanforderungen und einfacher Herstellung in Kombination mit hoher Flexibilität sind sie Schlüsselemente für zukünftige organische Elektronikanwendungen, z. B. auf Leiterplatten für Displays oder als Sensoren (z. B. „elektronische Nasen“). In tragbarer Elektronik, wie z. B. Radiofrequenz-Identifikationsschildern (RFID), werden bereits gedruckte OFETs eingesetzt.

Durch ihre kostengünstige Herstellung, z. B. durch Druckverfahren, sind sie Grundlage für „low-cost“-Elektronik in allen Anwendungsgebieten.

Transistoren sind Funktionsbausteine für fast alle elektronischen Schaltungen sowie essenzielle Elemente der Sensorik. Elektrische oder optische Signale können mit ihnen geschaltet (an/aus) oder moduliert (verstärkt/abgeschwächt) werden („Schalter“) oder verändern sich in Abhängigkeit von Umgebungseinflüssen (Sensorik). Bei Feldeffekttransistoren (FET) beispielsweise wird die Stärke des Stromes, der durch einen Halbleiter zwischen zwei Elektroden (Source und Drain) fließt, durch eine zusätzliche Spannung an einer dritten, räumlich und elektrisch vom Halbleiter isolierten (Gate-)Elektrode gesteuert. In OFETs ist mindestens der Halbleiter ein organisches Material.

#### 4.6.1.2. Technisch-wissenschaftliche Herausforderungen

Neben den möglichen kostengünstigen großtechnischen Ansätzen zur Herstellung sind Mehr-Kanal-Transistoren (CMOS-analoge Bauteile) der nächste logische Schritt, um die Wettbewerbsfähigkeit und Marktdurchdringung von OFETs zu steigern. Eine der großen Herausforderungen besteht im Erzielen möglichst hoher Ladungsträgerbeweglichkeiten im geöffneten Transistor („An“-Zustand) bei gleichzeitig fast verschwindender Leitfähigkeit im „Aus“-Zustand. Neue funktionale Moleküle werden hierzu ebenso entwickelt wie neue Verarbeitungsverfahren sowie Vor- und Nachbehandlungen der Bauteile. Hier wie auch bei allen anderen Bauteilen ist weiterhin die Verbesserung der Dauerhaftigkeit und Robustheit im Einsatz ein großes Forschungs- und Entwicklungsthema.

Die wichtigsten Parameter der OFETs werden durch Materialeigenschaften, den gesamten Verarbeitungsprozess und durch den physikalischen Aufbau des Devices bestimmt, wobei alle Einflussgrößen eng miteinander verknüpft sind und in Wechselwirkung stehen. Ein breites Parameterfeld ist daher zu optimieren, will man für einen bestimmten Einsatzzweck maßgeschneiderte Transistoreigenschaften realisieren. Um optimale Transistoreigenschaften und kleine Bauweisen zu erreichen, sollte beispielsweise der Abstand zwischen Source- und Drain-Elektrode minimal und die Mobilität der Ladungsträger im Halbleiter im An-Zustand maximal und im Aus-Zustand minimal sein (großes on/off-Verhältnis). Auf Forschungsebene konnten vor allem in den letzten 10 Jahren die Mobilitäten der Ladungsträger von organischen Materialien um mehrere Größenordnungen gesteigert werden. Somit erreichen OFETs bereits fast 10% der Mobilität anorganischer FETs.<sup>7</sup> Dennoch sind weitere Steigerungen insbesondere der Ladungsträger-Mobilitäten und der Beständigkeiten der daraus hergestellten Bauteile für einen breiten praktischen Einsatz dringend erforderlich und Gegenstand intensiver laufender Forschungsarbeiten. Seitens der ebenfalls oft auf Transistorbauweise fußenden Sensoren sind die Steigerung der Nachweis-Empfindlichkeit und der Selektivität Kernthemen.

#### 4.6.1.3. Relevanz

OFETs werden vermutlich in absehbarer Zeit noch nicht in der Lage sein, siliciumbasierte FETs in Anwendungen mit kleinen Chipgrößen, hohen Transistorzahlen auf kleinen Flächen oder mit Hochfrequenzbetrieb zu verdrängen, da die anorganischen FETs in diesen Anwendungen sehr ökonomisch sind und einen erheblichen Entwicklungsvorsprung haben.

Zeitnäher zielen OFETs daher auf andere Märkte ab: Schon heute ist ihre Performance ausreichend für den Einsatz in kleinen und mittelgroßen, flexiblen Displays und einfachen RFID-Bauteilen. Gerade diese sind ein Musterbeispiel für einen milliardenschweren Zukunftsmarkt. Bis 2021 wird z. B. der Markt für RFID im Bereich Tiere, Ernährung und Landwirtschaft (die beiden größten Anwendungsgebiete sind hier Herdenüberwachung/Tieridentifizierung und Verfolgbarkeit von Nahrung, Haltbarkeitsdatum, geschlossene Kühlketten) auf ca. 3 Milliarden Euro geschätzt.<sup>8</sup>

#### 4.6.1.4. Forschungsbedarf

Die Materialien, die als organische Funktionsmaterialien in OFETs einzusetzen sind, müssen hinsichtlich ihrer Ladungsträger-Beweglichkeit, on/off-Verhältnis, Verarbeitbarkeit (aus Lösung durch Drucken), Dauerhaftigkeit etc. noch erheblich verbessert werden. Während bei gedampften kleinen Molekülen schon sehr schöne Erfolge erzielt werden konnten, ist auf Seiten der aus Lösung zu verarbeitenden Systeme (Drucktinten, oft auf der Basis von Polymeren) noch massiv an der erreichbaren Performance zu arbeiten. Andererseits verspricht die Einfachheit und Flexibilität einer Prozessierung aus Lösung enorme Kosteneinsparungen und Verbilligung der Bauteile. Neben der Entwicklung immer besserer Halbleitermaterialien darf nicht vergessen werden, dass ebenso höchst effiziente Isolatoren (z. B. Gate-Dielektrikum) notwendig sind, der Erfolg also bei Verfügbarkeit beider Materialklassen erst wirklich durchschlagend wird. Parallel zur Materialentwicklung sind die Prozessierungsverfahren zu entwickeln, wie auch die Architektur der Bauteile selbst, die sich nicht notwendigerweise sklavisch an den Vorgaben orientieren muss, die von der anorganischen Seite vorgegeben und etabliert sind. Daneben muss ein noch viel grundlegendes Verständnis der relevanten, im Bauteil ablaufenden Prozesse entwickelt werden, um deutlich rationaler als heute die weiteren Verbesserungen vorantreiben zu können (Wissensbasierte Material- und Prozessentwicklung).

## 4.6.2. Organische Speicher

### 4.6.2.1. Stand der Technik

Die Forschung an Phänomenen wie das Schalten elektrischer Widerstände von Polymeren in AN- und AUS-Zustände, die für eine gewisse Zeit bestehen bleiben, begann bereits um 1970. Bereits früh wurde der Vorteil einfacher

<sup>7</sup> Klauk H., Chem Soc. Rev. 39, 2643 (2010)

<sup>8</sup> IDTechEx, \$4.09 Billion Market for RFID for Animals and Food in 2021, 15.11.2011

organischer Speicherbauteile erkannt. Gedruckte Speicher können vielfältig eingesetzt werden und finden bereits heute Anwendung in tragbarer Elektronik und RFID-Systemen. Karten mit wiederbeschreibbaren Speichern, die mit Handheld-Konsolen ausgelesen werden können, werden bereits seit 2009 zunächst zu Werbezwecken und heute vor allem für Spielanwendungen produziert.

Speicher besitzen mindestens zwei Zustände, AN und AUS, welche für eine gewisse Zeit „gehalten“ werden müssen und je nach Bauteilart auch löschtbar und wiederbeschreibbar sind. Programmiert wird meist durch ein externes elektrisches Feld, das in Bezug auf eine physikalische Größe (z. B. Stromfluss) verschiedene Zustände hervorrufen kann. In organischen Speichern kann dies z. B. erreicht werden, indem ein ferromagnetisches Polymer als aktive Komponente eingesetzt wird. Hierbei können die Dipolmomente von Polymersegmenten durch das externe Feld ausgerichtet werden und so den Stromfluss unterstützen bzw. hindern.

#### 4.6.2.2. **Technisch-wissenschaftliche Herausforderung**

Die Forschung an solchen ferroelektrischen organischen Speichern wurde in den letzten fünf Jahren stark vorange-  
trieben. Von den verschiedenen Bauteilkonfigurationen hat es die der ferroelektrischen Kondensatoren bereits nahe an die Kommerzialisierung im Bereich der „low-end“-Datenspeicherung gebracht. Die größte Herausforderung ist es derzeit, wesentlich andere Konfigurationen darzustellen, die z.T. wesentlich bessere Leistungen bezüglich Auslese-, Schreib- und Laufzeit aufweisen.<sup>9</sup>

#### 4.6.2.3. **Relevanz**

In kleinen und tragbaren Anwendungen werden gedruckte Speicher bereits eingesetzt. Dies gilt vor allem für Produkte aus dem Spielzeug- oder ID-Markt. In Zukunft wird aber vor allem auch auf die Märkte der Fälschungssicherheitsprodukte oder intelligenten Verpackung, Logistik und Sensorik gezielt. Alleine der Markt für gedruckte bzw. potentiell druckbare Sensorik beträgt aktuell fast 100 Millionen Euro.<sup>10</sup>

#### 4.6.2.4. **Forschungsbedarf**

- » Bauteile mit *multi-level* Speicherung, um den Anforderungen nach höheren Speicherdichten gerecht zu werden
- » Große Speicherdichten durch Speicherung mehrerer Bits auf einem Bauteil (Organische Speicher könnten so der Kommerzialisierung in weiteren Märkten näher gebracht werden)
- » Optimierung der Materialien in Bezug auf on/off-Verhältnis, Gleichrichtungseigenschaft und Stabilität (Lebensdauer der on/off-Zustände und Zyklrierbarkeit)

### 4.6.3. **Organische Leuchtdioden**

#### 4.6.3.1. **Stand der Technik**

Eine OLED (Organic Light Emitting Diode) ist ein Licht emittierendes Bauteil, das in seinen optisch und elektronisch aktiven Komponenten teilweise (oder im Idealfall ganz) auf organischen Verbindungen basiert. OLEDs sind seit Mitte der 1980er Jahre bekannt. Sie sind hauchdünn und überzeugen durch brillante Farben und – zumindest theoretisch – minimalen Energieverbrauch. All dies macht sie zu idealen Komponenten für moderne Displays. Im Kleinen findet diese Innovation bereits statt: 30% aller MP3-Player sowie einige Handymodelle und Digitalkameras sind bereits heute mit OLED-Displays ausgestattet. Allerdings muss noch sehr viel Forschungs- und Entwicklungsarbeit investiert werden, bevor OLEDs alle ihre erwarteten Stärken ausspielen und eine deutlich breitere Markteinführung erfahren werden. Insbesondere die Effizienz und die Dauerhaftigkeit sind zentrale Themen.

<sup>9</sup> Naber R.C. D. et al., Adv. Mater. 22, 933 (2010)

<sup>10</sup> Organic and Printed Electronics, 4<sup>th</sup> Edition, 2011, OE-A Organic Electronics Association, VDMA, Frankfurt

Über Anwendungen in flachen Displays hinaus eignen sich OLEDs für den Einsatz in großflächigen und energiesparenden Leuchtquellen. Durch z. B. das Stapeln verschiedener Leuchtschichten in einer OLED lässt sich prinzipiell jede beliebige Farbe sowie weißes Licht einstellen.

OLEDs kann man im Wesentlichen in zwei Klassen differenzieren: Solche, deren aktive (leuchtende) Schicht aus kleinen Molekülen („small molecules“) aufgebaut ist (SMOLEDs) und solche, die Polymere enthalten (PLEDs). Die Herstellung von SMOLEDs erfordert heute meist spezialisierte Vakuumfertigungstechnologien, bei denen die funktionalen Moleküle über die Gasphase abgeschieden werden. Dies ermöglicht hohe Reinheiten der aktiven Schichten, was sich vor allem hinsichtlich Effizienz und Lebensdauer positiv auswirkt, allerdings auch den Produktionsprozess teurer und unflexibler macht als andere einfachere Verarbeitungstechniken, insbesondere denen aus Lösung. In der Regel sind die SMOLEDs nicht flexibel. Der Herstellprozess von PLEDs kann hingegen aufgrund der Nichtverdampfbarkeit polymerer Verbindungen und ihrer exzellenten Filmbildungseigenschaften aus Lösung oder Dispersion erfolgen. Ohne teure Vakuumtechniken können die halbleitenden und lichtemittierenden Materialien direkt auf das u.U. flexible Substrat appliziert werden, im einfachsten Fall mittels Drucktechniken unter Verwendung von z. B. kommerziell erhältlichen Inkjet-Druckern. PLEDs haben somit das Potential, auf flexiblen Substraten kostengünstig produziert zu werden. Dies eröffnet interessante Beleuchtungs- und Design-Möglichkeiten.

#### 4.6.3.2. Technisch-wissenschaftliche Herausforderungen

Bei der PLED-Herstellung ist die deutlich geringere Reinheit dieser Materialien im Bauteil äußerst problematisch. Über das Polymer selbst wie auch über das zu verwendende Lösungsmittel werden häufig kritische Verunreinigungen eingeschleppt, die nachträglich nicht wieder zu entfernen sind und die die Dauerhaftigkeit und Effizienz der Bauteile u.U. massiv beeinträchtigen. Durch den Lösungsprozess ist auch der zusätzliche Reinigungsschritt, der bei den kleinen Molekülen bei der Verarbeitung aus der Gasphase möglich ist, nicht durchführbar. Hier besteht somit noch erhebliches Potential für weitere Verbesserungen.



Generell ist es wichtig, OLED-Technologien für Displays oder Beleuchtungen zu unterscheiden, weil sich Herstellung, Anwendung und Kosten für beide Anwendungen erheblich unterscheiden. OLEDs sind eine relativ neue Technologie, die hinsichtlich vieler Aspekte noch im Entstehen ist. Daher sind auch noch viele bedeutende Herausforderungen zu lösen, um ihren zukünftigen Erfolg zu gewährleisten.

Einige der aktuellen Schwierigkeiten und Beschränkungen der OLED-Beleuchtung sind hier gelistet:

- » Niedrige Geräteeffizienz (im Vergleich zu traditionellen und LED-Lampen)
- » Probleme mit der Einheitlichkeit der lichtemittierenden Schichten über große Flächen
- » Probleme bei der gleichmäßigen Aufrechterhaltung hoher elektrischer Ströme über große Flächen
- » Schlechte operative Lebensdauern für verschiedene Emittermaterialien
- » Schlechte Lebensdauern gelagerter Bauteile als auch von Bauteilen im Langfristbetrieb
- » Komplexität des Entwurfs von Bauteilen aufgrund der begrenzten Auswahl von Materialien für Elektroden
- » Low-cost Fertigungstechnik(en) für große OLED Geräte noch nicht etabliert
- » Abbau der Devices bei UV-Bestrahlung
- » Nutzbarmachung der elektronisch viel wahrscheinlicheren Triplet-Anregungszustände für die Lichterzeugung anstatt strahlungsloser Desaktivierung unter nur Wärmeerzeugung im Bauteil

#### 4.6.3.3. Relevanz

Auf die Allgemeinbeleuchtung entfällt ein erheblicher Anteil des weltweiten Energieverbrauchs von über 2600 TWh, was etwa 19 % der Stromproduktion entspricht. Umgerechnet trägt dieser Energieverbrauch mit 1900 Millionen Tonnen Kohlendioxid pro Jahr zur Emissionen dieses klimarelevanten Gases bei. Es wird geschätzt, dass eine Energieeinsparung von 40% mit energieeffizienter Beleuchtung (hauptsächlich OLED, LED) anstelle der Verwendung aktueller Beleuchtungstechnologien erreicht werden kann. Dies würde zu einer Einsparung von über 640 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr führen.

