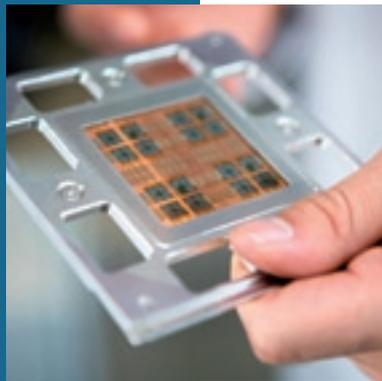


EIN BÜNDNIS FÜR DIE ZUKUNFT

# Von Brennstoffzellen bis Leuchtdioden

## Energie und Chemie – Ein Bündnis für die Zukunft



ENERGIE UND CHEMIE



Energie ist eine der elementarsten Ressourcen überhaupt: Mit genügend Energie können wir die meisten anderen Probleme der Menschheit lösen, etwa Meerwasser entsalzen, um der Wasserknappheit zu entgehen, durch die Herstellung von Düngemitteln die Produktivität von Böden erhöhen, um genügend Nahrungsmittel zu produzieren, oder sehr verdünnt vorkommende Rohstoffe so weit konzentrieren, dass sie nutzbar werden. Derzeit beruht unsere Zivilisation wesentlich auf fossilen Energiequellen, die leider endlich sind. Der Umgang mit Energie wird sich daher ändern müssen. Einerseits müssen wir bekannte Energiequellen besser nutzen und damit Energie einsparen, andererseits müssen wir neue Energiequellen erschließen. Diese große gesellschaftliche Aufgabe ist ohne Forschung und Innovation in der Chemie nicht zu meistern. Die Chemie liefert beispielsweise die Grundlage für moderne Kraftstoffe: Diese sind nur durch die komplexen chemischen Prozesse in Raffinerien zugänglich. Aber auch Biokraftstoffe sind auf chemische Umsetzungen angewiesen: So wird aus Rapsöl mit Hilfe einer chemischen Reaktion Biodiesel gewonnen, und neue Generationen von Biokraftstoffen sind noch stärker auf chemische Prozesse angewiesen. Auch Brennstoffzellen, die heute als Ersatz für konventionelle Verbrennungsmotoren in Autos erprobt und zum Teil bereits eingesetzt werden, sind ohne Chemie nicht denkbar.

Diese Informationsschrift präsentiert Anwendungsbereiche, in denen die Chemie zu einer effizienten Energiewirtschaft beiträgt. Fachleute stellen neueste Entwicklungen vor und erklären anschaulich, wie beispielsweise im Kraftverkehr mit Hilfe leichter Materialien massiv Energie eingespart oder durch organische Solarzellen das Sonnenlicht hocheffizient genutzt werden kann. Ebenso erörtern sie, wie wir mit Hilfe von Wasserstofftechnologie und Brennstoffzellen in Zukunft umweltschonender heizen oder Auto fahren können.

Neben diesen bereits umsetzbaren Verbesserungen zeigt die Broschüre auch künftige Lösungsoptionen für eine hochgradig effiziente Energienutzung auf, die unerlässlich sein wird, wenn wir auch in kommenden Jahrzehnten unseren Lebensstandard halten wollen.

Wir wollen Ihnen mit dieser Veröffentlichung einen interessanten und abwechslungsreichen Überblick über die vielfältigen Beiträge der Chemie zur Energiewirtschaft geben. Wir hoffen insbesondere, dass sich die eine oder andere Leserin, der eine oder andere Leser für die dargestellten Themen begeistert und vielleicht in der Zukunft selbst einmal an der Entwicklung neuer Lösungen arbeiten wird: Damit auch unsere Kinder und Enkel noch mit ausreichend Energie versorgt sind.

Bestimmt gewinnen Sie aus der Lektüre neue Erkenntnisse oder Anregungen. Ich wünsche Ihnen ein informatives Lesevergnügen!

Ihr



Prof. Dr. Ferdi Schüth  
Vorsitzender des Koordinierungskreises  
Chemische Energieforschung

**Die Menschheit wächst. Die Ressourcen werden knapp. Die Belastbarkeit der Ökosphäre erweist sich als begrenzt. Das ist kein Szenario, sondern faktische Bestandsaufnahme. Mit unseren heutigen Technologien lassen sich die kommenden Probleme nicht hinreichend lösen. Noch nie waren die Herausforderungen an Wissenschaft und Technik so groß und so dringlich, um Lebensgrundlagen und Lebensstandard nachhaltig zu sichern. Eine zentrale Rolle kommt dabei der Energie zu.**

Die Chemie liefert bereits unverzichtbare Beiträge für die Grundbedürfnisse der Menschen. Ernährung, Gesundheit, Kleidung, Wohnung, Mobilität und Kommunikation sind heute schon auf Produkte der Chemie angewiesen. In der Zukunft wird dieses noch stärker der Fall sein. Aber wie kann die Chemie zur Lösung des Energieproblems beitragen? Nur Eingeweihten ist bewusst, welche entscheidende Rolle die Chemie und Chemische Verfahrenstechnik bei der Energiegewinnung, der Energieumwandlung und -speicherung sowie insbesondere bei der effizienten Energienutzung und Einsparung spielen. Aber auch hier gilt, dass unsere Fähigkeiten und Möglichkeiten deutlich erweitert und verbessert werden müssen. Ja mehr noch, der Chemie wird bei der Lösung der anstehenden Energieprobleme eine noch größere Bedeutung zukommen.

Energie ist eine physikalische Größe. In der intensiven öffentlichen Diskussion ist daher wenig bekannt, wie wichtig Stoffumwandlungsprozesse und Materialien sind. So ist beispielsweise eine Batterie ein Energielieferant. Wer denkt schon daran, dass es sich um ein komplexes chemisches System auf höchstem Hightech-Niveau handelt? Solarenergie, Windkraftwerke und leichtere Autos: für alles werden Produkte der Chemie benötigt.

Dieses bewusst zu machen und aufzuzeigen, dass die Chemie wegen ihres Querschnittscharakters eine Schrittmacherfunktion besitzt und einen Innovationsmotor darstellt, ist ein wichtiges Anliegen der chemisch-technischen Gesellschaften und Verbände. Hierzulande entwickelte Lösungen zu diesen globalen Problemen werden auch der Wettbewerbsfähigkeit unseres Landes dienen.

In der Chemical Community werden die Energieprobleme intensiv diskutiert und offensiv bearbeitet. Auf vielen Forschungsfeldern gibt es Fortschritte, und es zeigt sich auch, wie viel noch zu tun ist.

Es gibt keinen Grund zum Pessimismus, aber wir haben Veranlassung, darauf hinzuweisen, dass eine steinige Wegstrecke vor uns liegt. Deshalb wurden Empfehlungen zu stärkerer Förderung ausgesprochen, und es wurden Forschungsschwerpunkte gebildet. Ein wichtiges Anliegen ist uns, die Komplexität des Themas aufzuzeigen und die Beiträge der Chemie deutlich zu machen. Deshalb haben wir uns entschlossen, diese Informationsschrift zu erstellen.

Wir wollen darin in verständlicher Form erläutern, was die Chemie für die Energieversorgung in der Zukunft leisten kann. Hierfür wurden ausgewiesene Fachleute auf ihren jeweiligen Gebieten angesprochen, um Ihnen, unseren Lesern, die Möglichkeiten der jeweiligen Technologien und deren Hintergründe wie Perspektiven näher zu bringen.

Jeder von uns kann in seinem Alltag helfen, den Energieverbrauch etwas zu minimieren. Die Energiesparlampe ist eines der bekanntesten Beispiele hierfür. Es gibt aber viele weitere Möglichkeiten, wie wir mit Hilfe innovativer Materialien und Technologien im Haushalt, bei der Arbeit und in unserer Freizeit Energie sparen

können. Das erste Kapitel „Energieverbrauch im Alltag“ beschreibt einige dieser Optionen und zeigt, dass Energieeffizienz zwar Fachleute braucht, aber jeden etwas angeht.

Eine Übersicht über verschiedene Möglichkeiten zur Energieerzeugung und -speicherung heute und in Zukunft geben die folgenden Kapitel. Werden wir unsere Energie über Solarzellen gewinnen oder aus Biomasse? Sind Batterien ein geeigneter Speicher, oder nutzen wir Wasserstoff als Energieträger? Eine abschließende Antwort auf diese Fragen kann es zwar nicht geben, aber die Informationsschrift stellt die verschiedenen Optionen anschaulich dar und liefert Denkanstöße.

Nicht nur in unserem Alltag, sondern vor allem auch in der Industrie spielen Energieeffizienz und Ressourcenschonung eine wichtige Rolle. Neue Technologien zur Optimierung von Prozessen und Produkten sind für die Zukunft und Wettbewerbsfähigkeit der chemischen Industrie essenziell. Einige Beispiele hierfür stellen wir Ihnen im letzten Kapitel „Neue Technologien für mehr Energieeffizienz“ vor.

Die Beiträge zeigen, dass wir in Deutschland eine sehr gute Ausgangsposition haben, um uns den Herausforderungen der Zukunft für den Bereich der Energieforschung zu stellen. Wir hoffen, dass wir mit dieser Schrift auch unsere Leser motivieren und für ein eigenes Engagement in diesem Bereich begeistern können.

Den Autorinnen und Autoren sind wir sehr dankbar für die viele Zeit und Arbeit, die sie investiert haben. Herrn Professor Quadbeck-Seeger, der die Erstellung der Broschüre mit seinem Rat unterstützt hat, danken wir sehr herzlich. Auch bei allen weiteren Beteiligten, die bei der Konzeption und an der Realisierung dieser Veröffentlichung mitgewirkt haben, bedanken wir uns.

Neben der Deutschen Bunsen-Gesellschaft haben sich die Gesellschaft Deutscher Chemiker, die DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie sowie der Verband der Chemischen Industrie an der Umsetzung der Idee beteiligt.



Prof. Dr. Katharina Kohse-Höinghaus  
Erste Vorsitzende der Deutschen Bunsen-Gesellschaft  
für Physikalische Chemie



Prof. Dr. Klaus Müllen  
Präsident der Gesellschaft Deutscher Chemiker



Dr. Alfred Oberholz  
Vorsitzender der DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik  
und Biotechnologie  
und Vorsitzender des Ausschusses Forschung, Wissenschaft  
und Bildung des Verbands der Chemischen Industrie

## ENERGIEVERBRAUCH IM ALLTAG

### SMART ENERGY HOME

<b>Energieeffizientes und gesundes Wohnen</b>	8
Von Elmar Keßenich	

### ORGANISCHE LEUCHTDIODEN

<b>Bunte Displays für die Westentasche</b>	12
Von Frank Voges	

### ORGANISCHE LEUCHTDIODEN

<b>Energiesparen beim Fernsehen</b>	15
Von Frank Voges	

### ENERGIEEFFIZIENZ IN DEUTSCHLAND

<b>Das Verhalten des Einzelnen zählt</b>	17
Von Hermann Pütter	

## ENERGIE FÜR DIE MOBILE GESELLSCHAFT

### LEICHTE WERKSTOFFE

<b>Textil im Fahrzeugbau</b>	21
Von Werner Hufenbach , Martin Lepper und Heiko Richter	

### LEICHTE WERKSTOFFE

<b>Sandwich aus Papier und Kunststoff</b>	23
Von Marcos Ramos Bosch, Reiner Paul, Detlef Mies und Stefanie Eiden	