Es wird geschätzt, dass der Umsatz der Lichtindustrie in Europa auf über 3 Milliarden Euro bis 2019 steigt und die Anzahl der Beschäftigten um mehr als 115.000 Mitarbeiter im gleichen Zeitraum zunimmt. Dieses Wachstum wird voraussichtlich aufgrund der neuen OLED-Technologien, vor allem aber bei der Gestaltung, Herstellung und Vertrieb von Leuchten auf der Basis von OLEDs entstehen. Bis zum Jahr 2015 sollen die weltweiten Umsätze der OLED-Beleuchtungsindustrie gar auf rund 6 Milliarden US-Dollar steigen.<sup>11</sup> Wachstumsfördernd werden sich dabei das Verbot konventioneller Glühlampen in Europa und den USA sowie die zunehmende Kritik an Energiesparlampen auswirken.

Die Umsetzung der Aktiv-Matrix-Technologie bei OLEDs bewirkte ein deutliches Wachstum am weltweiten Markt für gedruckte bzw. potentiell druckbare OLED-Displays, der aktuell auf 1,6 Milliarden Euro geschätzt wird. Bis 2021 wird ein weiteres Wachstum auf über 13 Milliarden Euro erwartet.<sup>12</sup>

Für eine erfolgreiche Produktentwicklung von OLED-Beleuchtungen als auch OLED-Displays ist dabei die gesamte Wertschöpfungskette „Vom Material zum Produkt“, also von der Materialentwicklung über die Anlagentechnik, Deviceherstellung bis zur Produktintegration und Anwendungsentwicklung mit einem hohen Bedarf an iterativem Vorgehen erforderlich, wobei auch die fertigungs- und prozesstechnischen Entwicklungen von Bedeutung sind.

<sup>11</sup> OLED Lighting: An Eight-Year Market Forecast (2010), Nanomarkets

<sup>12</sup> IDTechEx (2011)

#### 4.6.3.4. Forschungsbedarf

Eine Reihe von Forschungs- und Entwicklungsthemen müssen für die Fortentwicklung der OLEDs adressiert werden, darunter fallen Gebiete wie: Materialien, Geräte, Systeme, Standardisierung und Herstellung. Diese Aktivitäten werden detailliert in den Technologie-Roadmaps verschiedener Interessensvereinigungen und Plattformen veröffentlicht.<sup>13</sup>

Es gibt drei wichtigste Faktoren für OLED-Beleuchtung, die die Entwicklung derzeit vorantreiben:

- » Erhöhung der OLED Performance
  - Steigerung von Power und Effizienz (20 – 40 lm/W in 2010)
  - Verbesserung der Licht Extraktion und „Coupling“ (1000 – 3000 Cd/m<sup>2</sup> in 2010)
- » Steigerung der OLED Lebensdauer
  - Verbesserung der Zuverlässigkeit (5 000 – 20 000 Stunden bei 1000 Cd/m<sup>2</sup> im Jahr 2010)
  - Verbesserung der Verkapselung
- » Preisreduktion (aktuell noch über € 1 500 pro m<sup>2</sup> im Jahr 2010)

In Deutschland sind daher erhebliche Anstrengungen erforderlich, um in gezielt ausgewählten Bereichen nicht nur eine wissenschaftliche Führungsposition einzunehmen, sondern die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auch so weit zu treiben, dass eine Umsetzung in marktfähige Produkte durch die Industrie erfolgen kann. Diese Anstrengungen sollten sich insbesondere auf die folgenden Themen konzentrieren:

- » Neue Materialien, wie hocheffiziente Emmitter (vor allem tiefes Blau), neue Ladungstransport- und Injektionsmaterialien werden für hohe Lichtausbeuten benötigt, wobei die Materialien besonders geeignet bzw. optimiert sein müssen für die Verarbeitung bei hohen Geschwindigkeiten (Druckverfahren) oder für Gasphasenabscheidung (temperaturstabiler) bei hohen Temperaturen
- » Verkürzte die Durchlaufzeiten während der Herstellung der Devices mittels neuer Materialien und Formulierungen
- » Materialien mit höheren elektrischen Leitfähigkeiten, zur Herstellung dickerer Schichten (robustere Devices)
- » Entwicklung großflächiger Beschichtungsverfahren und Anwendung von R2R (roll-to-roll)-Verfahren zur deutlichen Reduktion der Investitionen und Arbeitskosten und Erhöhung der Prozesssicherheit der OLED Produktion, um z.B. den Faktor 60 zwischen 2011 und 2015
- » Entwicklung neuer Materialien, die stabiler gegenüber der Degradation durch Wasser, Sauerstoff und UV-Strahlung sind und neuer Materialien für die Verkapselung der OLEDs.
- » Kostenwirksame Alternativen zu Indium Zinn Oxid (ITO), transparente Elektrodenmaterialien und Low-Cost Substrate für OLED-Beleuchtung. Bspw. durch (a) transparent, leitfähige Oxide (TCOs), (b) Leitfähige Polymere, (c) Nanomaterialien auf der Basis von leitfähigen Nanodrähten (metallische Nanowires und CNT) oder Graphen.

Zur Stärkung der Forschung, Entwicklung und Umsetzung im Bereich der OLED ist die enge Zusammenarbeit der Wissensträger von der Grundlagenforschung über die angewandte Forschung, die Material- und Geräteentwicklung bis zur Produktentwicklung unter Berücksichtigung der fertigungs- und prozesstechnischen Entwicklung und unter Einbeziehung der Qualitätssicherung und der Entwicklung von Standards entscheidend. Jede Lücke in der Know-How- und Wertschöpfungskette verzögert den Transferprozess.

<sup>13</sup> [A] Organic and Printed Electronics, 4<sup>th</sup> Edition, 2011, OE-A Organic Electronics Association, VDMA, Frankfurt

[B] Strategische Forschungsagenda für Organische und großflächige Elektronik, Für grüne Elektronik aus Deutschland, 2009, VDI-Technologiezentrum GmbH, Düsseldorf

Forschungsagenda OLED-Beleuchtung, Seite 19

Forschungsagenda OLED-Displays, Seite 33-34

[C] Towards Green Electronics in Europe, Strategic Research Agenda – Organic & Large Area Electronics, 2009

[D] Photonics Technologies and Markets for a Low Carbon Economy – Energy Efficient Lighting and Displays Technologies and Applications, 2011, European Commission



Der Schutz kritischer Infrastrukturen ist wichtig für die öffentliche Sicherheit. Fortschritte in der Materialforschung und der Analytik sorgen dabei für eine effizientere Durchführung.

## 4.7. Materialien für die Sicherheitstechnik

### 4.7.1. Detektionssysteme

#### 4.7.1.1. Stand der Technik

Die Analytik spielt in der Sicherheitstechnik eine nicht zu unterschätzende Rolle. In Detektionssystemen dient Sie beispielsweise dazu, Gefahrstoffe an versteckten Orten aufzufinden, möglichst bevor sie Unheil anrichten können. So spielt die Analytik zur Gefahrenerkennung eine tragende Rolle, sowohl präventiv als auch zur Vorbereitung weiterer Maßnahmen im Ernstfall. Bereizuhaltende Schutzmaßnahmen können daher nicht nur selektiv auf bestimmte Stoffe abgestimmt sein, sondern müssen eine breite Palette von Möglichkeiten abdecken.

In der Annahme, dass der Bau und die Verbringung einer USBV (unkonventionelle Spreng- und Brandvorrichtung, bspw. Molotov-Cocktails) äußerlich Spuren hinterlassen, können diese mit hochempfindlichen analytischen Methoden nachgewiesen werden, vorausgesetzt, dass nicht extrem sauber gearbeitet und anschließend auf das Gründlichste gereinigt wurde. Aufgrund ihrer hohen Empfindlichkeit ist wohl die Ionenmobilitätsspektrometrie (IMS) das weitverbreitetste Verfahren, das sich in der Stoffgruppendetektion in der Praxis bewährt.<sup>14</sup> Ohne Probenahme arbeiten laserbasierte spektroskopische Verfahren, die berührungslos Spuren auf Oberflächen nachweisen, die Laser-induzierte Breakdown-Spektroskopie (LIBS), die Raman-Spektroskopie<sup>15</sup> und die IR Laser-Rückstreuung.

Einige analytische Verfahren beruhen darauf, dass, allgemein ausgedrückt, in einem Messgerät durch Bindung von Substanzmolekülen auf einer Oberfläche physikalische Änderungen hervorgerufen werden, die dann gemessen werden können. Diese Verfahren können sehr sensitiv und hoch spezifisch sein, wenn nur wenige Moleküle nach dem Schlüssel-Schloss-Prinzip an oberflächliche Rezeptoren gebunden werden. Der Beitrag der Chemie besteht in der Schaffung solcher Beschichtungen. Zu diesem Zweck werden auch natürliche Antikörper verwendet. Der Nachteil besteht aber darin, dass es sich hierbei um Proteine handelt, die nur begrenzt haltbar sind. Dieser Nachteil scheint bei den „molecular imprinted polymers“ (MIPs) überwunden zu sein, deren Entwicklung sicherlich noch nicht abgeschlossen ist.<sup>16</sup> Sie können einerseits als Rezeptoren auf physikalischen Sensoren dienen, andererseits

14 G.A. Eiceman, J.A. Stone, *Analyt. Chem.* 2004, 391 A – 397 A, kommerziell angeboten u.a. von Bruker oder Smiths Detection

15 J. L. Gottfried et al., *Anal Bioanal Chem* (2009) 395:283-300

16 G. Bunte et al., *Propellants Explos. Pyrotech.* 2009, 34, 245-251 und J. Saloni et al., *Polymer* 52, 2011, 1206-1216

zur Anreicherung in einem Luftstrom. Dort kann die angereicherte Substanz durch Erwärmung wieder desorbiert und einem unspezifischen Sensor zugeleitet werden. Als weitere spezifische Adsorbentmaterialien bieten sich Zeolithe und MOFs (Metalorganic Frameworks) für diesen Anwendungsbereich an.

Ist erst einmal eine Spur nachgewiesen, bedeutet dies noch lange nicht die Anwesenheit einer größeren Menge des gefundenen Stoffes. Bei Sprengstoffen beispielsweise geht von einer Spur keine Gefahr aus, sondern erst von einer größeren Menge, die aber in solchen Fällen in der Regel versteckt ist. Da beim Öffnen von Verstecken damit gerechnet werden muss, dass dadurch eine Explosion ausgelöst wird, sind radiologische Methoden die Mittel der Wahl, um die eigentliche Gefahrenquelle aufzufinden und anschließend zu neutralisieren. Ein gängiges Verfahren in solchen Situationen ist die Durchstrahlung vor Ort mit mobilen Röntgeneratoren und Bilddetektoren, wobei zunehmend digitale Techniken eingesetzt werden. Ein einfaches Röntgenbild sagt aber noch nicht viel über die chemische Zusammensetzung der durchstrahlten Objekte aus.

### 4.7.1.2. Technisch-wissenschaftliche Herausforderungen

Grundsätzlich zu unterscheiden ist die Detektion von Spuren, die einen Hinweis auf die Anwesenheit einer größeren Menge geben kann, und der Nachweis einer vorhandenen größeren Menge selbst, von der die eigentliche Gefahr ausgeht. Die Spurenanalytik gibt einen Hinweis auf die Präsenz eines bestimmten Sprengstoffs, d.h. zeigt eine mögliche Gefahr an, vergleichbar Sprengstoffspürhunden. Aufgrund einer leistungsfähigen Spurenanalytik kann z. B. ein Gepäckstück oder ein Container mit Sprengstoffspuren einer genaueren Inspektion unterzogen werden.

So wichtig der Schutz kritischer Infrastrukturen wie z. B. im Flugverkehr für die öffentliche Sicherheit ist, so wesentlich ist andererseits deren Funktionstüchtigkeit. Besonders hervorzuheben ist in diesem Zusammenhang eine niedrige Fehlalarmquote der Detektionseinrichtungen. Der Flugverkehr selbst z. B. soll weitestgehend reibungslos ablaufen, d.h. auch ungehindert von aufwendigen Kontrollen. Daraus ergibt sich eine der großen analytischen Herausforderungen unserer Tage, die Identifizierung eines Stoffes aus der Ferne („remote detection technologies“), wobei spektroskopische Techniken wie die Laser-induzierte Breakdownspektroskopie (LIBS) oder die Raman-Spektrometrie ins Blickfeld rücken.

Bei der Spurenanalytik in der Gasphase kann sowohl die Sensitivität als auch die Spezifität bereits bei der Probenahme verbessert werden. Die Sensitivität kann durch einen Anreicherungsschritt erfolgen, bei dem die zu bestimmende Substanz im Gasstrom über eine adsorbierende Oberfläche geleitet wird. Gleichzeitig kann die Spezifität dadurch erhöht werden, dass die Oberfläche selektiv nur bestimmte Moleküle bindet. Nach dieser Anreicherung kann durch einen Desorptionsschritt das angereicherte Substrat dem eigentlichen analytischen Schritt zugeführt werden. Im einfachsten Fall erfolgt dies durch eine Erwärmung erfolgen. Profitieren kann von einem solchen vorgeschalteten Schritt die bereits oben erwähnte Ionenmobilitätsspektrometrie (IMS). Die technisch-wissenschaftliche Herausforderung besteht aus chemischer Sicht in der Gestaltung geeigneter adsorbierender Schichten für eine solche spezifische Anreicherung, die auch den erforderlichen Desorptionsschritt aushält. Für eine solche spezifisch adsorbierende Beschichtungen ungeeignet sind empfindliche Moleküle wie z. B. Antikörper, besser sind spezifisch bindende Polymere (z. B. MIPs, „molecular imprinted polymers“), die ausreichend robust z. B. für die Erwärmung zur Desorption sind. Dieses Prinzip der spezifischen Anreicherung könnte auch auf Textilien übertragen werden, mit denen Wischproben eingesammelt werden. Durch Erwärmung dieser Probenträger könnte das zu analysierende Material in ein Spektrometer überführt werden. Die Entwicklung der Adsorptionsschichten oder von Wischaufnehmern wird nicht nur von den zu analysierenden Substanzen abhängen, sondern auch von der Einsatzumgebung mit allen dort sonst noch anzutreffenden Materialien.

Bei der Einrichtung analytischer Routineverfahren oder der Einführung neuer Methoden wird nach der Effizienz, irgendwann auch nach der Wirtschaftlichkeit gefragt. Es wird erwartet, dass einerseits nichts übersehen wird, andererseits keine Falschalarme entstehen, die mit steigender Empfindlichkeit von Detektionsmethoden immer

wahrscheinlicher werden. Vor allem bei Routinekontrollen wie in den Flughäfen sind Falschanzeigen höchst unerwünscht, da sie den Betrieb aufhalten, zusätzliche Maßnahmen erfordern und damit Kosten verursachen. Dieses Thema wird auch noch dadurch erweitert, dass die zu analysierenden Substanzen kaum in Reinform vorliegen. Sie können mit anderen Stoffen zusammen vorkommen, deren analytisches Signal das vom gesuchten überlagert, d.h., maskiert wird. Darüber hinaus reicht die Spezifität einiger Analysemethoden nicht aus, die gesuchten Materialien von anderen, ähnlichen oder verwandten zu unterscheiden. Ist eine Verwechslung zwischen einem Gefahrstoff und einer harmlosen Substanz möglich, ist damit zu rechnen, dass der harmlose Stoff zur Maskierung missbraucht werden kann.

#### **4.7.1.3. Forschungsbedarf**

Für die Analytik selbst wird es erforderlich sein, geeignete Standards und Kalibrierproben bereitzustellen. Da es sich um Gefahrstoffe handelt, kann es sich dabei für den praktischen Gebrauch nur um Kleinstmengen handeln, soweit es keine toxischen Stoffe sind, oder um Surrogate, um einen sicheren Umgang mit den Proben zu gewährleisten. Diese müssen sich gegenüber der angewandten Methode so verhalten wie der reale Gefahrstoff. Da die unterschiedlichen Methoden auf recht verschiedene Stoffeigenschaften ansprechen, ist abzusehen, dass für ein und dieselbe Originalsubstanz je nach Nachweismethode verschiedene Surrogate angeboten werden müssen. Wenn nur die Elementarzusammensetzung eine Rolle spielt, wie in der Mehrfachenergiedurchstrahlung, lässt sich eine Modellsubstanz relativ unkompliziert darstellen. Dies ist aber nur für relativ unspezifische analytische Verfahren zu erwarten. Anders wird es bei den hochspezifischen Trennverfahren oder Adsorptionsmethoden sein, worin mit Sicherheit ein großer Forschungsbedarf zu sehen ist. Bei der Spurenanalytik ergibt sich ein Problem in der Quantifizierung, die bei der Einstellung von Geräten Bedeutung erlangen kann, besonders in der Langzeitstabilität flüchtiger Substanzen. Dies beinhaltet auch die Wahl eines geeigneten Trägermaterials für die Bestimmung in der Gasphase. Technisch ist man bestrebt, für die atmosphärische Analytik die Hundenase nachzubilden. Die Chemie ist dabei gefordert geeignete Adsorptionschichten auf den Sensoroberflächen zu entwickeln, mit der die Spezifität festgelegt wird, ähnlich wie bei Antikörpern in der Physiologie. Soweit eine Probenaufbereitung benötigt wird, ist man bestrebt, diese soweit zu miniaturisieren, dass sie in Apparaturen von Chipgröße durchgeführt werden können („lab on the chip“). Dazu müssen die Verläufe auf der „nassen“ Seite von der Chemie vorgegeben werden.

Im Falle der Ionenmobilitätsspektrometrie (IMS) gilt es zukünftig, die Spezifität v.a. in Kombination mit anderen Prinzipien noch zu erhöhen. Nur so kann die unübertroffene Empfindlichkeit der Methode optimal genutzt werden. Der Weg dorthin wurde bereits mit der oben beschriebenen spezifischen Anreicherung in der Gasphase beschrieben, ist aber mit Sicherheit auf eine Palette weiterer Stoffe auszuweiten, die neu zu analysieren sind oder in unterschiedlichen Zusammenhängen mit verschiedenen Begleitstoffen auftreten können.

Zum Zweck der besseren Materialerkennung in Hochenergiedurchstrahlungseinrichtungen zum Durchscannen von Gepäckstücken, beispielsweise am Flughafen, sollte zukünftig an weiteren Strahlungsarten, wie bspw. der Neutronenstrahlung, geforscht werden.

Der Forschungsbedarf geht somit insgesamt über die Verbesserung und Verfeinerung der technischen Methoden, selbst über die Einführung neuer Techniken hinaus. Es gilt vor allem die Zuverlässigkeit in der praktischen Anwendung zu erfassen, womit auch Themen wie Messunsicherheit berührt werden.

## **4.7.2. Persönliche Schutzausrüstung**

### **4.7.2.1. Stand der Technik**

Textilbasierter Ballistikschutz unterscheidet Stichschutz, Projektilschutz oder Splitterschutz. Je nach Anforderung können hartballistische Faserverbundwerkstoffe mit einer polymeren oder keramischen Matrix und Hochleistungs-

fasermaterialien, softballistische Systeme mit gezielter Anordnung von mehreren Faserlagen (z. B. Aramide) oder spezifische Konstruktion von Bekleidung eingesetzt werden. Besondere Herausforderungen sind hierbei bekleidungsphysiologische Aspekte (Wärme- und Feuchtigkeitstransport bzw. -speicherung oder UV-Schutz) und Pflegebeständigkeit. Hier können hochverstreckte Membransysteme, Block-Copolymer-Membranen oder elektrogesponnene Hybridsysteme zum Einsatz kommen.

### 4.7.2.2. Technisch-wissenschaftliche Herausforderungen

Bei den Materialien, die für den Schutz von Personen in unterschiedlichen Gefahrenbereichen verwendet werden, gilt es zu unterscheiden, wofür sie im Einzelnen dienen sollen: Sie müssen u.a. in der Lage sein, Druckwellen abzuhalten, Stöße aushalten, Projektilen und Stichwaffen abhalten können, reißfest und hitzeabweisend sein, und beim Personenschutz trotzdem leicht sein, die Körperwärme nicht stauen lassen und die Bewegungsfreiheit möglichst wenig einschränken, also widersprüchlichen Anforderungen entsprechen. Sowie eine Bedrohung durch chemische, biologische, nukleare oder radioaktive Materialien hinzutritt, ist auch hiergegen ein geeigneter Schutz vorzusehen. In diesen Fällen ist ein Ganzkörperschutz zu gewährleisten, der nicht einmal einen Austausch mit der Außenatmosphäre zulässt, im Gegensatz zu einem Splitterschutz oder einer Schutzweste.

Eine der größten Herausforderungen ist es, mit einfachen und automatisierten Herstellverfahren preiswerte Schutzsysteme zu entwickeln, die höchstmöglichen Schutz bieten.

### 4.7.2.3. Forschungsbedarf

- » Der Zusammenhang zwischen ballistischer Schutzwirkung und Struktur des Schutzmaterials (Mikrostruktur, Aufbau eines Verbundsystems, Hartschichten, Backing) muss besser erforscht werden.
- » Die Multihitfähigkeit keramischer Schutzsysteme ist zu verbessern.
- » Die Herstellverfahren für CMC-Materialien (Ceramic Matrix Composites, Verbundwerkstoffe mit keramischer Matrix) müssen deutlich preiswerter werden, damit diese eine Massenanwendung im Bereich von Schutzausrüstungen erlauben.



Neue Detektionssysteme helfen dabei, Sicherheitskontrollen schneller und effizienter durchzuführen.



Moderne Kunststoffverpackungen halten Nahrungsmittel länger frisch. Durch den Verkauf von Weintrauben in Schalen oder Tüten wurde der Anteil verdorbener Trauben in den Märkten um 20 Prozent reduziert.

## 4.8. Materialien für Bedarfsgegenstände

Bedarfsgegenstände sind Materialien und Gegenstände, die dazu bestimmt sind, mit Lebensmitteln in Berührung zu kommen. Der Verbraucherschutz fordert, dass von solchen Materialien keine gesundheitlichen Risiken für den Verbraucher ausgehen und keine Stoffe in die Lebensmittel übergehen, die deren Qualität mindern.

Weiter zu den Bedarfsgegenständen zählen Produkte, die intensiv mit dem menschlichen Körper in Kontakt kommen wie Spielwaren, Textilien, Schmuck oder Perücken, sowie Reinigungs- und Pflegemittel, Imprägnier- und Ausrüstungsmittel und Mittel zur Geruchsverbesserung.

Materialien, die zur Herstellung von Bedarfsgegenständen geeignet sind, müssen sowohl gesundheitliche als auch aus technischer Sicht anspruchsvolle Kriterien erfüllen.

Die technische Eignung der Materialien umfasst die mechanische und thermische Stabilität des Werkstoffes. Hierzu zählt auch die chemische und hygienische Inertheit des Materials.

Beide Kriterien, die gesundheitliche und technische Eignung, sind eng miteinander verknüpft.<sup>17</sup>

Folgende vier Werkstoffklassen werden zur Herstellung von Bedarfsgegenständen eingesetzt:

<b>Silikatische Werkstoffe:</b>	Gläser, Keramik (Steingut, Porzellan)
<b>Metallische Werkstoffe:</b>	Aluminium, Stahl, Kupfer
<b>Papier, Karton und Pappe:</b>	entwässerte Fasergemische, meist natürlichen Ursprungs mit vielseitigen Zuschlagsstoffen
<b>Makromolekulare Werkstoffe:</b>	Thermoplaste (teilkristalline und amorphe) Duroplaste Elastomere und Kautschuke Beschichtungen (Folien-)Verbund-Werkstoffe

Alle diese Werkstoffe werden auch in Faserform zu textilen Halbzeugen verarbeitet.

<sup>17</sup> Frede, W. (Hrsg.): Handbuch für Lebensmittelchemiker, Kap. 38, 3. Auflage, Springer-Verlag Berlin Heidelberg: 2010

Insbesondere bei den makromolekularen Werkstoffen steht eine große Zahl von Stoffen zur Verfügung, die sich zur Herstellung von Bedarfsgegenständen anbieten. Keine andere Werkstoffklasse hat in den letzten Jahren eine derartige Entwicklung erlebt. Dies war vor allem durch die enormen Fortschritte der chemischen Forschung möglich, sowohl bei der Synthese von Ausgangsprodukten als auch bei der Herstellung der Materialien und Werkstoffe.

### 4.8.1. Materialien und Gegenstände mit Lebensmittelkontakt

#### 4.8.1.1. Stand der Technik

Keramische und metallische Werkstoffe sind auch heute im Bereich des wiederverwendbaren Trink- und Essgeschirrs im breiten Einsatz. Zusätzlich sind die Kunststoffe, also die makromolekularen Werkstoffe nicht mehr weg zu denken. Gerade diese Werkstoffe bieten eine Fülle von Eigenschaften, die sie für den Einsatz in Bedarfsartikeln als ideale Werkstoffe empfehlen:

- » geringe Dichte und Wärmeleitfähigkeit
- » hohe mechanische Stabilität
- » gute elektrische Isolationseigenschaften
- » gute Diffusionsdichtigkeit
- » breite Temperaturstabilität
- » exzellente Verarbeitbarkeit
- » breite Kombinationsmöglichkeiten mit anderen Werkstoffen

Kunststoffverpackungen sind wahre Hightech-Produkte. Trotz immer weniger Materialeinsatz verbessern sie die Verpackungsleistung. Ob Folie, Joghurtbecher, Farbeimer, Getränkeflasche oder Verpackung für Wasch- und Reinigungsmittel – Kunststoffverpackungen werden immer leichter, u. a. durch Reduzierung der Wanddicke.

Bei den eingesetzten Materialien ist je nach Verpackungsart das gesamte Spektrum der polymeren Werkstoffe anzutreffen. Von modernen Polyolefinen für Folien und sonstige Verpackungen über Kaschierfolien aus PVC für Kartonagen bis hin zu Polyvinylidenchlorid in Verbundfolien und Polyethylenterephthalat für Getränkeflaschen.

Aktive Verpackungen sorgen schon heute dafür, dass die Ware bis zum Verzehr frisch bleibt. Sogenannte Absorber können zum Beispiel Sauerstoff aus der Verpackung aufnehmen und damit die Haltbarkeit eines Lebensmittels verlängern. Intelligente Verpackungen können den Verbraucher über die Haltbarkeit oder Frische eines Produkts informieren. Dabei zeigen Freshness-Indikatoren an, ob die Ware noch frisch ist oder beispielsweise die Kühlkette unterbrochen wurde.

Im Bereich der kohlenensäurehaltigen Softdrinks haben PET-Flaschen in Deutschland während der letzten Jahre die Glasflasche weitestgehend verdrängt. Inzwischen sind auch andere Getränke vermehrt in PET-Flaschen erhältlich. Für den Verbraucher sind PET-Flaschen komfortabel in der Handhabung, da sie ein geringes Gewicht besitzen und nicht bruchanfällig sind. Aus dem geringen Gewicht resultiert außerdem ein niedriger Transportenergieverbrauch. Des Weiteren können PET-Flaschen recyclet werden, bspw. zur Herstellung von Textilien auf Basis von Polyesterfasern (sog. Up-cycling).

#### 4.8.1.2. Technisch-wissenschaftliche Herausforderungen

In den vergangenen Jahren wurde immer wieder eine mögliche Schwermetallbelastung durch PET-Flaschen politisch und öffentlich diskutiert. In der Tat können sich Spuren von Antimon aus PET herauslösen, diese sind jedoch nach bisherigen Erkenntnissen derart gering konzentriert und unschädlich. Trotz allem sind die Reduktion und der Verzicht von Antimon und die Entwicklung von alternativen, schwermetallfreien Katalysatoren wichtiges Ziel für eine bessere Nachhaltigkeit von PET-Flaschen.

Die Naturstoffchemie der Lebensmittel bietet eine Fülle von Reaktionsmedien. Lebensmittelverpackungen müssen gegen sehr unterschiedliche Medien weitestgehend inert sein. Sie dürfen weder Stoffe abgeben, die durch Reaktion mit Lebensmittelinhaltsstoffen, die Lebensmittel verändern, noch sollen sie flüchtige Aromastoffe aus den Lebensmitteln entweichen lassen oder absorbieren. Die Barriereigenschaften von Glas oder Porzellan mit den technischen Vorzügen von Kunststoffen und Metallen in einem recyclingfähigen Material zu vereinen, wäre die Wunschvorstellung. Die Herausforderung ist, für die unterschiedlichen Lebensmittel den jeweils technisch-wissenschaftlich günstigsten Kompromiss zu finden.

#### 4.8.1.3. Forschungsbedarf

Zukünftig gilt es, das Eigenschaftsspektrum der Materialien, die mit Lebensmitteln in Kontakt kommen, durch Materialkombination so intelligent maßzuschneidern, dass die Qualität und Haltbarkeit der Nahrungsmittel gesichert wird. Insbesondere wird ein Schwerpunkt auf der Verbesserung der Gaspermeation durch bessere Diffusionsperren oder –schichten liegen.

Weiterhin ist der Sicherheitsaspekt in Form von geeigneten Sensoren zur Indikation der Frische der Nahrungsmittel ein breites Forschungsfeld, das zunehmend an Bedeutung gewinnen wird.

Für die Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen einem Material mit Lebensmitteln sind entsprechend der Vielfalt der Lebensmittel Modelle notwendig. Die Modelle, mit denen die Eignung der Materialien für Lebensmittel geprüft wird, müssen weiter entwickelt werden. Bisher wird einseitig simuliert, wie Stoffe von dem Material in die Lebensmittel wandern. Es fehlen Modelle, mit denen der Verlust an Aroma- oder anderen Lebensmittelinhaltsstoffen durch den Kontakt mit dem Material betrachtet werden kann.

Die ökologisch sinnvolle Verwendung von Recyclingmaterial birgt Risiken durch den Eintrag nicht definierbarer Verschmutzungen. Der direkte Kontakt von nicht sicherem Recyclingmaterial mit Lebensmitteln soll durch o.g. Barriere-schichten in der Verpackung verhindert werden. Die Permeabilität von Kunststofffolien gegenüber verschiedensten Kontaminanten ist noch nicht abschließend untersucht.

Selbst die Konservendose, die 2013 ihren 200.ten Geburtstag feiert, ist noch nicht ausgeforscht. Die Innenbeschichtungen der Dosen verzögern wirksam die Korrosion, sind aber selbst nicht immer gegenüber allen Lebensmitteln hinreichend gegen Wechselwirkungen geschützt.

## 4.8.2. Kunststoffverpackungen

### 4.8.2.1. Stand der Technik

Polymerbasierte, funktionsoptimierte Verpackungen, von der einfachen Tragetasche oder Plastiktüte, über die PET-Flasche bis hin zur multifunktionalen Mehrschichtfolie, stellen eine Errungenschaft der modernen Industriegesellschaft dar. Allein in Europa wurden im Jahr 2009 ca. 18 Millionen Tonnen Kunststoff zu Verpackungen verarbeitet.<sup>18</sup>

<sup>18</sup> PlasticsEurope - Association of Plastics Manufacturers: Plastics – the facts 2010. An analysis of European plastics production, demand and recovery of 2009. [www.plasticseurope.org](http://www.plasticseurope.org)

Abgesehen von Papier, Pappe, etc., werden die meisten polymerbasierten Verpackungen fast ausschließlich aus fossilen Ressourcen hergestellt, wobei Kunststoffe wie Polyethylen (PE), Polypropylen (PP) und Polyethylenterephthalat (PET) die Hauptrolle spielen.

### 4.8.2.2. Technisch-wissenschaftliche Herausforderungen

Bei allen Vorteilen bezüglich Haltbarkeit des Packguts, Hygiene, Lagerhaltung, Logistik und, nicht zuletzt, Bequemlichkeit, gibt es Herausforderungen im Sinne einer nachhaltigen Wirtschaft. Die genannten Polymere sind unter normalen Umweltbedingungen äußerst langlebig und gehören daher weder auf eine Deponie noch in die Umwelt. Bei ihrer Verbrennung als bessere Energie erzeugende end-of-life Option, wird CO<sub>2</sub> frei gesetzt, das aufgrund des fossilen Ursprungs des Kohlenstoffs jedoch einen positiven netto-Beitrag zur CO<sub>2</sub>-Bilanz liefert. Recycling, als zweitbeste Lösung (nach Wiederverwendung), ist mit Einbußen in den Eigenschaften verbunden, was letztendlich zu einer der zwei vorigen Optionen zurück führt.