### ENERGIESPEICHER

<b>Vom Froschschenkel zum Lithium-Ionen-Akku</b>	25
Von Jürgen Janek	

### ENERGIESPEICHER

<b>Lithium-Ionen-Batterien für Elektroautos</b>	28
Von Ernst-Robert Barenschee	

### WASSERSTOFFTECHNIK

<b>Maßgeschneiderte Speichermaterialien</b>	31
Von Michael Hirscher	

## METHODEN ZUR ENERGIEVERSORGUNG

### PHOTOVOLTAIK MIT SILIZIUM

<b>Vom Sand zur Solarzelle</b>	34
Von Christina Modes	

### ORGANISCHE PHOTOVOLTAIK

<b>Strom aus Plastik</b>	37
Von Klaus Griesar	

### SOLARZELLEN

<b>Es muss nicht immer Silizium sein</b>	40
Von Derck Schlettwein	

### THERMOELEKTRIK

<b>Wunderbare Wärmewandler</b>	43
Von Harald Böttner	

## METHODEN ZUR ENERGIEVERSORGUNG

### THERMISCHE ABFALLVERWERTUNG

<b>Energie aus Müll</b>	45
Von Marcell Peuckert	

### BRENNSTOFFZELLEN

<b>Energiegewinnung ohne Abgase</b>	48
Von Klaus Funke	

### VERBRENNUNGSFORSCHUNG

<b>Bald auf kleinerer Flamme?</b>	53
Von Katharina Kohse-Höinghaus	

## NACHWACHSENDE ROHSTOFFE

### REGENERATIVE KRAFTSTOFFE

<b>Biosprit vom Acker und aus dem Meer</b>	57
Von G. Herbert Vogel	

### REGENERATIVE KRAFTSTOFFE

<b>Wie „bio“ ist Biosprit?</b>	60
Von Hermann Pütter	

### BIOGAS

<b>Kraftstoff, Wärme und Strom aus dem Bioreaktor</b>	64
Von Peter Weiland	

### WEISSE BIOTECHNOLOGIE

<b>Mikroben in der Chemieindustrie</b>	68
Von Roland Ulber	

### BIORAFFINERIEN

<b>Chemiefabrik und Kraftwerk nach dem Vorbild der Natur</b>	71
Von Thomas Hirth, Walter Trösch und Steffen Rupp	

## NEUE TECHNOLOGIEN FÜR MEHR ENERGIEEFFIZIENZ

### WASSERSTOFFWIRTSCHAFT

<b>Noch viele offene Fragen</b>	73
Von Christian Sattler und Hermann Pütter	

### KATALYSE

<b>Sparsame Reaktionsbeschleuniger</b>	77
Von Hans-Joachim Freund	

### IONISCHE FLÜSSIGKEITEN

<b>Salzig, sicher und unglaublich vielfältig</b>	80
Von Michael Schmidt	

## LITERATURHINWEISE

83

## IMPRESSUM

86

Bessere Wärmedämmung, energiesparende Haushaltsgeräte, Leuchtdioden statt Glühbirnen – beim Hausbau und im Haushalt lässt sich noch eine Menge Energie sparen. Das Projekt Smart Energy Home will innovative Techniken in den Massenmarkt führen.



In diesem Niedrigenergiehaus im englischen Nottingham braucht man auch an heißen Tagen keine Klimaanlage, denn das Dach ist mit einem Lack beschichtet, der Wärme reflektiert und so für deutlich niedrigere Temperaturen sorgt.

(Bild: BASF)

## Energieeffizientes und gesundes Wohnen

Die Verknappung fossiler Rohstoffe, Klimaschutz, Importabhängigkeit im Energiesektor und der Wunsch nach stetigem Wirtschaftswachstum, um im globalen Wettbewerb nicht abgehängt zu werden – das sind die Herausforderungen, mit denen Europa in den nächsten Jahren konfrontiert sein wird. Die Verfügbarkeit ausreichender Energiemengen ist laut Richard E. Smalley, Chemie-Nobelpreisträger von 1996, das dringendste Problem der Menschheit in den nächsten 50 Jahren.

Das Smart Energy Home ist ein visionäres Projekt, initiiert von dem europäischen Verbund SusChem (European Platform for Sustainable Chemistry, [www.suschem.org](http://www.suschem.org)), der sich für eine

nachhaltige Chemie einsetzt. SusChem will die Gesellschaft in Europa und ihren Energieverbrauch beeinflussen und somit einen großen Beitrag zum Klimaschutz leisten. Einige der Techniken, die die Vision vom energieeffizienten, gesunden und komfortablen Wohnen umsetzen sollen, gibt es bereits, andere müssen erst noch entwickelt werden.

Verglichen mit Häusern in anderen Regionen der Welt zählen europäische Gebäude zu den energieeffizientesten. Kein Wunder, denn Europa ist weltweit führend bei neuen energieeffizienten Baumaterialien und alternativen Energiesystemen, bei Wärmeisolierung und intelligenter Steuerungstechnik im Wohnbereich. Europäische Unternehmen haben begonnen, neue Techniken in

Musterhäuser zu integrieren und daraus kommerziell erhältliche Produkte zu entwickeln. Trotz all dieser Erfolge gilt: Hinsichtlich Klimaschutz und Energieeffizienz werden die Produkte und Prozesse im privaten Alltag wie auch in der Industrie zukünftig noch höhere Ansprüche erfüllen müssen.

Energieeffiziente Gebäude wie Passivhäuser oder Gebäude mit Solaranlagen, die eine neutrale oder sogar positive Energiebilanz aufweisen, leisten einen wichtigen Beitrag zum Klimaschutz und schonen Ressourcen. Die Einsparpotenziale im gewerblichen und privaten Bereich sind hier enorm groß. Diese Stärken und das zur Verfügung stehende Wissen müssen gefördert werden. Denn nur wenn die Marktak-

zeptanz neuer, energieeffizienter Techniken beschleunigt wird, steigt die Nachfrage und die Massenproduktion lohnt sich. Und nur dann werden die innovativen Produkte kostengünstig und wettbewerbsfähig.

### Passivhaus als Standard

Energiesparen einerseits sowie komfortables und gesundes Wohnen andererseits sind unverzichtbare Teile des Konzepts von Smart Energy Home, das Ressourcen intelligent steuert und so nachhaltiges Wohnen und Arbeiten möglich macht.

Der wirtschaftlichste Hebel, um Energie zu sparen und Treibhausgase kosteneffizient zu vermeiden, ist die Ausstattung von Gebäuden mit einem schlüssigen System aus hocheffizienten Dämm-, Heizungs- und Lüftungskomponenten. Beim Neubau von Wohnungen sollte der Passivhausstandard nach Empfehlung einer aktuellen Studie der Unternehmensberatung McKinsey zur allgemeinen Norm werden. Und in vor 1979 erbauten Häusern könnte man den durchschnittlichen Energieverbrauch um etwa ein Drittel senken, wenn jedes Jahr drei Prozent des Bestandes entsprechend modernisiert

würden – aus wirtschaftlichen Gründen jeweils in Verbindung mit ohnehin anstehenden Instandsetzungen, die jährlich bei etwa drei Prozent der älteren Häuser fällig sind.

Niedrigenergie- und Passivhäuser sind in den vergangenen 20 Jahren marktreif geworden. Im Neubau sind sie heute kaum teurer als entsprechende Gebäude in traditioneller Bauweise – und trotzdem haben sie sich auf dem deutschen Markt bislang nicht durchgesetzt. Bei Bestandsbauten werden energieeffiziente Systeme, Produkte und Verfahren noch seltener angewendet. Obwohl das Energiesparen in Gebäuden inzwischen gesellschaftlich und politisch hohe Priorität genießt, hat der Durchschnittsverbraucher immer noch diverse Vorbehalte sowohl hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit als auch hinsichtlich des Komforts und der gesundheitlichen Auswirkungen solcher Gebäude. Die Partner von Smart Energy Home wollen das ändern – ihr ganzheitlicher Ansatz optimiert Komfort, Gesundheit und Energieeinsparung gleichrangig. Die übergeordneten strategischen Zielen lauten: erhöhte Lebensqualität, weniger Ausstoß von Kohlendioxid und gesteigerte Wirtschaftlichkeit über den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes.

### Nettoenergieverbrauch gleich Null

Um diese Ziele zu erreichen und eine ganzheitliche Lösung zu finden, haben sich im Smart Energy Home große Industrieunternehmen zu einem Konsortium zusammengeschlossen. Eine wichtige Rolle spielt in dem Projekt auch die Architektur, die sich lokalen Bedürfnissen, Bedingungen und Traditionen anpassen sollte. Konkret heißt das: Es werden keine standardisierten Fertighäuser angeboten, sondern Materialien, Systeme, integrative Konzepte und integrale Gebäudemanagementverfahren, mit denen jeder Architekt ein Haus entwerfen kann, das den Anforderungen eines Smart Energy Home entspricht.

Das Schlagwort von Smart Energy Home heißt „gelebte Innovation“ und meint: Die Projektpartner entwickeln eine breite Palette an Materialien – auch Nanomaterialien – sowie an Geräten, Ausrüstungen und integrierten Techniken, die effizienter in der Anwendung sind, also beispielsweise weniger Energie benötigen und verbraucherfreundlicher sind als herkömmliche Produkte. Zukünftige Produkte sollten alle Rohstoffe über ihren gesamten Le-



Vor und nach der Sanierung: Dieses Mehrfamilienhaus im bayerischen Hopferau ist jetzt ein Passivhaus und verbraucht nur noch ein Siebzehntel der Energie. (Bild: Röthele)

benszyklus wirksam nutzen und zudem die Bedürfnisse des Endverbrauchers berücksichtigen, damit sie Chancen auf dem Massenmarkt haben und sich nicht zu Nischenprodukten entwickeln.

Aus diesen Entwicklungen wird ein Portfolio erarbeitet, das Produktinnovationen in industriellem Maßstab für den Massenmarkt vorstellt, etwa Haushaltsgeräte der nächsten Generation. Als Beispiel sei hier die Entwicklung von Niedrigtemperaturwaschmitteln und den dazu passenden Waschmaschinen genannt. Smart Energy Home will nicht weniger, als eine Sammlung von Techniken zu vereinen, die den Nettoenergieverbrauch im Haus komplett auf Null senken.

## Nanoschäume und Leuchtdioden

Ein Beispiel für innovative Materialien im Hausbau sind Polymerisolierschäume mit winzigen Poren im Nanometerbereich (siehe Kasten). Diese

Nanoschäume sollen noch deutlich besser isolieren als der schon sehr gute Dämmstoff Styropor.

Auch Lampen lassen an Energieeffizienz noch zu wünschen übrig: Weltweit wurden im Jahr 2005 etwa 2650 Terawattstunden für Beleuchtung verbraucht – ein Drittel bis die Hälfte dieser Energie könnten hocheffiziente Beleuchtungssysteme einsparen und damit die Emission von Kohlendioxid um mehr als 450 Millionen Tonnen weltweit senken. Die Lichtquellen mit dem höchsten Potenzial sind dabei Leuchtdioden. Ein Bericht der US-Energiebehörde Department of Energy vom Dezember 2006 prognostiziert organischen Leuchtdioden (OLEDs von Organic Light Emitting Diodes) verglichen mit konventionellen Leuchtstoffen eine doppelt so hohe Effizienz bei gleicher Lebensdauer. OLEDs werden den Leuchtmittelmarkt revolutionieren und traditionelle Lampen schon in den nächsten Jahren teilweise ersetzen, aber auch vollkommen neue Anwen-

dungen erschließen (siehe Beiträge auf den Seiten 12 und 15). OLEDs erzeugen flächiges, angenehmeres Licht und lassen sich einfacher recyceln als Leuchtstoffröhren, da sie kein giftiges Quecksilber enthalten.

Die Entwicklung von stabilen und effizienten Halbleitern für die hauchdünnen Leuchtdioden ist ein Schwerpunkt der mit öffentlichen Mitteln geförderten Forschung in Deutschland. Um organische Leuchtdioden zu echten Innovationen zu machen, sie also in den Massenmarkt zu überführen, arbeiten Universitäten und große Industrieunternehmen eng zusammen.

Der Energieverbrauch in Europa könnte erheblich gesenkt und vom Wirtschaftswachstum stärker entkoppelt werden, wenn Produkte wie Isolierschäume, organische Leuchtdioden, hocheffiziente und preiswerte Photovoltaikanlagen und andere vielversprechende Techniken in neuen und bestehenden Gebäuden, in Schulen,



Ein nanoporöser Isolierschäum unter dem Rasterelektronenmikroskop: Bei neuen Schaumstoffen soll die Größe der Poren nicht mehr im Mikro-, sondern im Nanometerbereich liegen. Dadurch könnte die Dämmwirkung eines Schaumstoffs um mehr als 50 Prozent verbessert oder die benötigte Materialdicke für eine gegebene Dämmleistung um mehr als die Hälfte reduziert werden. (Bild: BASF)

Krankenhäusern, Verwaltungsgebäuden und anderen öffentlichen Bauten Anwendung fänden. Da solche Neuentwicklungen den Wohnkomfort steigern und gut für die Gesundheit des Endverbrauchers sind, ist eine natürliche Akzeptanz zu erwarten – ein Mindestmaß an öffentlichem Bewusstsein vorausgesetzt.

#### Elmar Keßenich

*Der Autor ist Projektleiter Organische Leuchtdioden bei BASF Future Business in Ludwigshafen am Rhein. Der Autor dankt den Kollegen Uwe Wullkopf, Timothy Francis und Thomas Breiner für ihre Unterstützung bei der Erstellung dieses Artikels.*

## So funktioniert die Isolierung mit Polymerschäumen

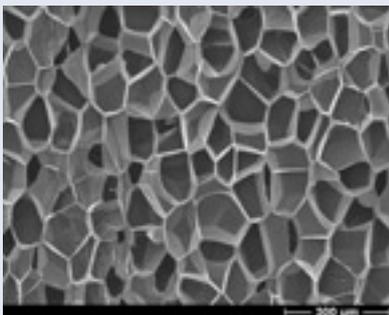
Zu den Materialien für die Wärmedämmung im Hausbau gehören hochporöse Polymerschäume wie das bekannte Styropor. Diese Schäume enthalten viele winzige Poren, die nur 100 bis 300 Mikrometer messen. Die Dichte der Schäume beträgt 20 bis 40 Gramm pro Liter, sie bestehen also zu etwa 96 Prozent aus Luft – und Luft ist ein äußerst guter Wärmeisolator. Die Materialien werden zum einen hinsichtlich ihrer Außendämmwirkung weiterentwickelt. Zum anderen braucht man auch für die Innen- und Zwischendämmung immer flexiblere und raumsparendere Schäume.

Um Isolationsmaterialien zu verbessern, muss man die Mechanismen der Wärmeübertragung berücksichtigen. Wärme wird auf drei Wegen

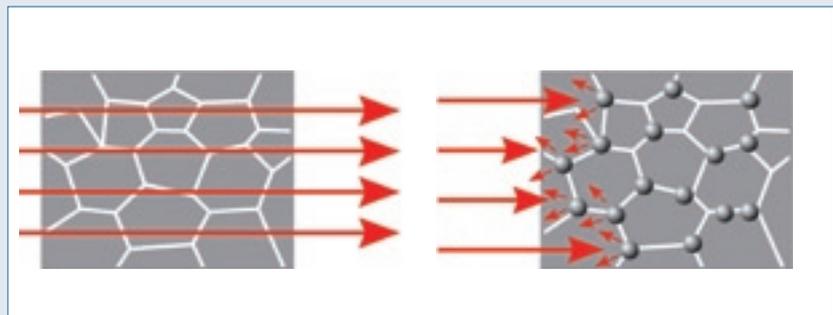
übertragen: über elektromagnetische Wärmestrahlung, über Teilchen, die thermische Energie transportieren, und über Wärmeleitung, bei der thermische Energie durch Zusammenstöße oder andere Wechselwirkungen zwischen Atomen und Molekülen weitergegeben wird. In den meisten Materialien dominiert einer dieser Mechanismen, in Polymerschäumen müssen aber – bedingt durch ihre komplizierte Porenstruktur – alle drei Formen berücksichtigt werden. Die Übertragung von Wärme erfolgt hier sowohl über die feste Kunststoffmatrix als auch über die Luft in den Poren. Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die Isolierwirkung von Polymerschäumen zu verbessern. Die Wärmestrahlung beispielsweise lässt sich verrin-

gern, indem man winzige Partikel aus Graphit in den Schaum einbettet. Die Graphitteilchen stellen sich den Wärmestrahlen quasi in den Weg, streuen sie und hindern sie so am Durchgang.

Auch die Wärmeleitung kann weiter reduziert werden. Voraussetzung dafür ist, dass die Porendurchmesser auf unter 400 Nanometer schrumpfen. Dann messen die Poren weniger als die Strecke, die ein Gasteilchen des Porengases zurücklegt, ohne mit anderen Gasteilchen zusammenzustoßen – und das würde die Wärmeleitung deutlich reduzieren. An der Nutzung dieses Effekts und an Verfahren zur Herstellung solcher Nanoschäume wird derzeit intensiv geforscht.



Isolierschaum aus Polystyrol unter dem Elektronenmikroskop.



Das Schema zeigt den Effekt von Graphitteilchen (graue Kügelchen), die in den Isolierschaum eingebettet sind und die Wärmestrahlen (orange) streuen.

Energieeffizient, flach und videotauglich – organische Leuchtdioden eignen sich ideal als Displays in Mobiltelefonen und anderen kleinen Geräten.



Länger surfen und telefonieren: Bildschirme aus organischen Leuchtdioden schonen die Akkus von mobilen Geräten.

(Bild: Doreen Salcher, Fotolia.com)

## Bunte Displays für die Westentasche

Früher dienten Handys nur zum Telefonieren, heute sind die kleinen Wunderkisten Miniaturkommunikationszentralen für Kurznachrichten und E-Mails, enthalten vollwertige Foto- und Videokameras, spielen Musik und Filme. Sogar Fernsehen ist auf den kleinen Multimediabildschirmen möglich. Kaum ein Handy, das mittlerweile nicht mit einem vollfarbigen und hochauflösenden Display mit über 200 Pixeln pro Inch (ein Inch entspricht 2,54 Zentimetern) ausgestattet ist. Die Pixelgröße ist auf weniger als 100 Mikrometer geschrumpft, die Subpixelgröße für jede Farbe auf unter 50 Mikrometer.

Optimal gerüstet für noch höhere Auflösungen mit hoher Farbtiefe sind

organische Leuchtdioden (OLEDs von Organic Light Emitting Diodes). Diese selbstleuchtenden Displays bestehen aus halbleitenden, kohlenstoffbasierten Schichten von wenigen 100 Nanometern Dicke, die sich zwischen zwei Elektroden befinden. Legt man eine Spannung an die Elektroden, werden Ladungsträger in den organischen Halbleiter injiziert und dieser beginnt zu leuchten. Eine der Elektroden ist transparent, damit man das Leuchten auch sieht.

Die äußerst energieeffizienten organischen Leuchtdioden könnten zukünftig die Betriebsdauer von mobilen Geräten verlängern, da sie weniger Strom verbrauchen und so die Akkus scho-

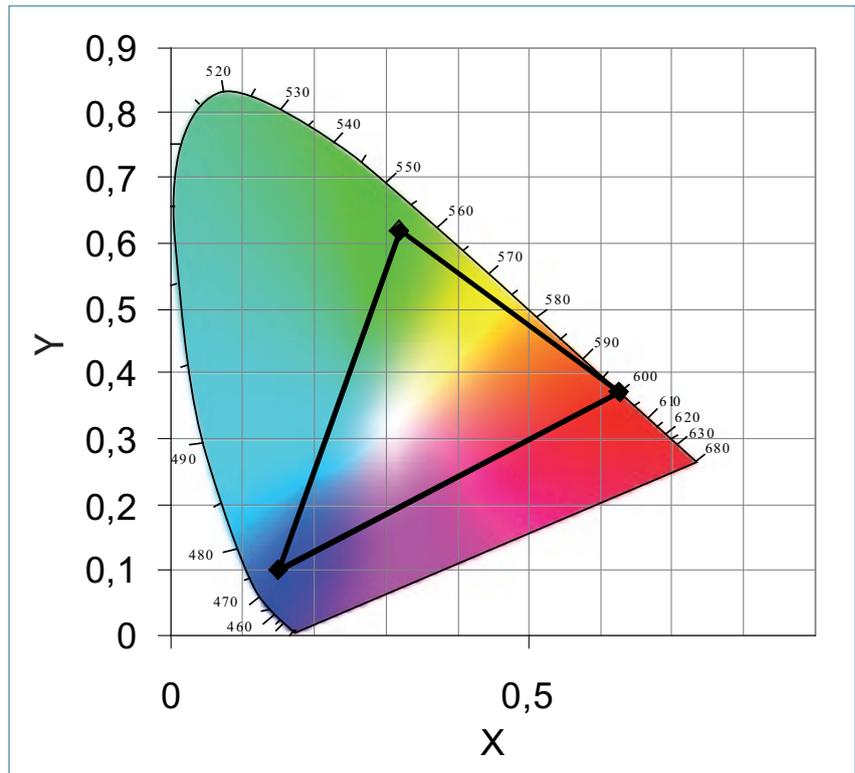
nen. Praktisch ist auch, dass sie extrem leicht und flach sind. Bei Verwendung von geeigneten Trägersubstraten beträgt ihre Dicke nur wenige 100 Mikrometer. Weiterer Vorteil: Solche extrem dünnen Bauteile sind relativ flexibel und daher nicht so stoßempfindlich.

### Maßgeschneiderte organische Schichten

Hergestellt werden die kleinen Displays durch thermisches Verdampfen: Organische Moleküle schlagen sich auf einem kalten Trägermaterial nieder und bilden dort einen dünnen amorphen Film. Eine OLED für kleine Bildschirme besteht aus mehreren organischen Schichten, wobei jede Schicht eine

spezielle Aufgabe hat, für die organische Moleküle maßgeschneidert werden.

Die Schichten, die direkt an die Elektroden angrenzen, sind für die Injektion der Ladungsträger – der negativ geladenen Elektronen aus der Kathode und der positiv geladenen Löcher aus der Anode – in die organischen Schichten zuständig. Die Moleküle dieser Schichten werden daher chemisch so konstruiert, dass sie leicht Ladungsträger aus den Elektroden aufnehmen können. Die nächsten Schichten dienen dem Transport der Ladungsträger. Sie müssen gewährleisten, dass sich die entgegengesetzt geladenen Löcher und Elektronen optimal aufeinanderzubewegen. In der so genannten Emissionsschicht schließlich sitzen fluoreszierende oder phosphoreszierende Emittermoleküle, also Substanzen, die leuchten können. In dieser Schicht treffen Elektronen und Löcher aufeinander und bilden einen energetisch angeregten Zustand. Fällt dieser angeregte Zustand in den energieärmeren Grundzustand zurück, wird die überschüssige Energie als Licht abgegeben – das Display leuchtet. Die Farbe des Lichtes hängt dabei von der Energiedifferenz zwischen angeregtem und Grundzustand ab und kann durch Veränderung der Moleküle variiert werden.



Farbdreieck, in das die Farborte für Emitter eines Displays eingetragen sind: Im Farbdreieck wird jede in der Natur vorkommende Farbe durch zwei Koordinaten festgelegt. Die drei Grundfarben Rot, Grün und Blau für ein OLED-Display sollten möglichst am Rand sitzen, damit auf dem Display ein breites Farbspektrum erscheint.