### 4.8.2.3. Lösungsansätze

Eine Alternative zu Energy-Recovery oder Recycling wird in zunehmendem Maße durch die Verwendung von sog. Biokunststoffen (bioplastics) geschaffen. Diese sind entweder biologisch abbaubar (nicht notwendig aus nachwachsenden Rohstoffen), oder aus nachwachsenden Rohstoffen erzeugt (nicht notwendig bioabbaubar), oder beides. Beide Themenbereiche werden, mit sich verschiebender Wichtung hin zur Biobasiertheit, sowohl von der Politik (z. B. Verbot von PE-Tragetaschen in Italien, EU lead market initiative „Bio-based products“) als auch der Industrie aufgegriffen. Seit Jahren produziert beispielsweise die BASF einen fossil-basierten jedoch bioabbaubaren Polyester unter dem Markennamen Ecoflex, der vielfältig als Blendkomponente in stärkebasierten Müllbeuteln und Tragetaschen eingesetzt wird. Unlängst wurde eine 60 kt-Anlage in Betrieb genommen. Coca-Cola brachte 2009 eine sog. „plant bottle“ auf den Markt, die aus einem PET mit biobasierter Ethylenglycol-Komponente (ca. 30 Masse % biobasiert im gesamten Polymer) besteht. Die Fa. Danone verpackt seit jüngster Zeit ihr Joghurt-Produkt „Activia“ in einem Becher aus Polymilchsäure (PLA), einem biobasierten und bioabbaubaren aliphatischen Polyester. Generell ist PLA, neben Stärke, der industriell bedeutendste Biokunststoff und weltweit mit ca. 187.000 Jahrestonnen<sup>19</sup> verfügbar. Biokunststoffe stellen einen Wachstumsmarkt mit Zuwachsraten im zweistelligen Prozentbereich dar<sup>20</sup>, der zweifellos einen wichtigen Beitrag zur Verbesserung der Nachhaltigkeit der Wirtschaft liefert und mit den bestehenden Produkten noch längst nicht die maximal mögliche Marktdurchdringung erreicht hat.

Poly lactide (PLA) sind eine der wichtigen Werkstoffe dieser Art, sie zählen zu den Polyhydroxycarbonsäuren. Die Eigenschaften der Poly lactide hängen vor allem von der Molekülmasse, dem Kristallinitätsgrad und gegebenenfalls dem Anteil von Comonomeren ab. Zahlreiche Eigenschaften von Poly lactiden sind für vielerlei Einsatzgebiete von Vorteil: für Sport- und Funktionsbekleidung, für textile Anwendungen sowie im Möbelbereich für Innen- und Außeneinsatz und auch für Leichtbauanwendungen.

### 4.8.2.4. Forschungsbedarf

Zukünftig muss vermehrt daran gearbeitet werden, das Eigenschaftsspektrum der Biokunststoffe zu erweitern. Nur dadurch sind weitere Fortschritte im Bereich der bioplastics zu erwarten und die Durchdringung auch anderer Marktsegmente möglich.

Im hier betrachteten Verpackungsbereich spielen hauptsächlich Barriere-Eigenschaften gegenüber Gasen und Flüssigkeiten eine herausragende Rolle. Sind frisches Obst und Gemüse problemlos in PLA-Folien und -Schalen zu verpacken, so gilt dies nicht für Anwendungen mit höheren Anforderungen an Gas- und Wasserbarriere<sup>21</sup>. Die

19 European Bioplastics, Market development, <http://en.european-bioplastics.org/market/market-development/>, abgerufen am 26.11.2012

20 European Bioplastics, Market, <http://en.european-bioplastics.org/market/>, abgerufen am 26.11.2012

21 E. Almenar, R. Auras: Permeation, Sorption, and Diffusion in Poly(lactic acid), Poly(lactic acid): Synthesis, Structures, Properties, Processing, and Applications. Edited by R. Auras, L.-T. Lim, S.E.M. Selke, and H. Tsuji, Wiley, 2010, 155-179

Optimierung der Barriere-Eigenschaften gegenüber Gasen und Flüssigkeiten bezogen auf die jeweilige Anwendung hat somit sowohl bei PLA aber auch anderen Biokunststoffen absolute Priorität.

Zudem sind noch weitere Entwicklungsarbeiten notwendig, insbesondere müssen die Herstellungsprozesse der Bio-Kunststoffe noch optimiert werden, damit das Material kostengünstig hergestellt werden kann.

### 4.8.3. Textilien

#### 4.8.3.1. Stand der Technik

Textilien sind faserbasierte Flächengebilde. Ausgangsstoffe sind Naturfasern (z. B. Wolle, Baumwolle) oder synthetische Fasern, die über die Zwischenschritte Garnherstellung, Flächenherstellung, Färben bzw. Veredeln und Konfektionieren zu textilen Produkten verarbeitet werden. Die mechanischen, physikalischen und chemischen Eigenschaften textiler Flächengebilde sind in weiten Bereichen gezielt einstellbar (elastisch bis steif, wasserdicht und hydrophob bis porös und hydrophil etc.). Die Eigenschaftsprofile sind abhängig von den Fasermaterialien und den gewählten Verarbeitungsprozessen. Hauptanwendungsfelder im Bereich der Bedarfsgegenstände sind Bekleidung, Haus- und Heimtextilien und Hygiene- und Medizinartikel. Organische Synthesefasern basieren auf natürlichen Polymeren (Cellulose bzw. Cellulose-Regenerat-Fasern, insbesondere Viskose) oder auf synthetischen Polymeren. Die wichtigsten Vertreter sind hier die Polyester, Polyamide und Polyolefine (von besonderer Bedeutung: PET, PA 6 bzw. PA 6.6 und PP). Für technische und/oder medizinische Anwendungen kommen auch diverse weitere Polymere wie HD-PE, Hochtemperatur-Polymere wie PEI, PEEK und andere, Fluor-Polymere (z. B. PVDF) und biobasierte Polymere (PLA, PHB, Chitin) zur Anwendung. Von besonderer Bedeutung sind Hochmodulfasern auf organischer Basis, hierzu zählen insbesondere Aramide und Carbonfasern, die im Leichtbau und für industrielle Anwendungen benutzt werden. Glas, Basalt, keramische Werkstoffe und Metalle sind anorganische Fasermaterialien für technische Anwendungen. Elastane sind Blockcopolymere aus Polyethersegmenten und Polyurethansequenzen. Durch eine Kombination aus steifen und elastischen Blöcken wird die äußerst hohe Dehnbarkeit von mehr als 700 % erreicht.

Besondere Anforderungen an heutige Fasermaterialien sind mechanische Festigkeit und E-Modul, Dehnung und elastisches Verhalten bzw. Wiedererholungsvermögen, bekleidungsphysiologische Spezifika (Wärmeisolation bzw. -transport, Feuchtetransport), Färbereigenschaften, Abrasionsfestigkeit, UV-Resistenz, Resistenz gegenüber alkalischen oder sauren Medien und Biokompatibilität. In den Herstellungsverfahren für polymerbasierte Chemiefasern sind folgende Kennwerte für die gewünschten Eigenschaftsprofile im Gebrauch von zentraler Bedeutung: Übergangstemperaturen (Glasübergang, Schmelze-Temperatur), Kristallisationsgrad und Orientierung der Molekülketten. Die erzielten Fasern werden charakterisiert durch Polymerart, Feinheit (Durchmesser) und Querschnitt der Einzelfaser, ihren Verstreckungsgrad, thermomechanische und thermische Eigenschaften, Wasseraufnahmevermögen und das Färbeverhalten.

#### 4.8.3.2. Technisch-wissenschaftliche Herausforderungen

Gleichlaufend mit dem Aufschwung der Chemiefaserindustrie sind einige Zweige von Wissenschaft und Technik neu entstanden oder haben sich erheblich fortentwickelt. Dazu gehören die Chemie der linearen organischen Hochpolymere und die Faserphysik als Teilgebiet der Physik der Hochpolymere. Auch die Verfahrenstechnik musste in neue Bereiche vorstoßen. Die Entwicklung und der Bau von Maschinen und Anlagen zur Herstellung von Chemiefasern liegen zum Teil bei den Chemiefaserproduzenten selbst, werden aber auch von spezialisierten Unternehmen des Anlagen- und Maschinenbaus betrieben.

Die verfahrenstechnischen und apparativen Gesichtspunkte und Probleme der Chemiefasererzeugung und ihre Lösungen stellen einen entscheidenden Bestandteil der Erfahrungen der Chemiefaser-Hersteller dar. Ein Großteil davon ist in Patentschriften enthalten, aus denen aber oft schwer herauszulesen ist, wie wirklich gearbeitet wird.

Nachfolgend sind die wesentlichen Anforderungen an polymere Fasermaterialien zusammengestellt:

- » Das Polymer muss linear sein. Die Moleküle dürfen keine oder fast keine Kettenverzweigungen aufweisen, sonst lassen sie sich schlecht verspinnen und schlecht durch Verstrecken orientieren. Aus dem gleichen Grund sollte die Molmasse mindestens 10.000 betragen. Außerdem ist die Festigkeit der Endprodukte bei niedriger Molmasse zu gering; es sind dann zu wenig laterale Bindungen jeder Molekülkette zu ihren Nachbarn vorhanden, die ihr Abgleiten bei Zugbelastung behindern. In der Praxis liegen die Molmassen meist erheblich über dem angegebenen Grenzwert.
- » Die chemische Struktur und der sterische Aufbau der Molekülketten müssen die Möglichkeit lateraler Bindungen zwischen ihnen bieten. Das Molekül sollte keine zu stark herausstehenden Seitengruppen aufweisen, die für eine dichte Packung (Festigkeit) hinderlich wären.
- » Der Schmelzpunkt oder, falls niedriger, die Zersetzungstemperatur des Polymeren müssen hoch genug liegen. Beide hängen von seiner chemischen Struktur ab. Der Schmelzpunkt auch etwas von der Molmasse und gegebenenfalls von seinem kristallinen Aufbau in Faserform.
- » Eine Verspinnbarkeit muss gegeben sein, das heißt, die Schmelze oder Lösung muss fadenziehend sein. Hierzu ist es notwendig, dass die Oberflächenspannung und die Schmelze- bzw. Lösungsviskosität bestimmte Werte nicht unter- bzw. nicht überschreitet. Zu geringe Oberflächenspannung und Viskositäten verhindern die Faserbildung, zu hohe Viskositäten und Oberflächenspannung führen zu einem Schmelzebruch.
- » Wünschenswert ist, dass das Polymer möglichst unempfindlich ist gegen chemische Substanzen jeder Art und Strahlungseinflüsse.
- » Sehr wichtig ist, dass sich die hochpolymeren Fasern für den Einsatz in Bekleidung und Heimtextilien färben lassen sowie geeignete Pflegeeigenschaften aufweisen.

Von besonderer Relevanz ist die Verarbeitung von Standardpolymeren, die über individuell veränderte und funktionalisierte Additive und geeignete Prozessführungen besondere Eigenschaftsprofile ausbilden. Beispiele sind leitfähige Polymere, piezoelektrische Polymere, photovoltaische Polymere, eingebrachte Wirkstoffsysteme, etc. Ein weiterer Ansatz ist die chemische Modifikation von Polymeren, die bspw. per Lösungsmittelspinnen verarbeitet werden. Dies zielt auf die Optimierung der Materialqualitäten und der Prozesseigenschaften. Beispiele hierfür sind Precursormaterialien für Carbonfasern, viskosebasierte Fasern oder Polyurethane. Eine Herausforderung ist weiterhin die Verarbeitbarkeit von nachvernetzenden Polymeren, die durch gezielte Aktivierung nach der Erspinnung nachvernetzen. Beispiele hierfür sind Aramide oder die Precursormaterialien.

Vielfältige Herausforderungen finden sich im Bereich der Textilchemie und sonstiger Hilfsstoffe in der textilen Prozesskette zur Sicherung gewünschter Verarbeitungseigenschaften (tribologische Eigenschaften, Antistatik, Resistenz gegenüber mechanischen Belastungen) und bestimmter Eigenschaftsprofile im Gebrauch: Beispiele hierfür: schmutzabweisend, flammhemmend, UV-stabil, färb- und bedruckbar, Pilling-Verhalten, Anti-Statik, anti-bakteriell, Funktionsintegration (physikalisch, chemisch, elektrisch bzw. elektronisch) bis hin zu Smart Textiles.

Ob sich ein Polymer als Rohstoff für Chemiefasern eignet, wird auch durch wirtschaftliche Erwägungen bestimmt. Dazu gehören die Verfügbarkeit der Vorprodukte, der Aufwand bei der Herstellung des Rohstoffs und bei seiner Umwandlung in Faserform sowie Abfall- und Umweltprobleme.

Polymere Faserstoffe basieren bisher überwiegend auf der Mineralöl-Chemie. Ein Wechsel zu biologischen Rohstoffen ist aufgrund der geringen Verfügbarkeit der entsprechenden Prozessrouten und der damit verbundenen hohen Kosten erschwert. Die Eigenschaftsprofile der Biopolymere entsprechend noch nicht in vollem Maße den etablierten mineralöl-basierten Polymeren. Die Ausnahme für Polymere, die auf nachwachsenden Produkten aufbauen, sind Cellulose bzw. Cellulose-Regenerat-Fasern (insbesondere Viskose-Fasern für Bekleidungs- und technische Anwendungen).

#### 4.8.3.3. Forschungsbedarf

Der aktuelle Forschungsbedarf gestaltet sich sowohl von den wissenschaftlichen Fragestellungen als auch bezüglich der Anwendungsfelder moderner Synthefasern sehr interdisziplinär und vielfältig. Mit zunehmender Beherrschung der Nanotechnologie und dem Verständnis molekularer Mechanismen in Biologie, Medizin, Physik und Chemie verlieren sich die traditionellen Grenzen zwischen den verschiedenen Wissenschafts-Disziplinen. Gleichzeitig eröffnen sich neue Perspektiven für die Materialentwicklung hin zu aktiven Materialsystemen mit einer Funktionalität, wie sie bisher nur lebenden Organismen vorbehalten war. Forschungsfragen betreffen u.a. die Entwicklung spezialisierter Fasermaterialien für Bereiche wie z. B. Leichtbau, Medizin und Life Sciences, Smart Materials, Bauwesen, Energieharvesting bzw. Energiewandlung und andere. Hierbei werden die grundlegenden Werkstoffeigenschaften, die Prozessforschung und z. B. auch Grenzflächen- und Oberflächenforschung mit einbezogen. Nachfolgend werden zentrale Forschungsfragen aufgelistet:

- » Integration von Nanopartikeln als funktionelle Füllstoffe oder Bindung nanoskaliger Partikel an Oberflächen. Die Herausforderung ist das Dispergieren im Polymer bzw. die Reduzierung der Agglomerationsneigung. Ziel ist, die Festigkeit, Modul und Resistenz gegen Schmutz, UV-Strahlung und Abrasion signifikant zu verbessern.
- » Werkstoff-Modelle und Modellierung des Verarbeitungsverhaltens z. B. für Hochleistungsfasern mit integrierten Nanopartikeln: Die gezielte Einstellung der Fasereigenschaften durch Nanopartikel ist nur möglich, wenn die gegenseitige Beeinflussung von Prozesstechnik, innerer Mikrostruktur und eingelagerten Nanopartikeln genügend bekannt ist
- » Funktionsintegration: Sensorik, Faseroptik, Aktorik: z. B. die gezielte Induzierung piezoelektrischer, photochromer oder elektrochromer Eigenschaftsprofile in polymere Fasermaterialien durch Modifizierung des Polymers bzw. gezielte Prozesssteuerung während der Extrusion bzw. Verarbeitung.
- » Herstellung nanoskaliger Fasern z. B. für medizinische oder Filteranwendungen
- » Verarbeitungsverhalten und Produkteigenschaften für biobasierte Polymere, chemische Modifizierung von Biopolymeren
- » Entwicklung und Herstellung integrierter, funktioneller Schichten und Strukturen auf Textilien
- » Entwicklung textiladaptierter, funktioneller Materialien
- » Nasschemische Modifizierung von Faser- und Textiloberflächen
- » UV-Behandlung von Oberflächen, Plasmabehandlung von Textilien und Fasern, Elektronenstrahlbehandlung von Textilien und Fasern, Grenzflächen-Design
- » Cellulose-Regeneratfasern: Einsatz ionischer Flüssigkeiten, Kostenreduktion des Chemiezellstoffs

Diese und kommende aktuelle Forschungsfragen werden vermehrt durch interdisziplinär besetzte Forschergruppen bearbeitet. Hierbei spielen die Grundlagendisziplinen rund um die Chemie aber auch Fachgebiete wie die Verfahrenstechnik, Textiltechnik und Produktionstechnik eine große Rolle.

### 4.8.4. Waschmittel und Reinigungsmittel

#### 4.8.4.1. Stand der Technik

Eine Vielzahl von chemischen Produkten wird für Wasch- und Reinigungsmittel eingesetzt. Enthalten sein können Tenside, Komplexbildner, Bleichmittel/optische Aufheller, Alkalien oder Säuren, Komplexbildner, Dispergatoren, Lösemittel, Abrasiva sowie Enzyme, Hydrotrope, Korrosionsinhibitoren, Farbstoffe, Verdickungsmittel, Konservierungsstoffe und Parfümöle.

Viele Entwicklungen werden unter dem Aspekt der Nachhaltigkeit des Umweltschutzes betrieben, da diese Produkte über die Stoffströme der Haushalte und die kommunalen Abwasserkanäle entsorgt werden und somit wieder in den Trinkwasserkreislauf kommen können.

Da Tenside ihre Wirkung nur im weichen Wasser voll entfalten, benötigen Waschmittel einen Wasserenthärter. Hierfür wurden bis in die 80er Jahre Phosphate eingesetzt, die zur Überdüngung der Flüsse führten. Heute werden in Textilwaschmitteln zu diesem Zweck Zeolithe, Citrate oder Schichtsilikate in Kombination mit Polyacrylaten verwendet.

Alein für Waschmittel liegt der Bedarf an Polyacrylaten in Europa bei rund 90.000 Jahrestonnen. Polyacrylate sind aus ökologischer Sicht unkritisch, da ihre aquatische Toxizität gering ist und sie an den Belebtschlamm adsorbieren. Zusammen mit dem Zeolith können sie mit Belebtschlamm so aus dem Abwasserstrom entfernt werden. Eine biologisch abbaubare Alternative zu Polyacrylaten sind Polyasparaginsäure-Derivate. Im Rahmen der Forschungs- und Entwicklungsarbeiten für das Herstellverfahren von Polyasparaginsäure konnte auch ein umweltverträgliches Komplexmittel entwickelt werden. Das Iminodisuccinat ist ebenfalls biologisch gut abbaubar und besitzt, wie die Polyasparaginsäure, ein gutes ökotoxikologisches Gesamtprofil.<sup>22</sup>

Waschmittelenzyme wirken als Katalysatoren und bauen natürliche Anschmutzungen durch Spaltung ab.

Obwohl Enzyme nur in sehr geringer Menge in der Waschmittelmischung eingesetzt werden, gelten sie als Schlüssel für moderne Waschmittel. Diese hochspezialisierten Biomoleküle entfernen also spezifisch mit hoher Wirksamkeit Flecken und Verschmutzungen von Wäschestücken. Weil sie schon bei niedrigen Temperaturen aktiv werden, reduzieren sie die Waschttemperaturen und somit den Energiebedarf. Das vermindert nicht nur die Emission von Treibhausgasen wie CO<sub>2</sub>, sondern senkt auch die Stromrechnung für die Anwender. Zudem sind die Enzyme vollständig biologisch abbaubar.

Es werden unter anderem Proteasen, Amylasen, Lipasen, Cellulasen, Mannanasen und Pectatlyasen in Waschmitteln eingesetzt:

Diese Enzyme spalten vor allem Proteine und wirken gegen Flecken von Eiern und Milch, beseitigen Rückstände von Schokolade und Kartoffelbrei oder spalten Fette und wirken gegen Flecken von Make-up oder Sonnencreme.

#### 4.8.4.2. Technisch-wissenschaftliche Herausforderungen

Der Gesetzgeber schreibt seit dem Jahr 2005 vor, dass alle in Wasch- und Reinigungsmitteln eingesetzten Tenside schnell und vollständig biologisch abbaubar sein müssen. Der biologische Endabbau der Tenside, der über mehrere einzelne Abbauschritte durch Mikroorganismen erfolgt, sorgt dafür, dass nur noch Wasser, Mineralsalze und Kohlendioxid übrig bleiben. Dabei vermehren sich in den Kläranlagen auch die Bakterien, es entsteht mit dem Belebtschlamm „Biomasse“. Verstärkt werden Tenside auch aus nachwachsenden Rohstoffen, vor allem auf der Basis von Palmkern- und Kokosöl, Zucker und Stärke entwickelt. Die Suche nach alternativen Tensiden mit höherer Leistungsfähigkeit geht weiter.

<sup>22</sup> [http://www.baypure.com/imperia/md/content/fcc/baypure/friedrich\\_woehler\\_preis.pdf](http://www.baypure.com/imperia/md/content/fcc/baypure/friedrich_woehler_preis.pdf)

Neue Lebensmittel, die auch stärker prozessiert werden, stellen weitere Herausforderungen dar, da sie neue Flecken auf den Textilien verursachen können. Neue Leistungsprofile für die Waschmittel werden so notwendig.

#### 4.8.4.3. Forschungsbedarf

Die Entdeckung der Archaeobakterien erschließt für die Waschmittelindustrie eine neue, interessante Wirkstoffklasse, die es weiter intensiv zu untersuchen gilt. Sie sind thermisch ungewöhnlich stabil, da sie eine größere Anzahl von Nebervalenz-Bindungen besitzen, die die aktive Molekülstruktur stabilisieren.

Ein deutlicher Entwicklungsbedarf besteht bei folgenden Prozessen und Rohstoffen:

- » Weitere Kompaktierungsschritte zur Senkung von Transportbedarf & Verpackungen
- » Weitere Leistungsverbesserung im Niedrigtemperaturbereich
- » Verstärkter Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen
- » Hygiene bei tiefen Temperaturen
- » Neue Rohstoffquellen für nachwachsende Tenside, die nicht in Konkurrenz zu Lebensmitteln stehen
- » Polymere für textile Benefits wie verbesserter Elastizität, Farberhalt und Bügelerleichterung
- » Weiße Biotechnologie für effizientere Enzyme und Biotenside bei gleichzeitiger effizienter Herstellung
- » Sicherstellung der Enzym- und Bleichestabilisierung

### 4.8.5. Klebstoffe

#### 4.8.5.1. Stand der Technik

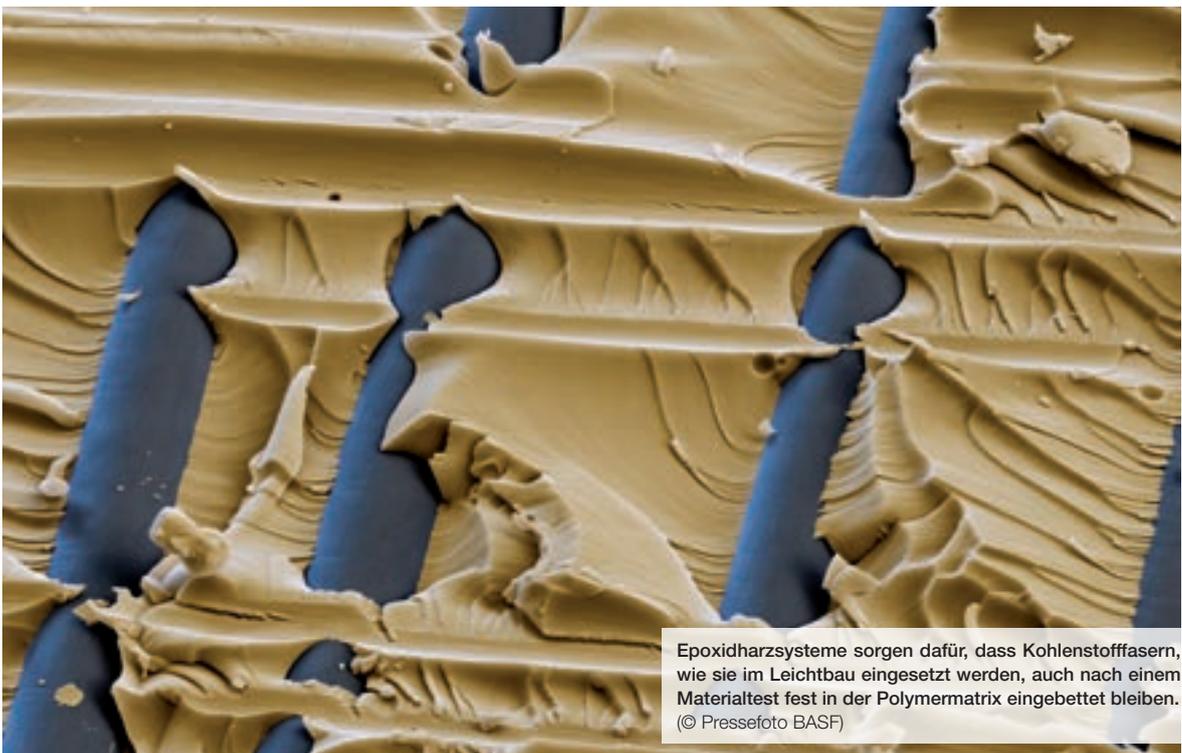
Nur wenige Bedarfsgegenstände bestehen monolithisch aus einem Material und es stellt sich daher immer wieder die Frage, wie die Verbindung zwischen den unterschiedlichen Einzelkomponenten realisiert werden soll. Die Entscheidung fällt wegen objektiver Vorteile immer häufiger zugunsten der Klebtechnik. Durch Kleben lassen sich Materialien kombinieren, welche bei anderen Verbindungstechniken unverträglich sind, es werden Konstruktionen möglich, die man sonst nicht wirtschaftlich fertigen könnte, und die Designfreiheit ist enorm groß. Vom Briefumschlag bis zur Weltraumstation reicht die Bandbreite der modernen Klebtechnik. Insbesondere die Fertigung neuartiger Faserverbundwerkstoffe (siehe Kapitel 4.4.1. Leichtbau) ist ohne Hightech-Klebstoffe und -Harze nicht denkbar. Hieraus resultiert eine enorme volkswirtschaftliche Wertschöpfung. Die deutsche Klebstoffindustrie und die Klebstoffanwender sind weltweit führend, was letztlich auch der herausragenden institutionellen und universitären Infrastruktur sowie einer etablierten Ausbildung zu verdanken ist. Für die verschiedenen Bereiche der industriellen Fertigung sind geschätzt 20.000 Klebstoffe auf dem deutschen Markt verfügbar. Teilweise sind dies Nischenprodukte, von denen nur wenige Kilogramm produziert werden – ein großer Teil der Wertschöpfung liegt in den folgenden Stufen. Es werden immer wieder neue Klebstoffe für spezielle Produkte und dann meist mit weiteren Eigenschaften benötigt. Hierbei kann es sich z. B. um eine Barrierewirkung handeln, um so die Zahl der Schichten in Lebensmittelverpackungsfolien zu reduzieren, oder die Beständigkeit und Dichtigkeit gegenüber eindringenden Flüssigkeiten zu verbessern.

#### 4.8.5.2. Technisch-wissenschaftliche Herausforderungen

Im Leichtbau werden unterschiedliche Werkstoffe miteinander verbunden. Kleben ist eine von verschiedenen Möglichkeiten. Klebstoffe sind Formulierungen verschiedener Klebstoffrohstoffe z. B. auf Basis von Polyurethanrohstoffen. Sie übertragen die Kräfte großflächig und erhöhen dabei kaum das Gewicht (im Gegensatz zu Schrauben). Klebeverbindungen bringen jedoch auch Nachteile mit sich: Sie erschweren das zerstörungsfreie wieder öffnen und das Recycling.

### 4.8.5.3. Forschungsbedarf

- » Besseres Verständnis für Alterungsvorgänge der Klebstoffe, um so Produkte mit kontrollierter Langlebigkeit zu generieren.
- » Um dem starken Bedarf von Leichtbauelementen gerecht zu werden, gilt es gezielt neue Harze zu entwickeln, die die Fertigung von Faserverbundstrukturen mit hoher Stückzahl erlauben
- » Entwicklung von Klebstoffen mit schnellerer Härtung bei mildereren Bedingungen, dadurch Senkung des Energieverbrauchs und Steigerung der Produktivität, mit Schwerpunkt der Untersuchungen auf unendliche Lagerfähigkeit bei Umgebungsbedingungen und unmittelbare Härtung „mit einem Fingerschnippen“
- » Klebstoffe mit eingebauten Mechanismen für die Selbstreparatur oder solche, bei denen die Verbindung „auf Knopfdruck“ für die Reparatur oder das Recycling wieder gelöst werden kann



Epoxidharzsysteme sorgen dafür, dass Kohlenstofffasern, wie sie im Leichtbau eingesetzt werden, auch nach einem Materialtest fest in der Polymermatrix eingebettet bleiben.  
(© Pressefoto BASF)



Inzwischen leben weltweit mehr Menschen in Städten als auf dem Land. Moderne, ressourcenschonende und energiesparende Baustoffe tragen dazu bei, die Lebensqualität in urbanen Lebensräumen weiter zu verbessern.

## 4.9. Materialien für Bauen, Wohnen und Infrastruktur

### 4.9.1. Stand der Technik

Fast unbemerkt von der breiten Öffentlichkeit hat im Bereich der Baumaterialien für Gebäude und Infrastruktur ein außerordentlicher Umbruch stattgefunden. Während Gebäudesanierungen mit Dämmstoffen und generell Niedrigenergie- oder gar Plusenergiehäuser breit diskutiert werden, ist die Entwicklung anderer neuer Baustoffe und aufeinander abgestimmter Systemlösungen von den Medien eher vernachlässigt worden. Zu Unrecht, denn durch den gestiegenen Anspruch an die Funktionalität, den Energieverbrauch, die Dauerhaftigkeit und die Recyclingfähigkeit von Bauwerken ist auch die Entwicklung moderner Baustoffe als Bestandteil von Systemlösungen weit vorangeschritten. Es wurden beispielsweise in den letzten Jahren Hochleistungsbetone und multifunktionale Wandputze oder Straßenbeläge entwickelt. So gibt es heute bereits Innenputze mit eingebautem Wärmespeicher und Außenputze, die Schadstoffe vom Haus fernhalten und sogar neutralisieren können. Es wurden Beschichtungen entwickelt, die den aggressiven Bedingungen z. B. in einer Kläranlage standhalten oder die Tragfähigkeit von z. B. faserbasierten Bauweisen erhöhen und es gibt bereits heute lichtdurchlässigen oder auch flüsterleisen Beton im Straßenbau.

Diese Entwicklungserfolge beruhen in erster Linie auf Innovationen der bauchemischen Industrie und die Integration dieser Innovationen in Bausysteme. Nur in wenigen anderen Fachdisziplinen werden so viele unterschiedliche Materialien und Herstellungsverfahren verwendet und miteinander kombiniert wie in der Bauchemie: Die allgemeinen Disziplinen des Bauingenieurwesens bieten den technischen Hintergrund; physikalische Kenntnisse sind wichtig für die grundlegende Wechselwirkung der Stoffe. Die Chemie schließlich bietet die Basis für die Entwicklung und Analyse neuer Materialien.