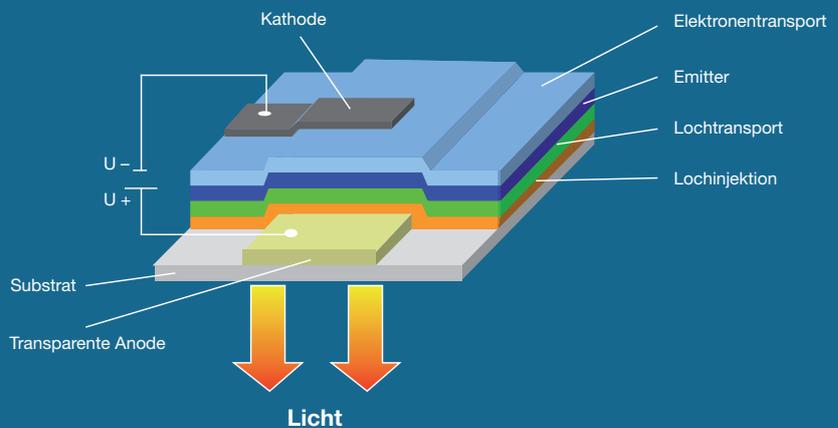
### Alle Farben auf dem Display

Damit auf dem Display ein möglichst breites Farbspektrum erscheint, braucht man die drei Grundfarben Rot, Grün und Blau. Sie sollten in dem genannten Farbdreieck (siehe Abbil-

dung) möglichst am Rand sitzen, da ihre Mischfarben dann eine weite Farbpalette abdecken. Für rote und blaue Emitter muss hier ein Kompromiss zwischen Effizienz und Lage im Farbdreieck gefunden werden, da das menschliche Auge besonders tiefe blaue und



Ein Mitarbeiter von Merck untersucht die Lebensdauer von Materialien für organische Leuchtdioden. (Bild: Merck)



Schematischer Aufbau einer organischen Leuchtdiode (OLED): Auf ein Trägermaterial, das Substrat, sind verschiedene Schichten aufgebracht. Die aktiven Schichten der OLED liegen zwischen zwei Elektroden, der Kathode und der Anode. Fließt Strom, leuchtet die Diode.

rote Farbtöne nicht mehr so gut wahrnimmt. OLED-Displays decken den Farbraum ausgezeichnet ab und geben nahezu alle Farben wieder, die im Farbfernsehen als Standard gelten.

Die auf dem Bildschirm erscheinenden Farben hängen aber nicht nur von den verwendeten Emittiermolekülen ab, sondern auch von der Konstruktion des Bauteils, da die ausgesendete Wellenlänge des Lichts ungefähr der Schichtdicke des Bauteils entspricht. Hierdurch kommt es zu Interferenzeffekten, die das Emissionsspektrum der Leuchtmoleküle stark beeinflussen können.

In Mobiltelefonen wurden OLED-Bildschirme bislang hauptsächlich als Subdisplays eingesetzt, also als kleine Informationsdisplays zusätzlich zu hochauflösenden vollfarbigen Flüssigkristall-Bildschirmen (LCDs von Liquid Crystal Displays). Im Gegensatz zu den selbstemittierenden OLED-Displays müssen LCDs hinterleuchtet werden – und das schluckt Energie. Seit Ende 2007 kommen immer mehr Geräte auf den Markt, in denen hochwertige OLED-Displays die bisherigen Flüssigkristall-basierten Hauptdisplays komplett ersetzen. Wenn die OLED-Technologie ihr Versprechen hält, eine bessere Leistung mit niedrigeren Material- und Produktionskosten zu ver-

einen, wird sie den Flüssigkristall-Bildschirmen gehörig Konkurrenz machen. Nur die Lebensdauer der LCDs ist mit 50 000 Stunden noch unübertroffen. Ein OLED-Display funktioniert 10 000 bis 15 000 Stunden. Für Mobiltelefone ist das aber mehr als ausreichend, denn umgerechnet bedeutet es: Man könnte rund vier Jahre lang täglich acht Stunden Videos auf dem Handy schauen – zumindest würde der Bildschirm das mitmachen.

#### Frank Voges

*Der Autor ist Laborleiter beim Pharma- und Chemieunternehmen Merck in Darmstadt und hat auch den Beitrag auf den folgenden Seiten verfasst.*

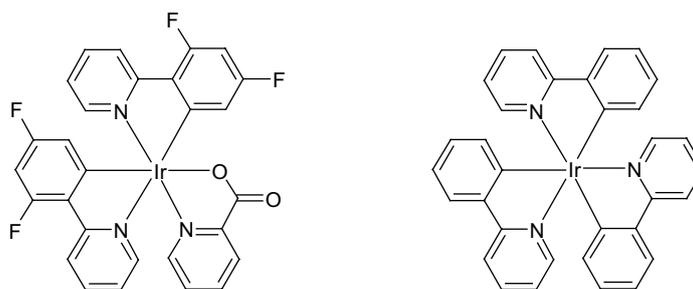
## So funktionieren Fluoreszenz und Phosphoreszenz

Dem Leuchten der OLEDs liegt das Phänomen der Elektrolumineszenz zugrunde: Fließt ein Strom durch die Leuchtdiode, werden Moleküle in der Emitterschicht energetisch angeregt. Anders ausgedrückt: Elektronen dieser Moleküle werden auf ein höheres Energieniveau gehoben. Fallen die Elektronen dann auf das Grundniveau zurück, wird die überschüssige Energie als Licht abgegeben – die Moleküle leuchten.

Die Sache wird kompliziert, weil Elektronen einen Drehimpuls, genannt Spin, besitzen, der zwei Werte annehmen kann. Laut einem Gebot der Quantenchemie darf sich der Gesamtspin eines Systems nicht ändern. Fluoreszenz und Phosphoreszenz, die beiden Unterphänomene der Lumineszenz, unterscheiden sich in ihrem Gehorsam gegenüber diesem Gebot der Spinerhaltung: In fluoreszierenden Materialien ändern Elektronen ihren Spin tatsächlich nicht ohne Weiteres. Da Dreiviertel aller angeregten Zu-

stände in fluoreszierenden Materialien die „falsche“ Spinausrichtung haben, können sie nicht zurück in den Grundzustand fallen und senden daher kein Licht aus – für das Display sind sie damit verloren. In phosphoreszierenden Materialien hingegen können Ladungsträger ihren Spin aufgrund der so genannten Spin-Bahn-Kopplung ändern. Daher können hier alle Elektronen zur Lichterzeugung beitragen und die Effizienz ist etwa viermal größer. In der Emitterschicht einer OLED werden aus diesem Grund bevorzugt Phosphoreszenzfarbstoffe eingesetzt.

Allerdings lässt die Lebensdauer dieser komplex aufgebauten Verbindungen noch zu wünschen übrig. Nur rote und grüne Phosphoreszenzemitter erreichen schon Betriebslebensdauern von mehreren 10 000 Stunden auch bei größeren Helligkeiten von 1000 Candela pro Quadratmeter. Für das energiereichere Blau gibt es hingegen noch keine stabilen Phosphoreszenzfarbstoffe, sodass lange Lebensdauern von blauen OLEDs bislang nur mit den weniger effizienten fluoreszierenden Emittieren möglich sind.



Chemische Struktur von zwei Phosphoreszenzemittern namens Firpic (links) und Irppy (rechts).

Fernsehen auf großem Format schluckt Energie. Wie gut, dass organische Leuchtdioden jetzt Einzug in die Fernsehwelt halten und Bildschirme energieeffizienter machen.



Und was kommt jetzt? Fernsehbildschirme der nächsten Generation basieren auf organischen Leuchtdioden und verbrauchen daher weniger Energie.

(Bild: soupstock, Fotolia.com)

## Energiesparen beim Fernsehen

Fernseher und Displays sind aus der alltäglichen Wohnlandschaft kaum mehr wegzudenken. Die heute weitverbreiteten Flachbildschirme werden zwar immer energieeffizienter, gleichzeitig aber auch immer größer. Unterm Strich schlucken die modernen Displays daher mehr Energie als ihre Vorgänger. Große Plasmabildschirme verbrauchen bis zu 500 Watt elektrische Leistung und belasten dadurch sowohl die Umwelt als auch das Portemonnaie.

Abhilfe schaffen selbstemittierende organische Leuchtdioden (OLEDs von Organic Light Emitting Diodes), die Strom sehr effizient in Licht umwandeln und nur dann Energie verbrauchen, wenn ein Pixel leuchtet. Zudem ist eine OLED eine ideale flächige Lichtquelle,

die in einer Stärke von weniger als einem Millimeter hergestellt werden kann. Sony hat als erster Hersteller von Flachbildschirmen einen OLED-Fernseher produziert, der seit Ende 2007 im Handel ist.

OLEDs sind nicht nur leicht, flach, energieeffizient und großflächig herzustellen. Sie liefern zudem ein Bild, das nahezu unabhängig vom Blickwinkel ist und durch starke Kontraste und brillante Farben begeistert.

### Hauchdünne organische Halbleiter

Organisch an diesen Leuchtdioden, die 1987 von den beiden Kodak-Wissenschaftlern Ching Tang und Steve

van Slyke entdeckt wurden, sind die Materialien, die das Herz einer OLED bilden: Sie bestehen aus kohlenstoffbasierten, also organischen, Molekülen. Im Gegensatz zu den meisten organischen Kunststoffen, die elektrischen Strom nicht leiten, sind OLED-Materialien elektrische Halbleiter. Solche halbleitenden Kunststoffe werden auch zum Bau von Transistoren und Solarzellen verwendet. In einer OLED befindet sich der organische Halbleiter zwischen einer reflektierenden und einer transparenten Elektrode. Die halbleitende Schicht ist hundertmal dünner als ein menschliches Haar.

Organische Halbleiter lassen sich aufgrund ihrer Herstellungsart in zwei Klassen unterteilen: Es gibt kleine or-

ganische Moleküle, die thermisch im Vakuum verdampft und dann auf einem Träger abgeschieden werden, und Polymere, die aus einer Flüssigkeit aufgebracht werden. Polymere, im allgemeinen Sprachgebrauch als Kunststoffe bezeichnet, sind große Moleküle aus vielen miteinander verknüpften Einzelbausteinen, den so genannten Monomeren. Ein OLED-Polymer besteht aus vielen verschiedenen Monomeren, die unterschiedliche Funktionen übernehmen. Ein Teil der Monomere beispielsweise sorgt dafür, dass die Ladungsträger leicht aus den Elektroden in die organische Schicht gelangen. Andere wurden der Aufgabe angepasst, die Ladungsträger zu transportieren. Und wiederum andere leuchten bei Stromfluss.

Die Flüssigbeschichtung eignet sich besonders für die kostengünstige Herstellung von großen Flächen. Allerdings sind die hierfür erforderlichen Polymere noch nicht ausgereift, und die Lebensdauer der so hergestellten Halbleiter lässt noch zu wünschen übrig. OLEDs hingegen, die aus kleinen Molekülen mit

dem Verdampfungsverfahren produziert werden, zeigen für einzelne Farben, etwa für grün oder rot, schon eine Lebensdauer von mehreren 100 000 Stunden auch bei hohen Helligkeiten. Die Lebensdauer eines nach dem Verdampfungsverfahren hergestellten bunten Kleinbildschirms hängt aber von der unbeständigsten Farbe – meist blau – ab und ist etwa zehnmal kleiner.

### Moleküle optimieren

Die organische Chemie bietet die Möglichkeit, Moleküle nach Maß zu schneiden und so die von ihnen emittierte Farbe zu variieren. Über eine gezielte Veränderung der Molekülstruktur kann man die vom Molekül emittierte Farbe in weiten Grenzen steuern. Allerdings beeinflusst man damit auch den Stromfluss in der Leuchtdiode.

Über Modifikationen der Seitenketten lassen sich noch andere Eigenschaften der Moleküle einstellen, beispielsweise ihre Stabilität gegenüber den elektrochemischen und elektrooptischen Vorgängen in einer OLED. So

lässt sich die Lebenszeit der Leuchtdiode steigern.