Deutsche Unternehmen sind in vielen Produktbereichen der Bauchemie weltweit führend. Die Akteure der bauchemischen Industrie stellen verschiedene Produkte und Additive für den Bereich Bauen, Wohnen und Infrastruktur her. Die Firmen stammen sowohl aus dem Bereich der klein- und mittelständigen Unternehmen als auch der Großindustrie. Entscheidend für den großen weltweiten Erfolg deutscher Unternehmen sind die hohe und gleichbleibende Produktqualität sowie der hohe Innovationsgrad, der sich maßgeblich aus dem engen Zusammenspiel aller Akteure der gesamten Wertschöpfungskette ergibt. Ein wichtiger deutscher Standortvorteil ist die gute Verfügbarkeit nahezu aller notwendigen Rohstoffe für die Produktherstellung.

Generell eröffnen sich durch die Kombination der klassischen bauchemischen Inhalte, die historisch durch die Beton- und Additivchemie dominiert sind, mit der polymerchemischen, naturstoffchemischen bis hin zu umweltchemischen Inhalten, Potentiale in der Materialentwicklung, die bis dato nur zu erahnen sind und in den nächsten Jahren zu einer Vielzahl von Neuentwicklungen führen werden. Beispiele aus heutiger Sicht sind hybride Materialien, Verbundwerkstoffe, multifunktionale Baustoffe und komplexe Bausysteme.

Viele natürliche Baustoffe haben herausragende Eigenschaften, sind jedoch auch mit erheblichen Nachteilen verbunden. So ist Lehm ein gutes atmungsaktives Baumaterial, jedoch von geringer Festigkeit und nicht wasserbeständig. Wolle ist ein sehr guter Dämmstoff, jedoch sehr anfällig für Insekten und auch nur saisonal begrenzt verfügbar. Der direkte Einsatz von natürlichen Rohstoffen ist daher meist problematisch. Je nach Jahreszeit und Herkunft schwanken darüber hinaus Zusammensetzungen und Verfügbarkeiten, was die Qualitätssicherung erschwert und eine konstante Belieferung des Bauwesens behindert.

Vor etwa 80 Jahren wurde damit begonnen, natürliche Stoffe chemisch aufzubereiten, z. B. Casein, Lignosulfonat und Wurzelharzextrakte oder vollständig synthetisch nachzubilden, z. B. Citrate, Tartrate etc. Auch heute noch sind einige dieser Produkte unverzichtbar, in anderen Fällen dienen verschiedentlich natürliche Rohstoffe als Basis für bauchemische Produkte, wie z. B. modifizierte Cellulosen oder Salze von Aminosäuren.

Ein Ziel der Bauchemie besteht darin, die Nachteile der natürlichen Materialien auszugleichen, indem moderne Baustoffe und Additive die positiven Eigenschaften solcher Biorohstoffe synthetisch nachbilden und verstärken. So können durch eine optimierte chemische Struktur bessere Wirksamkeiten erreicht werden. Dennoch können in Zukunft Biomaterialien verstärkt als Vorbild für neue Wirkstoffe oder nach einer Veredelung direkt als Rohstoffe für neue Zusatzmittel dienen. So kann zukünftig z. B. das Feld der Biokomposite für die Bauindustrie erschlossen werden.

### 4.9.2. Relevanz

Die deutsche Bauchemie trägt mit einem Jahresumsatz von ca. 5,1 Milliarden Euro zu mehr als 50% des europäischen Umsatzes und zu ca. 1/3 des Weltmarktes dieser Branche bei und ist ein wichtiger Arbeitgeber mit hoher Kontinuität. Allein dies zeigt die hohe gesellschaftliche und zugleich wirtschaftliche Relevanz. Aufgrund des sehr hohen Anteils an Material- und Energieressourcen für die Errichtung und den Betrieb von Gebäuden spielen Materialentwicklungen hin zu ressourcenschonenden und energiesparenden Baustoffen eine wesentliche Rolle bei zukünftigen Entwicklungen. Verdeutlicht wird dies unter anderem durch das mit Abstand größte Abfallaufkommen im Baubereich: Vom gesamten Abfallaufkommen in Deutschland sind dies über 80% Baureststoffanteil. Das Thema Gebäudeenergieeffizienz und die damit verbundene Verwendung fortschrittlicher Materialien, erhält durch den Kernenergieausstieg eine noch größere Bedeutung als bisher.

### 4.9.3. Gesundheitliche und Ökologische Anforderungen

Die hygienischen und ökologischen Eigenschaften von Bauprodukten stehen seit geraumer Zeit in der öffentlichen Diskussion. Produktion, Verarbeitung und Einbau, Nutzung sowie Rückbau und Entsorgung bzw. Wiederverwendung sind die wesentlichen Stationen im Lebenszyklus von Bauprodukten. Sie alle werden von gesetzlichen oder normativen Regelungen flankiert. Diese Regelungen sollen dazu dienen, Mensch und Umwelt, die von den einzelnen Abschnitten des Lebenszyklus der Bauprodukte berührt werden, vor adversen Einflüssen zu schützen und auch im Sinne der Ökologie eine Dauerhaftigkeit zu gewährleisten. Während der Nutzungsphase sind bei Baustoffen für den Innenraum in erster Linie Fragen nach der Freisetzung von flüchtigen organischen Stoffen (VOC), Radon und radioaktiver Strahlung zu beantworten. Für Bauprodukte im Außenbereich müssen hauptsächlich Stofffreisetzungen durch Witterungseinflüsse betrachtet werden. Die europäische Bauproduktenrichtlinie und die europäische Bauproduktenverordnung, die ab 2013 in vollem Umfang Rechtsgültigkeit erlangen wird, adressieren den Schutz von Umwelt und Gesundheit in den wesentlichen Anforderungen an Bauprodukte (ER 3 bzw. BWR 3). In den harmonisierten europäischen Produktnormen der zweiten Generation muss die ökologische und hygienische Leistungsfähigkeit von Bauprodukten deklariert werden. Grundlage für eine derartige Deklaration sind europäisch har-

monisierte Prüf- und Bewertungsverfahren, die jedoch noch erarbeitet werden müssen. Daraus resultiert eine große Anzahl von Forschungsanstrengungen, die sich u. a. mit a) den Auswirkungen von Bauprodukten auf Gesundheit und Umwelt, b) der Optimierung der hygienischen und/oder ökologischen Eigenschaften und c) dem Ersatz bedenklicher Baustoffe durch solche mit besseren Eigenschaften befassen. Die Verringerung des Energieeinsatzes für die Herstellung von Bauprodukten stellt noch ein zusätzliches Forschungsfeld dar.

Maßgeblich getrieben werden diese Entwicklungen vom Fortschritt in der analytischen Chemie und in der instrumentellen Analytik. Sie erlaubt es, in der Anwendung robuste und trotzdem nachweisstarke Verfahren einzusetzen, mit denen potentiell bedenkliche und oftmals für die Produkteigenschaften nicht maßgebliche Inhaltsstoffe detektiert und quantifiziert werden können. So eröffnet sich über dieses Feld der Chemie die Möglichkeit, dass technologische Entwicklungsansätze abgeleitet werden können, die bereits durch geringfügige Änderungen der Rezeptur oder des Produktionsprozesses den Anteil an unerwünschten Begleitstoffen in den Bauprodukten verringern. Um diese gewünschten Verbesserungen zu erreichen, ist eine profunde Kenntnis von Stoffen, Rezepturen und Prozessen nötig. Die Chemie leistet somit einen wesentlichen Beitrag zur Entwicklung und zur Produktion hygienisch und ökologisch unbedenklicher und damit zukunftsfähiger Bauprodukte.

#### 4.9.4. Technisch-wissenschaftliche Herausforderungen

Ein Großteil des globalen Energie- und Ressourcenverbrauchs geht auf den Bau, den Betrieb, die Sanierung, den Rückbau und die Entsorgung von Gebäuden und Infrastrukturen zurück. Hier gilt es, aufgrund sich weiter verknappender Energie- und Rohstoffressourcen, die Stellschrauben anzusetzen und nach weiteren Einsparpotentialen in diesem Bereich zu forschen.

Die weltweit gewaltigen versiegelten Flächen sowie Dachflächen und Gebäudefassaden werden bisher kaum für weitere Zwecke wie z. B. Energiegewinnung und Begrünung genutzt. Dies gilt es zu ändern, um die zukünftigen Richtwerte des deutschen Energiemixes als auch des maximalen CO<sub>2</sub>-Ausstoßes einzuhalten. Insbesondere Industriebrachen (*engl. brownfields*), aber auch Dächer und Fassaden, gilt es zukünftig effektiv zur Energiegewinnung zu nutzen.

Eine weitere Herausforderung ist die Erhöhung der Widerstandfähigkeit gegen Schadstoffe oder korrosionsfördernde Stoffe, die Baustoffe angreifen, verschmutzen oder zersetzen. Besonders die Oberflächen von Bauwerken sind sich verändernden Klimabedingungen und sich häufenden extremen Wetterbedingungen ausgesetzt. Heutige Baumaterialien halten vielfach starken Belastungen noch nicht stand: Man denke z. B. an Bauten zur Energiegewinnung in schwer zugänglichen Gebieten mit rauen Klimabedingungen, z. B. Gezeitenkraftwerke, Offshore-Windkraftanlagen, Energiegewinnung in der Tiefsee und in Wüsten.

Des Weiteren gilt es zukünftig, rückbaufähige und voll recyclingfähige Bau- und Dämmstoffe zu entwickeln. Denn Baumaterialien wie Dämmstoffe oder Beläge werden derzeit möglichst fest mit dem Untergrund verbunden. Beim Abriss von Gebäuden beispielsweise kann das Gemisch nur schwer voneinander getrennt und recycelt werden und muss daher teuer und ressourcenzehrend entsorgt werden. Eine feste Verbindung der Dämmstoffe oder Beläge mit dem Untergrund bei gleichzeitig guter Trenn- und Recyclingfähigkeit im Falle des Rückbaus stellt damit eine der größten Herausforderungen in der Bauchemie dar.

Auch neue Formen des Wohnens und Arbeitens, u.a. getrieben durch den Megatrend Urbanisierung, sind für die Bauchemie eine Herausforderung, erfordern sie doch neue flexible Gebäudekonzepte und entsprechende Entwicklungen bei den Baustoffen. Bereits über 50 % der Menschen leben in Städten bzw. 65 Mega-Städten mit mehr als 5 Millionen Einwohnern. Hier bekommt nachhaltiges Bauen eine neue Dimension.

#### 4.9.5. Lösungsansätze, Verbesserungspotential

Als einer der wichtigsten Innovationsgeber für alle Baustoffe besitzt die Bauchemie einen maßgeblichen Einfluss zur Lösung oder zumindest Verbesserung dieser Herausforderungen.

Die allgemeinen Lösungsansätze sind nachfolgend beschrieben:

**Intelligente Materialien** sollten aktiv auf wechselnde Umgebungsbedingungen, wie bspw. Temperatur, Feuchtigkeit, Schadstoffbelastung etc. reagieren oder Risse, Feuchtigkeit oder Überlastung anzeigen. Dazu gehören auch Materialien für den Schutz und die Dauerhaftigkeit von Beschichtungen, insbesondere bei schwer zugänglichen Einsatzorten, z. B. im Bereich der Gewinnung erneuerbarer Energien (Gezeitenkraftwerke, Offshore-Windkraftanlagen, Biogasanlagen), in Abwasseranlagen, Fundamenten, Seekabeln und -leitungen etc.

**Neue Arbeits- und Lebensformen** wie Vertical Farming, Biomassekraftwerke oder die Null-Emissionsstadt erfordern eine höherwertige Nutzung von Baustoffen, bzw. eine **Multifunktionalität**, wodurch die Materialien einen zusätzlichen Mehrwert erhalten. Sie können zu aktivem Umweltschutz (z. B. Absorption von Schadstoffen) unter Ausnutzung der großen Oberflächen von funktionalisierten Baustoffen beitragen oder zur Energieübertragung sowie Wärme- und Stromspeicherung genutzt werden. Des Weiteren besteht Verbesserungspotential in der Entwicklung emissionsarmer Baustoffe, durch die der Eintrag von Schadstoffen in die Umwelt minimiert wird.

Eine konsequente **Lebenszyklusbetrachtung von Materialien, Gebäuden und Infrastruktur** führt zu recyclingfähigen Materialien zur Wärmedämmung, Beschichtung etc., die eine teure Entsorgung ersparen und mehrfach eingesetzt werden können und z. B. die Entwicklung von Baustoffen für eine einfache Rückbaubarkeit ermöglichen und so eine Entsorgung gemischter Materialien unnötig machen. Solche **energie- und ressourcenschonenden Materialien** tragen auch zu einem geringeren Energie- und Wasserverbrauch bei. Viel Potential besitzen zudem Hochleistungsbaustoffe, die ein materialsparendes Bauen ermöglichen (gleiche Stabilität bei weniger Rohstoffeinsatz und geringerem Primärenergieverbrauch), und die Entwicklung von Baustoffen, insbesondere Massebaustoffen, zur Wärme- und Energiespeicherung. Hochleistungsdämmstoffe sollten einen hohen Isolationsgrad bei niedrigen Wandstärken, einfacher Konstruktion (integrierte Systeme) und hoher Lebensqualität erlauben. Auch die Entwicklung verbesserter Gläser sollte weiter verfolgt werden.



Die Aluminosilikat-Bausteine des Fugenmörtels bilden nach dem Ausfugen eine widerstandsfähige und wasserliebende Oberfläche, die Säuren und Schmutz widersteht.  
(© Pressefoto BASF)

Zu all den beschriebenen Lösungsansätzen und Verbesserungspotentialen können besonders **neue Herstellverfahren und Produktionsweisen** beitragen, wie bspw. Bionik und Biomimetik, Nanotechnologie, energieeffiziente Produktionstechnologien und die Entwicklung von Technologien zur wirtschaftlichen Trennung und Rückführung von Stoffen aus dem Rückbau.

#### 4.9.6. Forschungsbedarf

Aus den zuvor beschriebenen Lösungsansätzen für die aktuellen und zukünftigen Herausforderungen ergibt sich für die Bauchemie ein großer Zukunftsmarkt. Um diesen bedienen zu können, besteht jedoch auch noch ein erheblicher Forschungsbedarf, der nachfolgend konkretisiert werden soll.

Im Bereich **Energie- und Ressourcenschonung** besteht ein Forschungsbedarf in der weiteren Optimierung der Wärmedämmung, des Klimamanagements und der direkten Gewinnung von Wärme mit Hilfe von Baustoffen. Eine bessere Nutzung des Energiegehaltes traditioneller Bindemittel wäre beispielsweise durch eine gezielte Forschung auf den Gebieten der Mahlhilfsmittel, der aktivierenden/beschleunigenden Zusätzen zur Nutzung energiesparender Bindemittel und der gezielten Beeinflussung des Wachstums von Hydratphasen durch „crystal-engineering“, sowie der verbesserten Nutzung von Ton und Lehm möglich. Hierbei kann die bestehende Infrastruktur weiter genutzt werden, wodurch eine schnelle Übertragung in den großtechnischen Maßstab gewährleistet wird.

Um den **Umweltschutz** und die Auswirkung von Bauprodukten auf den Menschen zu verbessern, sind beispielsweise bessere Methoden zum praxisgerechten Nachweis der potentiellen Freisetzung und Ausbreitung von Schadstoffen aus Baustoffen zu entwickeln. Mit diesen können die Auswirkungen auf das Wasser, die Luft und den Boden nachgewiesen werden, um dadurch Bauprodukte nach den künftigen EU-Normen auf ihre ökologische und hygienische Leistungsfähigkeit hin deklarieren zu können. Auch der Abbau von Luftschadstoffen durch Photokatalyse und die Fixierung von Schadstoffen durch Bauprodukte tragen zum Umweltschutz bei, bedürfen jedoch ebenfalls noch einer weitergehenden Erforschung.

**Intelligente Materialien** weisen für zukünftige Produkte ein großes Marktpotential auf. Bei ihnen besteht Forschungsbedarf bei Materialien mit kontrollierter Wirkstofffreisetzung, bei Materialien oder integrativen Systemen, die aktiv eine drohende Überlastung oder das Ende der Gebrauchsfähigkeit anzeigen (Risse, Undichtigkeiten, Eindringen von Schadstoffen, überhöhte Abnutzung), bei selbstheilenden Baustoffen und Beschichtungen, die sich eigenständig abdichten, oder bei Additiven, die korrosionsfördernde Stoffe wie Chloride, Sulfate oder Säuren binden oder Abwehrstoffe freisetzen. Entscheidend für die Entwicklung und Einführung solcher Materialien kann die Forschung auf dem Gebiet der gezielten Verkapselung von Wirkstoffen angesehen werden, wobei die Verfahren und Produkte auf die großen Stoffströme im Bereich der Baustoffe angepasst werden müssen.