Die gezielte Veränderung der Seitenketten erleichtert auch die Produktion der OLEDs. Beispielsweise lässt sich so die Löslichkeit der Moleküle den Lösungsmitteln anpassen, die in den jeweiligen Herstellungsprozessen verwendet werden.

Wer OLEDs für den Fernsehmarkt einsetzen will, befindet sich im Moment noch in einem Dilemma: Die Herstellung von großflächigen organischen Halbleitern durch thermische Verdampfung ist noch zu teuer, die Qualität der durch kostengünstigere Flüssigbeschichtung produzierten Halbleiter hingegen nicht ausreichend. Erst wenn eine dieser Hürden genommen ist, werden OLEDs auf dem Fernsehmarkt bestehen können.

### Frank Voges

*Der Autor ist Laborleiter beim Pharma- und Chemieunternehmen Merck in Darmstadt und hat auch den Beitrag auf den vorhergehenden Seiten verfasst.*



Nicht nur flach, sondern auch energieeffizient: Der erste OLED-Fernseher, hergestellt von Sony.

(Bild: Sony)

Autos verbrauchen immer weniger Kraftstoff, die deutsche Industrie steigert ihre Energieeffizienz – die Bundesrepublik scheint in der Lösung des Energieproblems auf dem richtigen Weg zu sein. Doch wenn man die Angaben hinterleuchtet, zeigt sich: Die Effizienzsprünge täuschen über die Realität hinweg.



(Bild: bilderbox, Fotolia.com)

## Das Verhalten des Einzelnen zählt

Im Jahr 2007 hat die Umweltbehörde der Vereinten Nationen (UNEP) den Globalen Umweltzustandsbericht GEO-4 veröffentlicht. Dieses fast 600 Seiten umfassende Werk erklärt die vielfältigen wirtschaftlichen, politischen, technischen und ökologischen Zusammenhänge, die eine nachhaltige Entwicklung beeinflussen. Der einleitende Überblick nennt für die Energieversorgung zwei Gefahren: Unsicherheit der Versorgung und ökologische Schäden bei Übernutzung.

Beides regt zur Frage an, ob die Haushalte in Deutschland klug genug mit Energie umgehen. Es geht hier nicht um den Streit, ob wir Deutschen als Musterschüler eine Vorreiterrolle spielen sollten oder ob all unsere Bemühungen

sinnlos sind angesichts des dramatischen Anstiegs im Energieverbrauch anderer Nationen. Es ist schlicht eine Frage der Fairness, denn eine ausreichende Energieversorgung für jeden Erdenbürger erfordert, mit Energieeffizienz gegen verschwenderische Ineffizienz anzutreten. Diesen Standpunkt vertritt nicht nur die Bundeskanzlerin, auf ihm basieren auch die vielen Ratgeber zum Thema Klimaschutz und Energiesparen. Wo also stehen wir?

### Jährlich 20 Tonnen Material pro Kopf

Die privaten Haushalte sind Deutschlands größte Energieverbraucher. Sie liegen knapp vor den Bereichen Verkehr und Industrie und weit

vor dem Bereich Gewerbe, Handel und Dienstleistungen. Außerdem wird ein großer Teil des eingesetzten Kraftstoffs privat verfahren. Und mit dem Konsum von Gütern und Dienstleistungen verbrauchen wir Bürger indirekt noch mehr Energie.

Den Löwenanteil des deutschen Energieaufkommens verbrauchen also 82,5 Millionen Einzelpersonen. Berücksichtigt man, dass wir mit Exportgütern einen Teil Energie weiterreichen, verbessert sich unsere Bilanz zwar ein wenig, unterm Strich entfallen aber auf jeden Bürger 5,5 Tonnen Steinkohleinheiten jährlich.

Der Verbrauch von Energie hängt eng mit jenem von materiellen Res-

sources zusammen. Jeder Deutsche verbraucht jährlich 20 Tonnen Material, darunter auch mit viel Energie erzeugte Produkte wie Stahl, Zement, Aluminium, Kupfer und Glas. Diese Produkte stecken zwar traditionell in langlebigen Gütern, in unseren Autos, Häusern und Haushaltsgeräten. Gerade bei Glas und einigen Metallen aber hat der Markt Kennzeichen einer Wegwerfkultur entwickelt. Aus Sicht der Verbraucher sind Verpackungen nichts weiter als Müll, auch wenn dieser getrennt und recycelt wird. Das Sammeln von Glas in Altglascontainern zeigt die Erosion unserer Konsumkultur: Die Zeiten, in denen leere Weinflaschen als ein Gut, als Leergut, galten, sind vorbei.

Bekäme ein deutscher Bürger zum Frühstück das Material angeliefert, das er täglich verbraucht, entspräche das dem durchschnittlichen Körpergewicht eines Deutschen. Würde man dieser Menge noch das Material hinzurechnen, das bei der Förderung und Verarbeitung der notwendigen Rohstoffe verbraucht wurde und zum Teil als Ab-

fall und Abraum übrig bleibt, wäre es ein Vielfaches davon.

Auch der Wasserverbrauch hängt mit unserer Energieversorgung zusammen. Die deutschen Kraftwerke benötigen fünfmal mehr Kühlwasser, als die Wasserwerke an Trinkwasser in die Haushalte liefern.

## Energieeffizienz und Lebensstil

Unser Energieverbrauch steht in enger Wechselwirkung mit unserem Ressourcenbedarf und unserem Lebensstil. Es gibt gute ökologische, ökonomische und politische Gründe, die Energieeffizienz in unserem Land zu steigern. Schließlich sind wir nicht allein auf unserem Planeten und die Zahl der Menschen, die zu unserem Lebensstandard aufschließen, wächst rasch.

Jeder Einzelne kann seinen Energiebedarf durch zweierlei senken: durch sparsamen Umgang mit Energie und durch Dematerialisierung des Konsums. Das Naheliegende wäre, beides

maßvoll zu tun, denn unsinniger Aktivismus ist der falsche Weg. Unsere Technik und unser Bewusstsein sind das Schuhwerk, beide sind aber keine Siebenmeilenstiefel.

Auf den ersten Blick scheint Deutschland auf gutem Weg zu sein. Immerhin ist der spezifische Kraftstoffverbrauch eines Personenkraftwagens von 8,9 Liter pro 100 Kilometer im Jahr 1995 auf 7,7 Liter im Jahr 2005 gesunken. Auch die nationale Energieintensität, die als Maß für die Energieeffizienz gilt, hat seit 1995 um 11 Prozent abgenommen. Obwohl das Bruttoinlandsprodukt um 14 Prozent gewachsen ist, blieb der Energieverbrauch fast stabil und nahm nur um 1,5 Prozent zu. Die Industrie ist noch weiter: Die Energieintensität deutscher Exportgüter sank zwischen 1995 und 2004 um fast 24 Prozent. Auch die Rohstoffintensität ist gesunken. Sogar das Ziel der Bundesregierung, diese Kenngröße von 1994 bis 2020 zu halbieren, scheint greifbar. Bis 2005 sank die Rohstoffintensität um 21 Prozent.



Kennzeichen der Wegwerfkultur: Leere Weinflaschen landen heute bestenfalls im Altglascontainer, früher waren sie Leergut und wurden für eine neue Füllung gesäubert. Auch solche geänderten Verhaltensweisen lassen den Energieverbrauch steigen.

(Bild: bilderbox, Fotolia.com)



Da immer mehr Güter auf der Straße transportiert werden, nimmt der Kraftstoffverbrauch im Straßenverkehr insgesamt nicht ab – auch wenn der einzelne PKW weniger Sprit verbraucht.

(Bild: Manfred Steinbach, Fotolia.com)

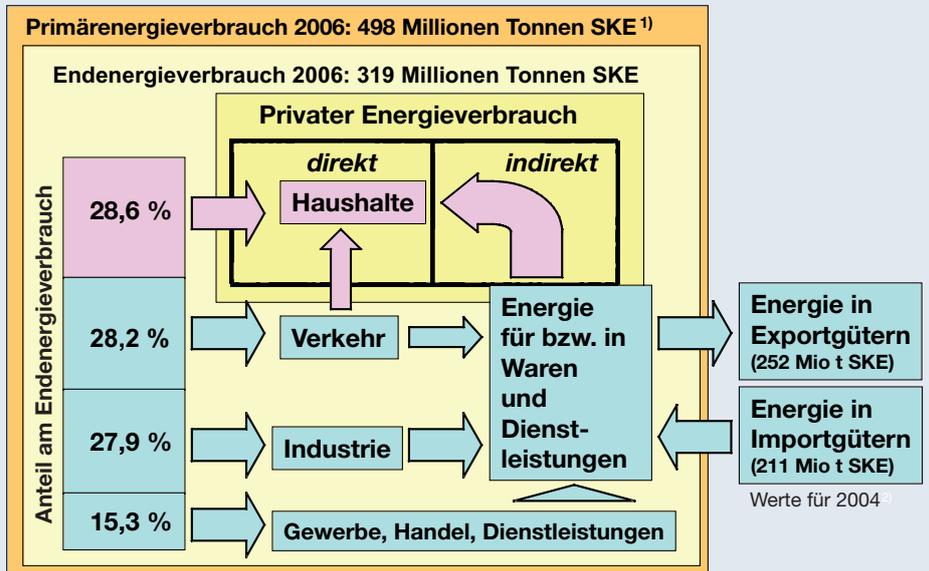
Leider spiegeln solche Zahlen Effizienzsprünge vor, die über die Realität hinwegtäuschen. Der spezifische Kraftstoffverbrauch von PKWs ist zwar durch technische Maßnahmen und die Umstellung von Benzin auf Diesel gesunken, doch der Kraftstoffverbrauch im Straßenverkehr insgesamt hat nicht abgenommen, sondern blieb unverändert, da immer mehr Güter auf der Straße transportiert werden und im Personenverkehr zu wenig gespart wird. Von einer Effizienzstrategie kann nicht die Rede sein.

Auch die Angaben zur Energieintensität führen in die Irre, denn die Steigerung der nationalen Energieeffizienz stagniert bei jährlich einem Prozent – der wachsende Konsum neutralisiert technische Fortschritte. Und der Export verdankt den Hauptteil seines Effizienzgewinns einerseits einem veränderten Warenkorb und andererseits einigen Zugpferden der Papier- und Zellstoffindustrie sowie der Chemieindustrie und dem Maschinenbau. Auch die Rohstoffintensität steht nicht so glänzend da, denn die Statistik weist nur einen Teil des Materialverbrauchs aus – landwirtschaftliche Produkte erfasst sie nicht und der Import von Metallen liegt bei jährlich 50 Millionen Tonnen. Gerade die Gewinnung von Metallen verursacht riesige Abraumengen, verbraucht viel Energie und hinterlässt oft kritische Abfälle. Mit unserem Konsum exportieren wir Umweltprobleme.

Die Bilanz dieser Beispiele zeigt ein merkwürdiges Phänomen: Technik und Konsum gehen getrennte Wege. Trotz vieler positiver Ausnahmen verharrt das Verhalten unserer Gesellschaft insgesamt in einer Business-as-usual-Starre. Im Gegensatz zur Arbeitswelt wird unser Privatleben kaum von Energiebilanzen und Nachhaltigkeitsvorstellungen bestimmt. Effizienz erwächst aus Technologiewandel und nicht aus dem klügeren Gesamtverhalten der Verbraucher.

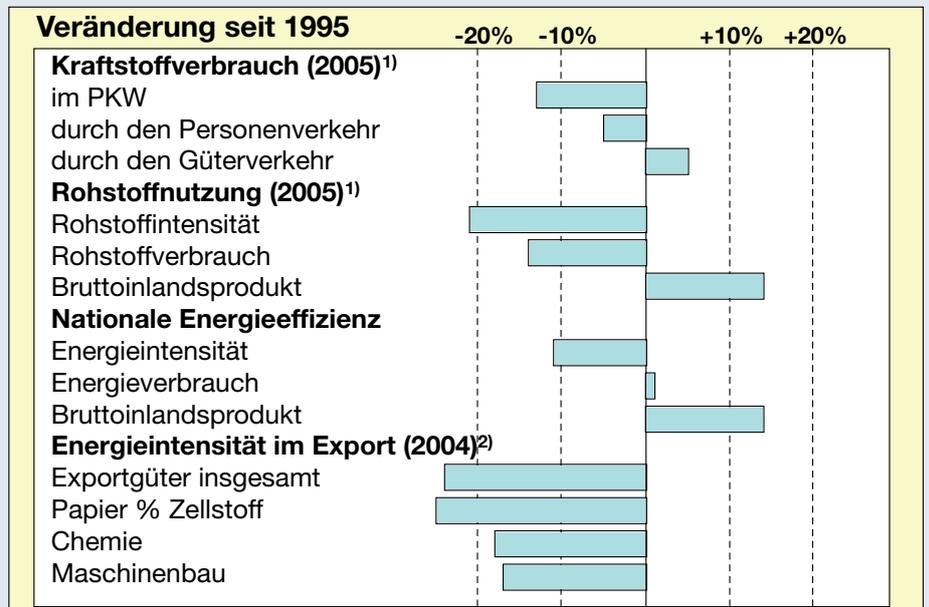
### Energieverbrauch in Deutschland

Übersicht über den Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2006 (SKE steht für Steinkohleeinheiten).



1) Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen 09/2007  
 2) Statistisches Bundesamt, Pressekonferenz 13.11.2007

### Effizienzerfolge in Deutschland



1) Stat. Bundesamt: Umweltdaten Deutschland 2007  
 2) Stat. Bundesamt: Umweltökonomische Aspekte der Globalisierung, Pressekonferenz 13.11.2007

Das zeigt auch unsere Bilanz der Treibhausgase: Deutschland wird voraussichtlich zu den wenigen Ländern gehören, die ihre Kyoto-Ziele erreichen. Zur Senkung der Treibhausgase haben drei Dinge beigetragen: die Optimierung der Stromerzeugung – dazu zählt auch die Umstellung von Kohle auf Erdgas –, der Ausbau der erneuerbaren Energien und Effizienzschübe in der Industrie, besonders in der Chemie. Die Kohlendioxid-Emissionen und der Energieverbrauch der deutschen Haushalte steigen jedoch weiter leicht an.

### Nachvollziehbares Leitbild

Offenbar reichen technische Innovationen allein nicht aus, damit die Bürger ihre Ansprüche an die Natur begrenzen. Diese Ansprüche gehen noch über die Güter- und Energieextraktion hinaus, denn mit steigendem Wohlstand wächst auch die Erwartung an eine intakte, ästhetisch ansprechende, urlaubsgerechte Umwelt. Technik gilt vielen als Störfaktor: Windkraftanlagen schaden angeblich dem Landschaftsbild, Kraftwerke jeder Art sind suspekt, Bürgerinitiativen bekämpfen den Ausbau der Stromnetze.

Auch die Chemieindustrie steckt in einem Dilemma. Traditionell richten sich ihre Dienstleistungen nur indirekt an den Endverbraucher. Im Alltag ist Chemie unsichtbar, obwohl sie allge-

genwärtig ist. Mehr Sachinformation kann dieses Paradoxon nicht lösen. Würde sich der Verbraucher hinsichtlich der Energieeffizienz anders verhalten, wenn er vertiefte chemische Kenntnisse hätte? Wohl kaum – auch Chemiker verhalten sich privat meist wie andere Normalbürger. Was für die Chemie gilt, trifft auch auf andere Technologiebereiche zu: Wissen allein hat wenig Überzeugungskraft.

Unsere technische Leistungsfähigkeit ist unbestritten, gilt das auch für unsere Lebensklugheit? Wer nur mit einem Bein voranschreitet und das andere stehen lässt, kommt nicht weit. Diesen Spagat zu überwinden wird auf verschiedenen Wegen versucht, zum einen mit Appellen, zum anderen mit Bildern und Schilderungen. Beides zielt darauf ab, ein nachvollziehbares Leitbild zu entwickeln.

Zwei aktuelle deutschsprachige Versuche sollen dies veranschaulichen. Die technischen, naturwissenschaftlichen, medizinischen und sozialwissenschaftlichen Akademien der Schweiz haben eine „Denk-Schrift Energie“ verfasst. Sie widmen sich darin der Frage, wie die Schweiz eine „Effizienzrevolution bei Material- und Energienutzung“ herbeiführen kann. Die Schrift versteht sich als „Aufruf an die Verantwortlichen in der Schweiz“ zu einer nachhaltigen Entwicklung. Sie stellt ethische und

ökologische Aspekte neben technische und naturwissenschaftliche.

In Deutschland gab es im vergangenen Jahr ein deutlich umfangreicheres Vorhaben. Die Stiftung „Forum für Verantwortung“ verfolgt das gleiche Ziel mit einer Serie von zwölf Taschenbüchern, in denen die Themen Energie, Ressourcen und Konsumgesellschaften einen Schwerpunkt bilden. Auch hier stammen die Autoren aus den unterschiedlichsten akademischen Disziplinen. Sie zeigen, wie vielschichtig sich unser Verhalten auf den Planeten Erde auswirkt. Die vielen Mosaiksteine ihrer Argumente ergeben ein ebenso imposantes wie beunruhigendes Bild. Beide Publikationen sind leicht verständlich und anschaulich geschrieben. Offen bleibt, ob eher das Leicht- oder das Schwergewicht der Gesellschaft einen Impuls gibt. Erfolg ist beiden zu wünschen.

### Hermann Pütter

*Der Autor war bis zu seinem Ruhestand Anfang 2006 langjähriger Mitarbeiter des Chemieunternehmens BASF, zuletzt als wissenschaftlicher Direktor und Leiter der Forschungsgruppe Elektrochemische Prozesse. Seit 2007 ist er Energiekoordinator der Gesellschaft Deutscher Chemiker. Hermann Pütter hat auch den Beitrag auf Seite 60 verfasst und ist Mitautor des Beitrags auf Seite 73.*



Der Spritverbrauch eines Autos hängt auch von seinem Gewicht ab. Leichte Werkstoffe gewinnen daher im Fahrzeugbau immer mehr an Bedeutung. Die neuen Materialien enthalten beispielsweise röhrenförmige Gewebe – und sind mindestens so stabil wie herkömmliche Bleche.



Bildquelle: Fantasiata, Fotolia.com

## Textil im Fahrzeugbau

**M**obilität ist eine Grundvoraussetzung für die ökonomische Entwicklung eines Landes sowie für die persönliche Entfaltung eines jeden Menschen. Sie erlaubt räumliche Arbeitsteilung, befriedigt individuelle und gesellschaftliche Bedürfnisse und ist vor dem Hintergrund der Globalisierung mehr denn je Grundfunktion unseres Lebens und Wirtschaftens. Doch individuelle Mobilität kostet Energie – der Verkehr ist mit 28 Prozent am gesamten Energieverbrauch in Deutschland beteiligt – und verursacht Kohlendioxid und andere Luftschadstoffe.

In Zeiten von Klimawandel und der Verknappung von Erdöl gewinnen Leichtbaumaterialien und -konstruktionen im Fahrzeugbau immer mehr

an Bedeutung, denn leichtere Autos verbrauchen weniger Sprit und stoßen daher weniger Abgase aus. In den Flugzeugbau haben leichte Werkstoffe längst Einzug gehalten, allerdings werden für die Serienproduktion von Automobilen andere Materialien und Verarbeitungstechniken benötigt.

### Flexible Verbundwerkstoffe

Aluminium statt Stahl, Kunststoff statt Metall, dünne statt dicker Bleche – der Leichtbau kennt viele Varianten. Ein spezielles Beispiel für Leichtbaumaterialien sind Faserverbundwerkstoffe. Sie bestehen aus einem Grundmaterial, der Matrix, das durch ein Gerüst aus Fasern verstärkt wird. Dabei dienen als Matrix überwiegend Kunststoffe,

aber auch Keramiken oder Metalle. Die Verstärkungen bestehen in der Regel aus Kohlenstoff- oder Glasfasern. Diese Verbundwerkstoffe sind äußerst flexibel: Sowohl ihre Form als auch ihre Eigenschaften, wie Festigkeit oder Steifigkeit, lassen sich gut dem Design der Bauteile und den späteren Beanspruchungen anpassen. Für den Fahrzeugbau sind sie geradezu prädestiniert, zumal neue Fertigungstechniken die Herstellung solcher Bauteile in Großserie und zu konkurrenzfähigen Kosten möglich machen.

Aufwendiger in der Produktion sind Verbundwerkstoffe, die aus einem technischen Textil, einem aus Hybridgarn gewobenen flächigen Gebilde, hergestellt werden. Ein Hybridgarn



Mit Kohlenstofffasern verstärkter Verbundwerkstoff: Dach und Frontend für ein Auto.

(Bild: ILK, Dieffenbacher)

setzt sich aus zwei oder mehreren unterschiedlichen Fasern zusammen. Die verstärkenden Fasern aus Kohlenstoff werden beispielsweise mit einer Kunststofffaser, die das spätere Matrixmaterial bildet, verwirbelt. Aus solchen Garnen werden anschließend technische Textilien mit besonderen Strukturen gewebt, die beispielsweise ein Gerüst aus Waben oder Röhren bilden. Im weiteren Prozess wird die Textilstruktur in einem Werkzeug erhitzt, sodass die Fasern aus Kunststoff schmelzen und der Kunststoff zwischen die Kohlenstofffasern fließt. So bildet sich die

Matrix des Verbundwerkstoffes. Die verstärkenden Fasern aus Kohlenstoff hingegen liegen weiterhin in der geordneten Gerüststruktur vor und geben dem leichten Werkstoff besonderen Halt.

Verbundmaterialien aus textilverstärkten Kunststoffen bieten sich vor allem für den Leichtbau von besonders beanspruchten Maschinen und Fahrzeugteilen an, da sie das Gewicht deutlich reduzieren, Sicherheit sowie Funktions- und Leistungsfähigkeit aber nicht beeinträchtigen.

### Integrierte Sensoren

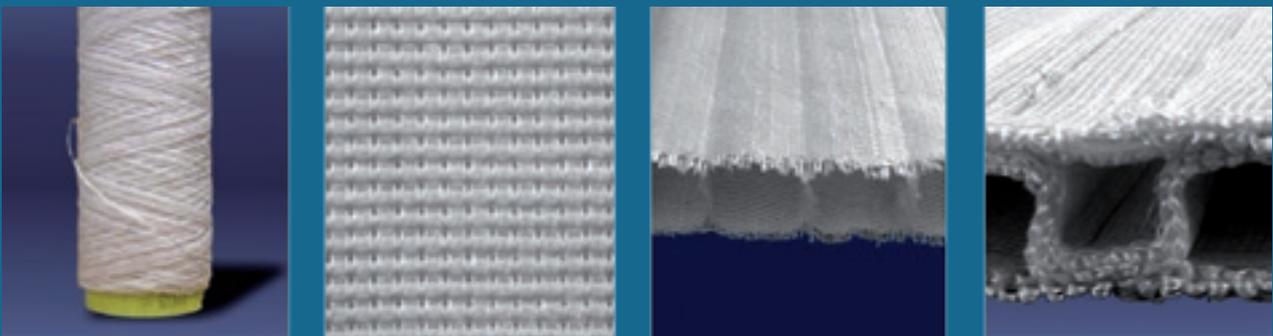
Im Automobilbau sind neben dem geringeren Gewicht noch andere Aspekte der textilverstärkten Verbundwerkstoffe interessant: Die neuen Materialien besitzen bessere Dämpfungs- und Crasheigenschaften als herkömmliche, da sie Energie, etwa Stoß- oder Schwingungsenergie, besser schlucken. Praktisch ist auch, dass sich Sensoren direkt in die Verbundwerkstoffe einbauen lassen, beispielsweise können Airbag auslösende Sensoren direkt in Stoßfänger integriert werden. Und sicherheitsrelevante Bauteile aus Verbundwerkstoffen lassen sich mit integrierten Sensoren permanent überwachen. Das erübrigt regelmäßige

Inspektionen in der Werkstatt und reduziert Instandhaltungskosten. Die Sensoren können dabei sowohl auf die Verbundstruktur appliziert als auch während der Fertigung direkt in den Verbundwerkstoff integriert werden.