Bei der **Lebenszyklusbetrachtung von Materialien** steht bei der Entwicklung von Produkten auch die parallele Entwicklung von Rückbau- und Recyclingverfahren im Vordergrund. Dabei kann die Kennzeichnung aller verbauten Produkte unabhängig von getrennt aufbewahrten Dokumenten, z. B. durch verbesserte RFID-Chips (ohne kritische Rohstoffe) eine Basis für das spätere Separieren der Materialien für ein hochwertiges Recycling bieten. Forschungsbedarf besteht auch beim reversiblen Fügen und Trennen von Verbindungen „auf Knopfdruck“, um so das Recycling zu erleichtern oder auch erst zu ermöglichen.

**Neue Arbeits- und Lebensformen**, wie das Vertical Farming, bieten Forschungspotentiale für die **multifunktionale Nutzung von Oberflächen**. Dazu gehört u.a. die Entwicklung von Baustoffen für das Vertical Farming, wie bspw. naturfaserbasierte Geotextilien mit integrierter Nährstoffversorgung. Ebenso müssen Anstrengungen im Bereich der gezielten Ansiedlung von Pflanzen oder Biofilmen auf Fassaden, z. B. zur Luftreinigung durch Zersetzen oder Binden von Schadstoffen, oder „probiotische Biofilme“ als Schutz vor schädigenden Pflanzen oder Biofilmen wie Grün- oder Braunalgen unternommen werden. Um solche Nutzungen zu ermöglichen, muss interdisziplinär an neuen Materialien geforscht werden.



Die Entwicklung von Substitutionsmaterialien und hocheffizienter, wirtschaftlicher Recyclingverfahren besitzt enormes ökonomisches und ökologisches Potential.

## 5. Rohstoffsicherung durch Recycling und effiziente Kreislaufwirtschaft

Der wirtschaftliche Erfolg Deutschlands beruht in erster Linie auf der Herstellung und dem Export von Hochtechnologie, insbesondere im Bereich des Maschinen- und Anlagenbaus sowie der chemischen Industrie. Notwendige Voraussetzung hierfür ist die gesicherte Verfügbarkeit von Roh- bzw. Grundstoffen, die innerhalb komplexer Prozessketten zu Konsum- und Produktionsgütern mit hoher Wertschöpfung veredelt werden. Da Deutschland nur über wenige primäre Rohstoffe verfügt, die nicht bzw. nicht mehr ökonomisch und ökologisch sinnvoll abgebaut werden können, hängt die Wirtschaftsleistung unseres Landes entscheidend von Rohstoffimporten ab. Es ist abzu-sehen, dass sich die Situation in Zukunft durch den weltweit stark steigenden Rohstoffbedarf in Entwicklungs- und Schwellenländern deutlich verschärfen wird. Es könnte zu Engpässen kommen, die die Einführung von neuen Technologien und die Entwicklung konkurrenzfähiger Produkte, wie zum Beispiel auf dem Gebiet der Elektromobilität, erschweren könnten.

Es zeichnet sich zudem schon jetzt ab, dass immer kostspieligere und energieintensivere Verfahren benötigt werden, um an die natürlichen Vorkommen zu gelangen. Daher ist das Recycling nicht nur aus ökonomischer, sondern auch aus ökologischer Sicht ein wichtiges Element, das einen festen Platz in den Lebenszyklen moderner Produkte einnehmen muss und letztlich für echte Nachhaltigkeit sorgen wird.

Darüber hinaus kann der Export neuer Recyclingtechnologien für Deutschland zu einem wichtigen Wirtschaftsfaktor werden.

### 5.1. Stand der Technik

Man unterscheidet unterschiedlichste Abfälle:

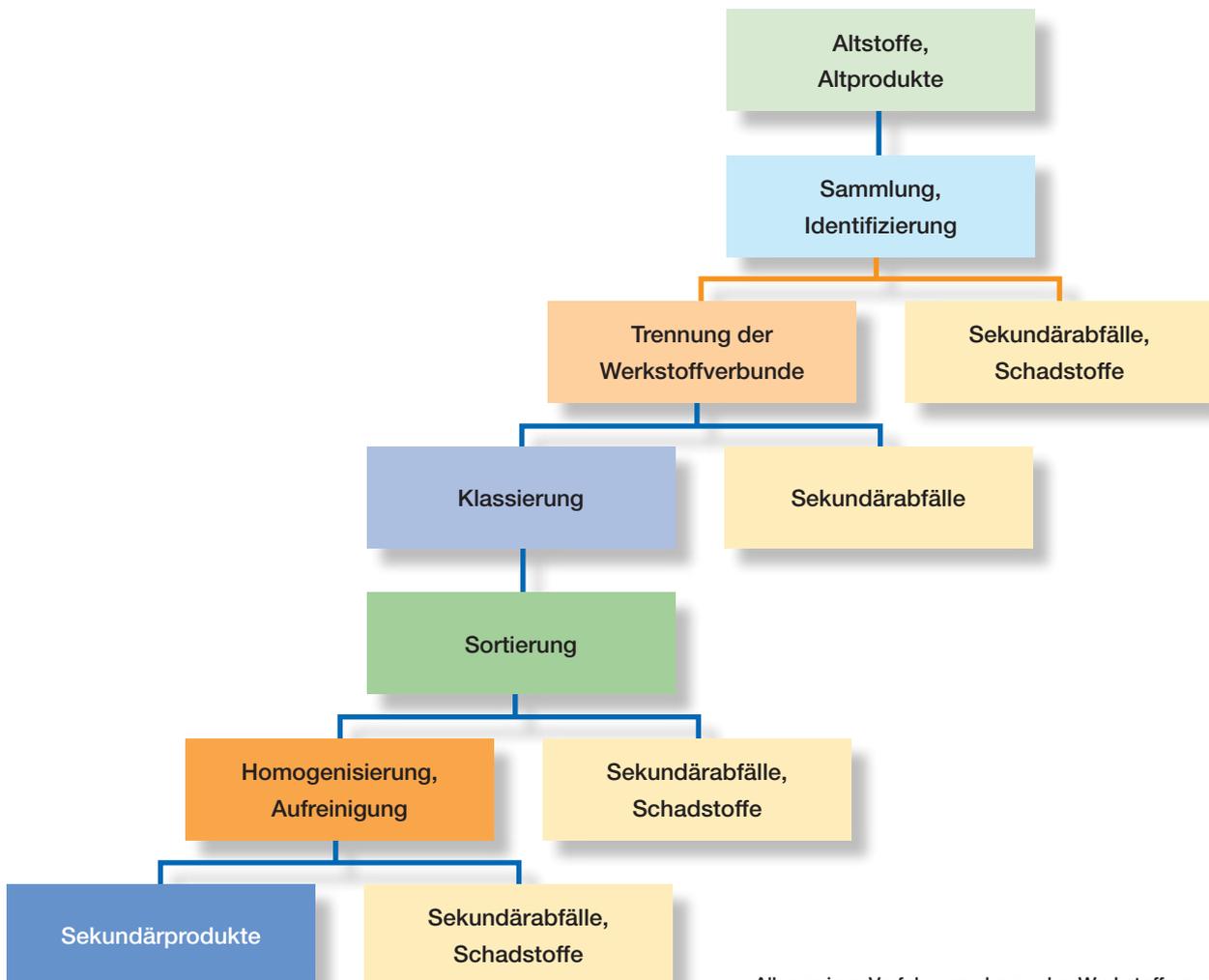
- » Werkstoffabfälle in kompakter Form, wie z. B. Rohre, Bleche, Profile, Gussstücke, Platten, Verbindungselemente.
- » leicht verformbare und sehr feinteilige Abfälle, wie z. B. Gummi, Folien, Papier, Faserstoffe, Späne und Schleifschlämme.
- » Altprodukte und Altgeräte, wie z. B. Autos, Maschinen, elektrische Geräte, etc., die aus unterschiedlichen Bauteilen zusammengesetzt sind und wiederum verschiedene Werkstoffe enthalten.

Um die Abfälle möglichst selektiv und kostengünstig in einzelne lukrative Fraktionen unterschiedlicher Materialien aufzutrennen, müssen verschiedene Aufbereitungsschritte durchlaufen werden, die einem allgemeinen Verfahrensschema gehorchen (siehe Grafik).

Der erste Schritt eines Recyclingprozesses ist die Sammlung anfallender Abfälle. Dabei erfolgt eine erste visuelle Identifizierung des Werkstofftyps sowie eine grobe Trennung in leicht zu unterscheidende Werkstoffklassen (Papier, Kunststoffe, Metalle, usw.).

Liegen komplexere Altprodukte vor, können ihre Bestandteile oft erst nach vorausgegangenen Demontagen oder Trennoperationen identifiziert werden, da sie aus verschiedenen Werkstoffen und Werkstücken bestehen und mit unterschiedlichen Techniken (Schraub-, Schweiß-, Niet-, Klebverbindungen, usw.) miteinander verbunden sind. Hinzu kommen oftmals Beschichtungen und Verbundwerkstoffe, bei denen Werkstoffverbindungen bzw. -verbunde gelöst werden müssen.

Die Auftrennung und Zerkleinerung von Werkstoffverbindungen erfolgt durch Demontage, Zerschneiden, Brechen oder Mahlen. Beschichtungen werden meist chemisch abgelöst oder abgeschmolzen. Eine Auftrennung von Verbundwerkstoffen in ihre Einzelbestandteile ist hingegen sehr kompliziert und kostspielig und erschwert die vollständige Auftrennung und Sortierung der Werkstoffe.



Allgemeines Verfahrensschema des Werkstoffrecyclings

Bei der Sortierung werden die unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften der Stoffe ausgenutzt. Die wesentlichen Sortierverfahren sind Dichtesortieren, Magnetscheiden, Elektrosortieren und Wirbelstromsortieren. Diese Verfahren setzen bestimmte Stückgrößen und auch Stückformen voraus. Dazu müssen die Zerkleinerungsprozesse auf die Sortierprozesse entsprechend abgestimmt und ggf. durch Klassierungsprozesse ergänzt werden. Neben den verschiedenen Werkstofffraktionen werden ggf. auch Schadstoffe abgetrennt (Bleiverbindungen, chlorierte organische Verbindungen, Öle, Lösungsmittel, usw.), um sie zum Schutz der Gesundheit aus dem weiteren Verarbeitungsprozess herauszuhalten.

Die getrennten Fraktionen werden zur Qualitätsverbesserung der angestrebten Zielfraktionen zunächst homogenisiert und anschließend von Verunreinigungen befreit. Die Abtrennung von Verunreinigungen wird je nach Werkstofftyp durch Filtration, Verdampfung, Ausfällung, chemische oder elektrochemische Reaktionen in vielen Fällen bereits heute sehr effektiv durchgeführt. Die gereinigten Fraktionen werden abschließend in vermarktungsfähige Recyclingprodukte wie Metallblöcke, Metallpulver, Kunststoffgranulate, Salze oder Flüssigkeiten überführt.

## 5.2. Relevanz

Technologischer Fortschritt lässt die Produkte rohstoffvielfältiger werden. An Beispielen des täglichen Lebens soll nachfolgend auf die Rohstoffproblematik eingegangen werden. Der Schwerpunkt liegt dabei nicht auf Massenrohstoffen wie Eisen, Stahl oder Chrom, sondern auf Materialien, deren Vorkommen als allgemein kritisch eingestuft wird, und die für die verarbeitende Industrie von großer Wichtigkeit sind. Eine detaillierte Analyse des Rohstoffbedarfs von Zukunftstechnologien findet sich u. a. in einer Studie der Fraunhofer-Institute ISI und IZT.<sup>23</sup>

### Informations- und Kommunikationstechnik (IKT)

Stellvertretend für den Bereich IKT bieten sich Mobiltelefone und Laptops an. Sie bestehen im Wesentlichen aus einem Gehäuse, mehreren Platinen (printed circuit boards, PCB) bestückt mit verschiedensten elektronischen Bauteilen sowie Displays und Batterien. Lässt man die Batterien außen vor, entfällt bei einem Mobiltelefon aus dem Jahr 1999 der größte Massenanteil mit über 50 % auf die Werkstoffgruppe der Kunststoffe, gefolgt von Kupfer, Eisen und Glas.<sup>24</sup> Die Edelmetalle Gold, Silber und Palladium erreichen zusammen zwar nur einen Massenanteil im einstelligen Promillebereich, machen aber 93 % des Schrottwertes aus.<sup>25</sup>

Das heutige Recycling konzentriert sich vor allem auf die Rückgewinnung der Edelmetalle. Der aktuelle Stand der Technik sind pyrometallurgische Verfahren, bei denen die brennbaren Bestandteile zur Energiegewinnung und als Reduziermittel genutzt und die Schadstoffe aus den Abgasen gefiltert bzw. in den Schlacken gebunden werden.<sup>26</sup> Die mit Kupfer legierten Edelmetalle werden anschließend hydro- oder elektrometallurgisch getrennt und gereinigt. Sondermetalle wie Indium, Tellur oder Selen werden außerdem aus den bleihaltigen Schlacken gewonnen.<sup>27</sup> Es existiert ein prinzipieller Zielkonflikt zwischen Reinheit und Ausbeute an Edelmetallen, so dass durch die Kombination von manuellen und mechanischen Vorbehandlungsstufen ein optimaler Kompromiss gefunden werden muss.<sup>28</sup>

23 Angerer, Gerhard; Erdmann, Lorenz; Marscheider-Weidemann, Frank; Scharp, Michael; Lüllmann, Arne; Handke, Volker; Marwede, Max (2009): Rohstoffe für Zukunftstechnologien. Einfluss des branchenspezifischen Rohstoffbedarfs in rohstoffintensiven Zukunftstechnologien auf die zukünftige Rohstoffnachfrage. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verl.

24 Huisman, Jaco (2004): QWERTY and Eco-Efficiency analysis on cellular phone treatment in Sweden. The eco-efficiency of the direct smelter route versus mandatory disassembly of Printed Circuit Boards.

25 Hagelüken, Christian (2006): Improving metal returns and eco-efficiency in electronics recycling. A holistic approach for interface optimisation between pre-processing and integrated metals smelting and refining. In: Proceedings of the 2006 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment.

26 Hagelüken, Christian (2006b): Recycling of Electronic Scrap at Umicore's Integrated Metals Smelter and Refinery. In: World of Metallurgy - ERZMETALL 59 (3), S. 152-161.

27 United Nations Environment Programme (UNEP) (Hg.) (2009): Recycling - From E-waste To Resources.

28 Meskers, Christina E. M.; Hagelüken, Christian; Salhofer, Stefan; Spitzbart, Markus (2009): Impact of pre-processing routes on precious metal recovery from PCs. In: Jens Harre (Hg.): European Metallurgical Conference EMC 2009. June 28 - July 1, Innsbruck, Austria : proceedings. Clausthal-Zellerfeld: GDMB

In der Diskussion steht – neben der Optimierung der genannten Verfahren – auch die Anwendung der sogenannten Bio(hydro)metallurgie<sup>29</sup>, die über den Bereich der IKT hinaus eine interessante Alternative darstellt. Dazu gehört die Biolaugung (Bioleaching) durch Eisen- und Schwefelbakterien, die seit Jahrzehnten zur Aufbereitung von geringhaltigen Kupfererzen benutzt wird. Biosorption (passiv) und Bioakkumulation (aktiv) sind weitere Verfahren zur Konzentrierung von Metallen an Biomasse bzw. in Mikroorganismen<sup>30</sup>. Sie könnten die etablierten Prozesse ergänzen, z. B. bei der Verarbeitung von Feinkorn- und Staubfraktionen aus der mechanischen Aufbereitung, und so die Metallausbeuten steigern.