Diese Kombination aus erhöhtem Verbrauchernutzen und Spriteinsparung durch reduziertes Gewicht macht den Leichtbau zu einem zukunftsreichen Trend in der Fahrzeugindustrie. Dank neuer Materialien könnten die Autos von morgen etwa ein Drittel weniger auf die Waage bringen. Wie viel Sprit sie dadurch sparen, lässt sich nicht genau beziffern. Sicher aber ist: Leichtere Materialien sind im Fahrzeugbau einer der wichtigsten Hebel, um den Verbrauch von Treibstoff und den Ausstoß von Kohlendioxid zu verringern.

### Werner Hufenbach, Martin Lepper und Heiko Richter

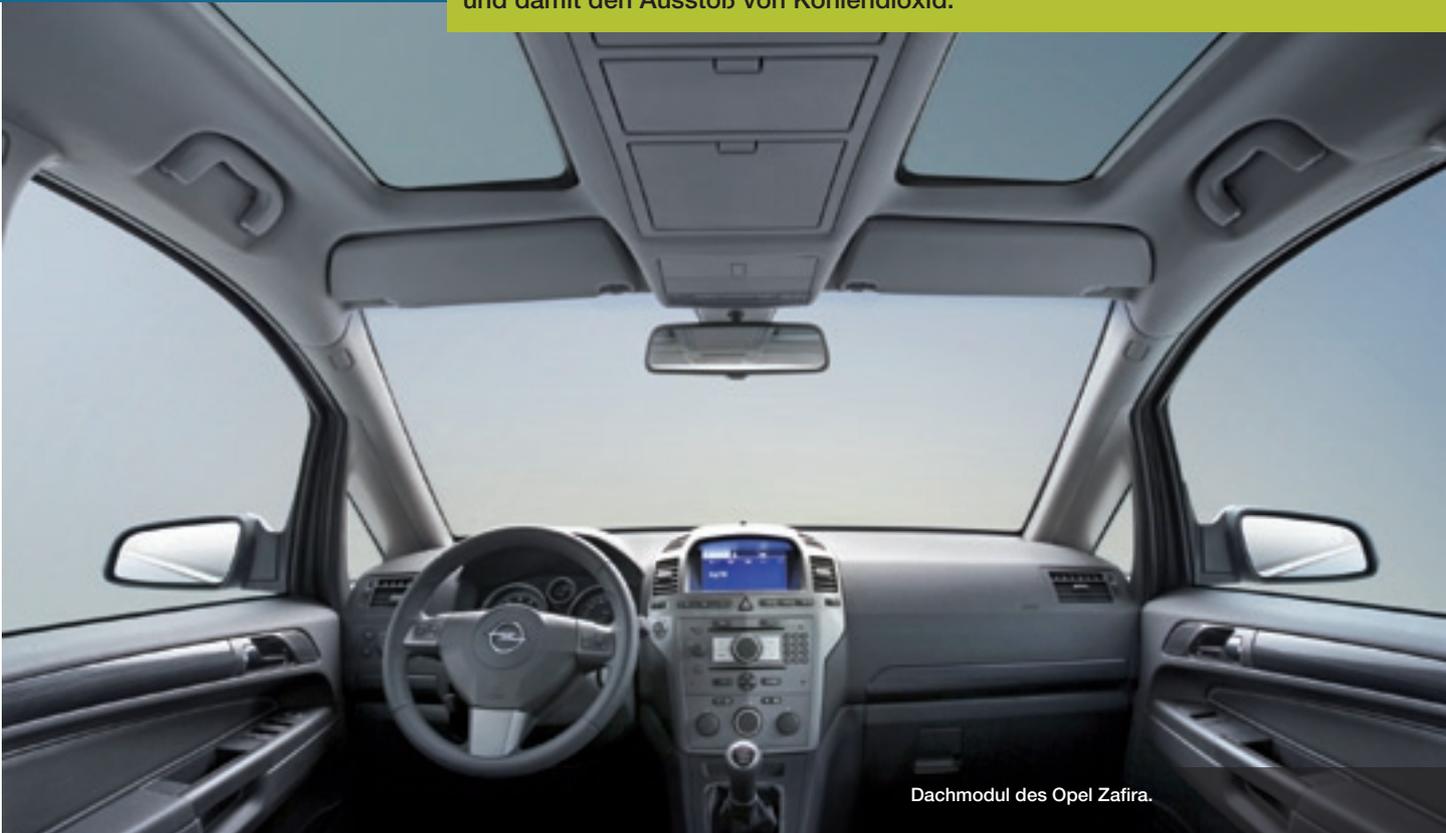
Werner Hufenbach ist Direktor des Instituts für Leichtbau und Kunststofftechnik der Technischen Universität Dresden, an dem auch Martin Lepper und Heiko Richter arbeiten.



Vom Hybridgarn zur technischen Textilie: Aus solchen Geweben werden leichte Fahrzeugkomponenten hergestellt.

(Bild: Sonderforschungsbereich 639)

Mit dem Kunststoff Polyurethan lassen sich leichte und stabile Bauteile für Autos wirtschaftlich herstellen. Sie senken den Treibstoffverbrauch und damit den Ausstoß von Kohlendioxid.



Dachmodul des Opel Zafira.

## Sandwich aus Papier und Kunststoff

Sowohl die abnehmenden fossilen Ressourcen als auch die zunehmende globale Belastung mit Kohlendioxid sind wichtige Treiber für Automobilentwicklungen. Deren Ziel ist es, den Treibstoffverbrauch und damit die Emissionen zu senken. Die Automobilindustrie optimiert etablierte Antriebskonzepte oder erforscht neue, erhöht die Effizienz von fahrzeuginternen Energieverbrauchern, reduziert den Luft- und Rollwiderstand der Fahrzeuge und senkt das Gewicht von Bauteilen und Baugruppen. Um Letzteres zu erreichen, ist der Einsatz von Leichtbaumaterialien unumgänglich.

### Bis zu 75 Prozent leichter

Ein Beispiel für leichte Strukturelemente, die Automobilzulieferer bereits

wirtschaftlich in hohen Stückzahlen herstellen, sind Sandwichbauteile auf Basis des Kunststoffs Polyurethan. Zu diesem Zweck werden leichte Papierwabenkerne zwischen zwei Glasfasermatten gelegt, beidseitig mit einer Polyurethan-Reaktionsmischung besprüht und anschließend in heißen Formen verpresst. Hierbei verbindet die leicht aufschäumende Reaktionsmischung die einzelnen Sandwichbestandteile nach der Aushärtung dauerhaft und fest miteinander. So lassen sich Bauteile mit Flächengewichten von deutlich unter drei Kilogramm pro Quadratmeter herstellen, die zum Beispiel als Kofferraumböden, Boden- und Reserveradabdeckungen sowie Schiebedachkassetten eingesetzt werden. Gegenüber herkömmlichen Materialien können dadurch Gewichtseinsparun-

gen zwischen 50 und 75 Prozent erreicht werden. Das Zusammenspiel der leichten, druckfesten Papierwaben mit den wenige zehntel Millimeter dicken glasfaserverstärkten Deckschichten bewirkt, dass die Sandwichbauteile hohe Lasten bei nur geringer Durchbiegung tragen können.

Auch Bauteile mit großen Wandstärkensprüngen, dicken Rändern, Krafteinleitungspunkten und Inserts können schon problemlos hergestellt werden. An kritischen Kanten und Rändern sorgen erhöhte Mengen an Polyurethanen und ein gleichzeitiger Zusatz von Glasfasern für gute Oberflächenqualitäten sowie in den Krafteinleitungs- und Einlegebereichen für die geforderte Verstärkung.

## Neue Autodächer: leichter und schlagfester

Außerdem wurden Polyurethan-Systeme für Dachmodule entwickelt, die mit langen Glasfasern verstärkt werden. Die Außenhaut bildet hier eine thermoplastische Kunststoffolie. Befestigungselemente und Einleger können ebenso integriert werden wie textile Dekore auf der Innenraumseite. In der Produktion werden alle Elemente im Schäumwerkzeug platziert.

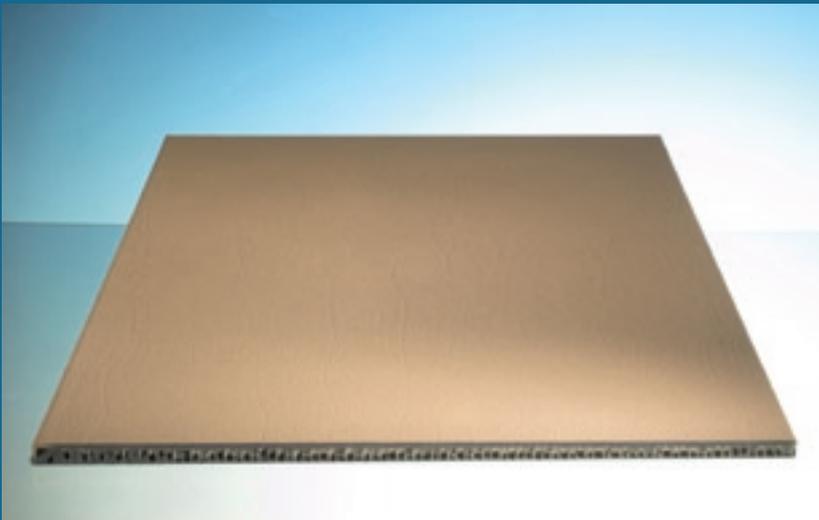
Das Polyurethan-Reaktionsgemisch, das zusammen mit den Glasfasern in die Werkzeugunterschale eingebracht wird, verbindet beim Erhitzen alle Komponenten miteinander.

Da ein solches Dach äußerst stabil und schlagfest ist und bei Überlastung nicht splittert, erhöht es die passive Sicherheit. Von Vorteil für den Konstrukteur ist, dass sich Bauteile aus Polyurethanen in der Wärme etwa so ausdehnen wie Aluminium oder Stahl.

Das erleichtert beispielsweise die Verklebung von Blechkarosse und Polyurethan-Dachmodul. Derzeit entwickelt Bayer MaterialScience zusammen mit Partnern aus der Automobilbranche ein Dachmodul, das um mindestens ein Viertel leichter ist als ein herkömmliches Blechdach.

### Marcos Ramos Bosch, Reiner Paul, Detlef Mies und Stefanie Eiden

*Marcos Ramos Bosch leitet den Bereich Composites bei BaySystems, dem Polyurethan-Systempartner von Bayer MaterialScience. Reiner Paul und Detlef Mies sind dort in der Entwicklung tätig, und Stefanie Eiden arbeitet im Bereich Product Design and Nanotechnology bei Bayer Technology Services.*



Leicht dank Hohlräumen: Sandwich-Werkstoff mit Kern aus Papierwaben.



Sandwich-Ladeboden des VW Tiguan, gefertigt mit einem Polyurethan-Sprühsystem.

Batterien und Akkumulatoren begleiten uns im Alltag seit Jahrzehnten. Sie stellen der digitalen Gesellschaft die Energie zum Mitnehmen bereit. Die Entwicklung effizienter Elektroautos könnte der Erfolgsgeschichte der Batterie ein spannendes Kapitel hinzufügen.