### Elektronische Altgeräte

Der wachsende Einsatz von Haushaltsgeräten mit elektrischen und elektronischen Bauteilen und die steigende Ausstattung von Gewerbe und Haushalten mit Mess- und Steuergeräten sowie Informationstechnik häufen Berge von defekten und ausgesonderten Altgeräten an, die einerseits ein umweltbelastendes Schadstoffpotential bedeuten. Andererseits stellen sie aber ein vielfältiges Wertstoffreservoir an Metallen und Kunststoffen dar, das sich zu sammeln, zu verwerten oder sachgerecht zu beseitigen lohnt, um eine mögliche Verbrennung oder Deponierung zu vermeiden.

Altgeräte enthalten im allgemeinen Schadstoffe wie z. B.:

- » Quecksilber in Schaltern, Leuchtstoffröhren, Batterien und Hintergrundbeleuchtung von LCDs
- » Blei und Cadmium in Akkumulatoren und im Bildschirmglas
- » Chromverbindungen
- » Demgegenüber stehen folgende anorganische Wertstoffe:
- » Stahl in Gehäusen und Funktionsteilen (Waschmaschinen, Kühlschränke, Elektrowerkzeuge)
- » Aluminium in Chassis und Kühlelementen
- » Gold, Palladium und Silber in Kontakten, Bonddrähten und Batterien
- » Zinn, Blei, Silber und Wismut in Loten
- » Zink, Nickel, Kobalt und Mangan in Batterien
- » Tantal in Kondensatoren
- » Indium in LCD-Bildschirmen, Handys, LEDs und Dünnschichtsolarzellen
- » Ruthenium in Festplattenlaufwerken
- » Seltene Erden in Leuchtstoffen und Batterien

### Elektromobilität

Die flächendeckende Umsetzung elektrischer Antriebskonzepte erfordert die Erzeugung, Speicherung und Umwandlung von elektrischer Energie. Dazu werden Generatoren, Batterien und Elektromotoren benötigt, die für den mobilen Einsatz ausgelegt und in hoher Stückzahl verfügbar sein müssen.

Unverzichtbar für die Stromerzeugung und -wandlung sind Permanentmagnete mit hoher Koerzitivfeldstärke und Remanenz. Das gleiche gilt für die Miniaturisierung von elektronischen Geräten aus dem Bereich IKT<sup>31</sup>. Spitzenreiter

29 Cui, Jirang; Zhang, Lifeng (2008): Metallurgical recovery of metals from electronic waste: A review. In: J HAZARD MATER 158, S. 228–256.

30 Velasquez, Lina; Dussan, Jenny (2009): Biosorption and bioaccumulation of heavy metals on dead and living biomass of *Bacillus sphaericus*. In: J HAZARD MATER 167 (1-3), S. 713–716.

Vijayaraghavan, K.; Yun, Yeoung-Sang (2008): Bacterial biosorbents and biosorption. In: BIOTECHNOL ADV 26 (3), S. 266–291.

31 Du, Xiaoyue; Graedel, T. E. (2011): Global Rare Earth In-Use Stocks in NdFeB Permanent Magnets. In: J IND ECOL 15 (6), S. 836–843.

ist zurzeit eine Neodym-Eisen-Bor-Legierung mit der Zusammensetzung  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ . Parallel werden aufgrund der besseren Temperatur- und Korrosionseigenschaften auch die etwas schwächeren Samarium-Kobalt-Legierungen  $\text{SmCo}_5$  und  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$  weiter verwendet. Der steigenden Nachfrage dieser Legierungen steht eine extrem niedrige Recyclingquote von Metallen der Seltenen Erden gegenüber, die in einer aktuellen Studie auf unter 1 % geschätzt wird.<sup>32</sup>

Vergleichbar relevant ist der Einsatz von Permanentmagneten mit weiteren Seltenerdmetallen wie bspw. Dysprosium. Nach einer Studie<sup>33</sup> des Fraunhofer ISI und des IZT von 2009 wird der Bedarf an Neodym für ein Hybridfahrzeug auf 0,5 bis 1 kg geschätzt. Das bedeutet, dass bei zunehmender Nutzung dieser Technologien die Nachfrage nach Neodym in den nächsten Jahren auf einige zehntausend Tonnen steigen wird.

Durch ihr vorteilhaftes Verhältnis von Energiedichte zu Gewicht sind Lithium-Ionen-Akkumulatoren für Elektrofahrzeuge prädestiniert. Zurzeit sind mehrere Systeme in der Entwicklung, die sich durch verschiedene Anoden- und Kathodenmaterialien und Elektrolyte unterscheiden. Die heute verwendeten Typen enthalten auf der Kathodenseite überwiegend Lithium-Metalloxide mit Anteilen von Kobalt, Nickel und Mangan. Das Recycling dieser Akkumulatoren konzentriert sich momentan noch auf die Rückgewinnung von Kobalt, Nickel und Kupfer mit Hilfe metallurgischer Verfahren, wie für PCBs im Abschnitt „Informations- und Kommunikationstechnik (IKT)“ prinzipiell beschrieben. Bei der Entwicklung neuer Recyclingverfahren ist auch Lithium als universeller Bestandteil von hohem Interesse.

### 5.3. Technisch-wissenschaftliche Herausforderungen

Aus den genannten Beispielen ergibt sich ein breiter Forschungsbedarf auf den Gebieten der organischen Chemie (Kunststoffe, Leichtbau- und Verbundmaterialien), der Festkörperchemie (anorganische Werkstoffe, Leichtbau- und Verbundmaterialien) und der technischen Chemie (Verfahrenstechnik). Besonders wichtig ist hierbei ein intensiver interdisziplinärer Austausch, um rechtzeitig den Bedarf an neuen Recyclingtechnologien zu identifizieren bzw. die Materialentwicklung in eine recyclinggerechte Richtung lenken zu können. Besondere Herausforderungen ergeben sich durch die ständig steigende Komplexität auf Werkstoff- und Bauteilebene (Mikro- und Nanostrukturierung). Moderne Hochleistungswerkstoffe bestehen aus einer Vielzahl chemischer Elemente, die zum Teil nur in sehr geringen Konzentrationen und fein verteilt (dissipativ) eingesetzt werden, aber maßgeblich für den Recyclingwert sind. Lamine, dünne Schichten, Fasern und Partikel erschweren zusätzlich eine saubere Trennung der Materialien.

In vielen elektronischen Geräten liegen die Wertstoffe in so geringen Konzentrationen vor, dass sich eine alleinige Rückgewinnung wirtschaftlich nicht rentabel darstellen lässt. Neben dem Bestreben, nahezu alle Werkstoffgruppen eines Gerätes einer Wiederverwendung bzw. -verwertung zuzuführen, erscheint es sinnvoll, Wertstoffe nicht als reines Element, sondern in Form von bestehenden Verbindungen oder Bauteilkomponenten zurückzugewinnen. Dadurch könnten im Bereich der Aufreinigung teure und abfallintensive Schritte eingespart werden. Die Komponenten sind anschließend so aufzubereiten, dass sie ihrer Bestimmung gemäß wieder eingesetzt werden können.

Eine weitere Herausforderung liegt in der Aufarbeitung von Verbundwerkstoffen. Hierzu gehören auch die in letzter Zeit im Leichtbau immer beliebter werdenden Hybridwerkstoffe. Nach dem derzeitigen Stand der Technik besteht der Recyclingprozess zumeist aus nasschemischem Ablösen mit anschließendem Filtrationsschritt (Schichtverbundwerkstoffe) sowie einem Zerkleinerungsschritt mit nachfolgender Filtration in der Schmelze (Partikelverbundwerkstoffe Metall-Kunststoff). Um bessere Qualitäten der einzelnen Fraktionen zu erzielen, sollte die Aufbereitung

<sup>32</sup> Graedel, T. E.; Allwood, Julian; Birat, Jean-Pierre; Buchert, Matthias; Hagelueken, Christian; Reck, Barbara K. et al. (2011): What Do We Know About Metal Recycling Rates? In: J IND ECOL 15, S. 355–366.

<sup>33</sup> Angerer, G., Erdmann, L., Marscheider-Weidemann, F., Scharp, M., Lüllmann, A., Handke, V., Marwede, M. (2009) Rohstoffe für Zukunftstechnologien, Fraunhofer ISI und IZT gGmbH, S. 38

soweit wie möglich trocken gestaltet werden, so wird eine schärfere Trennung zwischen Matrix und Füllstoff bzw. zwischen den vorliegenden Schichten herbeigeführt. Hier bestehen insbesondere im Bereich der chemischen Verfahrenstechnik noch wesentliche Herausforderungen.

Ein weiterer Fokus liegt bei der Einsparung von Energie und Ressourcen, denn hier lassen sich weitere Kosten reduzieren und die Belastung der Umwelt in Grenzen halten. Ziel ist es daher, Verfahren zu entwickeln und großtechnisch zu etablieren, die einen geringen Energieverbrauch bei gleichzeitig hohen Durchsätzen von einigen Tonnen pro Stunde realisieren können. Hierzu sollte angestrebt werden, Hilfsstoffe (Flüssigkeiten, Gase, usw.) zu vermeiden oder zumindest im Kreislauf zu führen und diese somit einer mehrfachen Verwendung im Prozess zuzuführen.

#### 5.4. Forschungsbedarf

Obwohl das Recycling von Werk- und Wertstoffen in Deutschland bereits weit entwickelt ist, besteht auf allen Ebenen Optimierungsbedarf und Innovationspotential. Denn das bereits heute bestehende ökonomische und ökologische Potential wird noch nicht ausreichend verstanden und effektiv genutzt. Im Sinne eines ganzheitlichen Ansatzes muss das Recycling bereits im Entwicklungsstadium zukünftiger Produkte beginnen, wobei nicht nur die Konstruktion, sondern auch die Materialauswahl und Materialkonzentrationen im Hinblick auf ein effizientes Recycling zu optimieren sind. Es müssen ganzheitliche, industrieübergreifende Konzepte erarbeitet werden, um die wertvollen Rohstoffe weitestgehend im Wirtschaftskreislauf zu halten.

Betrachtet man die gesamte Prozesskette vom Rohstoff bis zum Produkt, die durch geeignetes Recycling zu einem möglichst vollständigen Kreislauf geschlossen werden soll, lassen sich folgende grundlegende Ansatzpunkte identifizieren:

- » Systematische Erfassung der Wertstoffströme durch Material- bzw. Stoffflussanalyse
- » (Bestimmung des Ist-Zustands, Ableitung des Handlungsbedarfs)
- » Effizienzsteigerung durch optimierte Kombination bestehender Verfahren(Prozessanalyse)
- » Berücksichtigung der Recyclingeigenschaften beim Material- und Produktdesign (Demontierbarkeit, Sollbruchstellen, Schadstofffreiheit)
- » Entwicklung neuer Technologien für zukünftig zu recycelnde Werkstoffe (z. B. Funktionswerkstoffe für Energie- und Elektronikanwendungen, Konstruktionswerkstoffe aus den Bereichen der Leichtbau- und Verbundmaterialien)

Im Speziellen besteht Bedarf an

- » Ausbau und Neugestaltung von Sammelsystemen vornehmlich für Produkte aus dem Konsumentenbereich
- » Entwicklung von Verfahren, die gewünschte Wertstoffe gezielt aus einem Werkstoffgemisch selektiv herauslösen
- » Ausbau „trockener“ Aufbereitungsverfahren zur selektiven Trennung einzelner Wertstofffraktionen
- » Weiterentwicklung des Recyclings von Verbundwerkstoffen mit dem Schwerpunkt eines Wiedereinsatzes bei der Herstellung von Neumaterial
- » Auslegung von Verfahren mit einstufiger chemischer Endbehandlung der zuvor „trocken“ sortierten Wertstofffraktionen

Darüber hinaus werden die Substitution kritischer Wertstoffe sowie die Erarbeitung langfristig sinnvoller Strategien über den Umgang mit weltweit verfügbaren Rohstoffressourcen klare Aufgabenstellungen an Forschung und Politik formulieren.

## 6. Liste der Autoren

Prof. Dr. Barbara Albert	Technische Universität Darmstadt
Dr. Florian Ausfelder	DBG – Deutsche Bunsen-Gesellschaft für Physikalische Chemie e.V., Frankfurt/Main
Dr.-Ing. Nazlim Bagcivan	RWTH Aachen
Prof. Dr.-Ing. Kirsten Bobzin	RWTH Aachen
Thilo Brämer	Fraunhofer ISC, Würzburg
Dr. Klaus Breuer	Fraunhofer IBP, Holzkirchen
Dr.-Ing. Jean-Francois Drillet	DECHEMA-Forschungsinstitut, Frankfurt/Main
Prof. Dr. Michael Dröscher	GDCh – Gesellschaft Deutscher Chemiker e.V., Frankfurt/Main
Dr. Ursula Eul	Fraunhofer LBF, Darmstadt
Dr. Thorsten Enz	Fraunhofer ISC, Würzburg
Prof. Dr. H.-P. Fink	Fraunhofer IAP, Potsdam-Golm
Dr.-Ing. Frank O.R. Fischer	DGM – Deutsche Gesellschaft für Materialkunde e.V., Frankfurt/Main
Dr. Andreas Förster	DECHEMA e.V., Frankfurt/Main
Priv.-Doz. Dr.-Ing. Wolfram Fürbeth	DECHEMA-Forschungsinstitut, Frankfurt/Main
Dr. Carsten Gellermann	Fraunhofer ISC, Würzburg
Prof. Dr.-Ing. Thomas Gries	RWTH Aachen
Priv.-Doz. Dr. Andreas Hartwig	Fraunhofer IFAM, Bremen
Dr. Gerhard Hörpel	Westfälische Wilhelms-Universität Münster
Prof. Dr. Dieter Hofmann	Fraunhofer IAP, Potsdam-Golm
Prof. Dr. Jürgen Janek	Justus-Liebig-Universität Gießen
Dipl.-Kfm. Klemens Joachim	DGM – Deutsche Gesellschaft für Materialkunde e.V., Frankfurt/Main
Dipl.-Ing. Josef Klingele	RWTH Aachen
Prof. Dr. Wolfram Koch	GDCh – Gesellschaft Deutscher Chemiker e.V., Frankfurt/Main
Dr. Anne Köhnen	Universität zu Köln
Dr. Horst Krause	Fraunhofer ICT, Pfinztal
Prof. Dr. André Laschewsky	Fraunhofer IAP, Potsdam-Golm
Dr. Armin Leng	Merck KGaA, Darmstadt
Dr. Björn Mathes	DECHEMA e.V., Frankfurt/Main
Prof. Dr. Klaus Meerholz	Universität zu Köln
Dr. Kurt Osterloh	BAM – Bundesanstalt für Materialforschung und-prüfung, Berlin
Dr. Andreas Pfalzgraf	Landesamt für Verbraucherschutz Sachsen-Anhalt, Halle
Dr. Harald Pielartzik	Bayer MaterialScience AG, Leverkusen
Prof. Dr. Matthias Rehahn	Fraunhofer LBF, Darmstadt
Prof. Dr. Armin Reller	Universität Augsburg
Dr. Martin Reuter	VCI – Verband der Chemischen Industrie e.V., Frankfurt/Main
Dr. Dirk Röseling	Fraunhofer ICT, Pfinztal
Prof. Dr. Jürgen Rühle	Universität Freiburg
Dr.-Ing. Bernhard Schmenk	RWTH Aachen
Dr. Rüdiger Schütte	Evonik Industries AG, Hanau
Prof. Dr.-Ing. Michael Schütze	DECHEMA-Forschungsinstitut, Frankfurt/Main
Prof. Dr. Gerhard Sextl	Fraunhofer ISC, Würzburg
Prof. Dr. Dietmar A. Stephan	Technische Universität Berlin
Dr. Rainer Tamme	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Stuttgart
Dr. Thomas Track	DECHEMA e.V., Frankfurt/Main
Dr. Martin Weber	BASF SE, Ludwigshafen
Dr. Hans-Georg Weinig	GDCh – Gesellschaft Deutscher Chemiker e.V., Frankfurt/Main



DECHEMA

DGM

GDCh

GESELLSCHAFT  
DEUTSCHER CHEMIKER



VCI