## Vom Froschschenkel zum Lithium-Ionen-Akku

Vor mehr als 200 Jahren entdeckte Luigi Galvani im anatomischen Labor der Universität zu Bologna, dass ein abgetrennter Froschschenkel zuckt, wenn man in ihn zwei Drähte aus verschiedenen Metallen steckt und diese zusammenführt. Galvani nannte dieses Phänomen „animalische Elektrizität“. Mittlerweile sind aus der galvanischen Zelle, dem Volta-Element und den ersten einfachen Batterien aus hintereinander geschalteten Einzelzellen leistungsfähige und wieder aufladbare elektrochemische Energiespeicher in allen Größen geworden. Winzige Batterien stecken in Chipkarten, Knopfzellen treiben Uhren an und Lithium-Ionen-Akkus versorgen tragbare Geräte und Elektrowerkzeuge. Pro Jahr werden weltweit

vermutlich mehrere Milliarden Batterien und wieder aufladbare Akkus verkauft. Über 90 Prozent davon stammen aus Japan, Korea oder China. Im Wettrennen um effiziente Hybridantriebe und batteriebetriebene Automobile erlebt die Entwicklung neuer Batterien auch in Europa und den USA eine Renaissance. Damit verknüpft, gewinnt die elektrochemische Forschung an Bedeutung.

### Mehr Leistung und Sicherheit

Das Prinzip eines galvanischen Elements ist denkbar einfach, doch die Entwicklung von Batterien, die mehr Energie speichern, mehr Leistung liefern und im Falle von Akkus auch noch wieder aufgeladen werden können,

ist eine Herausforderung für die Forschung. Moderne Batterien bestehen zwar letztlich immer noch aus zwei Elektroden – Kathode und Anode – und dem Elektrolyten, die Anforderungen an Stabilität, Leistung und Sicherheit machen aber zusätzliche Komponenten notwendig. Dies zeigt das Beispiel der modernen Lithium-Ionen-Batterie: Inerte Separatoren müssen Anode und Kathode voneinander trennen und den Elektrolyten aufnehmen, elektronisch leitfähige Zuschlagstoffe sollen den Kontakt zwischen den Lithium-speichernden Elektrodenmaterialien und den Stromsammlern gewährleisten und weitere Komponenten verbessern den Aufbau von stabilisierenden Zwischenschichten. Wie die Brennstoffzelle ist die Batterie ein elektrochemi-

ches System, dessen Komponenten hervorragend aufeinander abgestimmt sein müssen, um die optimale Funktion zu gewährleisten.

Die aktuelle Forschung zu elektrochemischen Energiespeichern dreht sich primär um die Synthese und Funktion neuer Batteriekomponenten. Dass aber auch etablierte Batterien noch enorm verbessert werden können, zeigt die Entwicklung des wartungsfreien Bleiakkus. Neben den gängigen Batterien und Akkumulatoren für den Massenmarkt gibt es mittlerweile viele spezielle Systemen für verschiedenste Anwendungen – von der Zink/Luft-Batterie für die Stromversorgung elektrischer Weidezäune bis zum Nickelmetallhydrid-Akkumulator für den Antrieb von Hybridfahrzeugen.

## Schnellstraßen für Ionen

Besonders spannende Aufgaben für Batterieforscher sind die Suche nach neuen Ionenleitern sowie die

Aufklärung der Bewegung von Ionen in Flüssigkeiten. Der Ionen leitende Elektrolyt gewährleistet den inneren elektrischen Kontakt zwischen Anode und Kathode. Bei Stromfluss, also beim Be- und Entladen, trägt er aber auch wesentlich zum Innenwiderstand der Batterie und zu Leistungsverlusten durch Wärmeabgabe bei. Elektrolyte müssen also möglichst gute Ionenleiter sein. Sie sind meist flüssig oder zumindest so viskos, dass sich Ionen ohne allzu große Wärmeerzeugung in ihnen bewegen können. Es gibt aber auch eine Reihe von festen Stoffen, Gläsern oder Kristallen, die dank ihres atomaren Aufbaus ausgesprochen schnelle Bewegungspfade für Ionen bereitstellen.

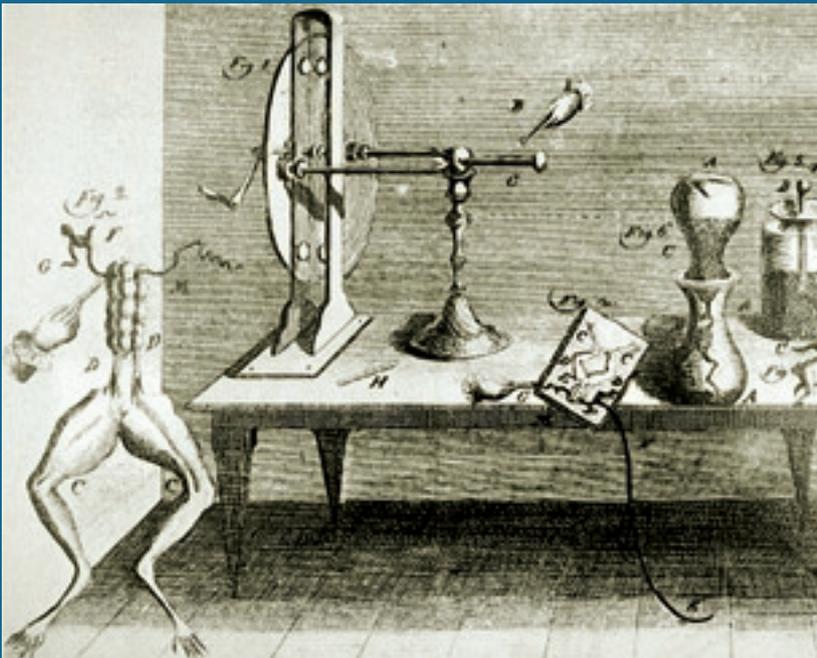
Feste Materialien, die Lithium-Ionen bei Raumtemperatur hinreichend gut leiten, werden noch intensiv gesucht. Im Falle des Natriums sind Chemiker bereits vor Jahren fündig geworden: Mit einem speziellen Natrium-Aluminiumoxid, das eine charakteristische

Schichtstruktur besitzt, konnte eine wieder aufladbare Batterie konstruiert werden, die auf der Reaktion von Natrium und Schwefel zu Natriumsulfid basiert. Da sie mit flüssigem Natrium bei Temperaturen über 300 Grad Celsius arbeitet und die keramische Natrium-Aluminiumoxid-Membran relativ empfindlich ist, eignet sich diese Batterie aus Sicherheitsgründen nicht für Autos. Sie wird aber in Japan derzeit für stationäre Anwendungen als Energiezwischenspeicher intensiv untersucht.

Zukünftig erlauben möglicherweise hybride Materialien, die aus hochviskosen Kunststoffen und anorganischen Substanzen gebildet werden und dadurch eine hohe innere Grenzfläche haben, die Entwicklung neuer Batterien. Solche hybriden Materialien könnten sogar gleichzeitig als Elektrolyt und Separator fungieren und somit den Zellaufbau vereinfachen. An derartigen Materialien arbeiten Chemiker bereits mit Hochdruck.

## Nanomaterialien für maximale Leistung

Beim Entladen von Batterien laufen die zentralen Prozesse an den Elektroden ab: An der Anode gibt ein Ausgangsmaterial Elektronen ab, dementsprechend nimmt ein anderes Material an der Kathode Elektronen auf. An der Kathode ist also die Zufuhr von Elektronen aus der metallischen Zuleitung nötig. Gleichzeitig muss der Elektrolyt positiv geladene Ionen zuführen oder negativ geladene Ionen abführen, um die lokale Elektroneutralität zu erhalten. Hier zeigt sich ein grundsätzliches kinetisches Problem: Das schnelle Be- und Entladen von Batterien erfordert nicht nur im üblicherweise flüssigen Elektrolyten, sondern auch in den festen Elektroden eine hinreichend schnelle Ionenbewegung, gepaart mit einer ausreichenden elektronischen Leitfähig-



Die Anfänge der Batterieforschung: Luigi Galvanis Experimente mit Froschschenkeln.

keit. Dass sich Ionen bei Raumtemperatur meist nur sehr langsam in festen Stoffen bewegen, ist ein wesentliches Problem für die Geschwindigkeit der Lade- und Entladezyklen. Um die Geschwindigkeiten zu erhöhen, müssen die Wege für die Ionen im Festkörper verkürzt werden. Das führt dazu, dass in Batterien möglichst Materialien verarbeitet werden, die aus sehr kleinen Partikeln, so genannten Kristalliten, bestehen. Und es liegt nahe, dass ein wesentlicher Ansatz der heutigen Materialforschung die Nanostrukturierung von Elektrodenmaterialien ist, besonders im Fall der Elektroden für Lithium-Ionen-Batterien. Bei der Nanostrukturierung werden Materialien entweder so weit zerkleinert, dass die einzelnen Kristallite nur noch wenige Nanometer ( $10^{-9}$  Meter) messen, oder sie werden durch gezielte Synthesen als Nanoteilchen oder als Stoffe mit Nanoporen hergestellt. Durch diese Elektrodenarchitektur mit Strukturen auf der Nanometer-Skala werden die Batterien besonders leistungsfähig.

### Knappe Rohstoffe für Batterien?

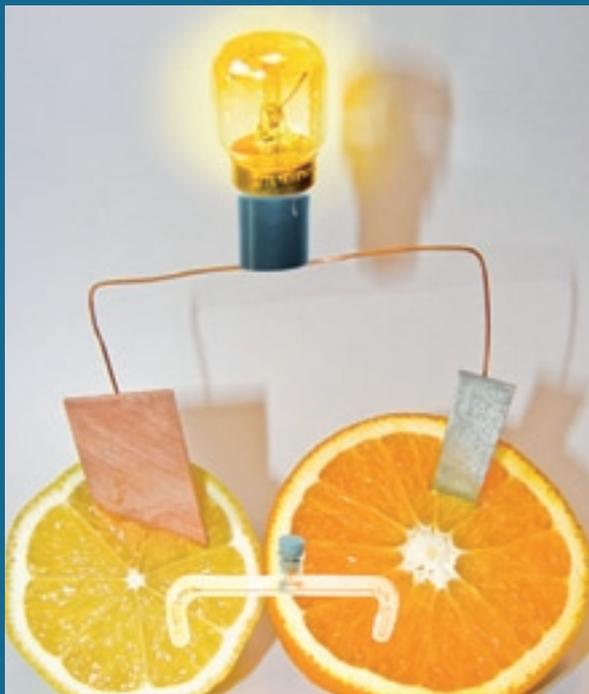
Als Folge der Massenproduktion könnte die Verfügbarkeit wichtiger chemischer Elemente ein Problem in der Entwicklung neuer Batterien werden. Viele Elemente, vor allem Übergangsmetalle wie Kobalt und Nickel, sind nicht grenzenlos verfügbar und haben sich bereits in den vergangenen Jahren deutlich verteuert. Deshalb verbessern Chemiker und andere Wissenschaftler nicht nur bekannte Batterien, sondern beschäftigen sich verstärkt auch mit dem Recycling von Batterien oder suchen ganz neue elektrochemische Lösungen.

Über zwei Jahrhunderte nach Luigi Galvanis Frosch-Experiment hat sich die Batterie vom Wegwerfartikel zum unverzichtbaren Bestandteil des technischen Inventars unserer mobilen Gesellschaft entwickelt. Nehmen wir an, dass sich diese Ausrüstung um elektronische Bücher, elektromechanische Hilfen für alte Leute, Roboter

und andere Dinge rasch erweitert, ist ein Stillstand dieser Entwicklung nicht zu erwarten.

### **Jürgen Janek**

*Der Autor ist Professor für Physikalische Chemie an der Justus-Liebig-Universität in Gießen und Leiter des TransMit-Zentrums für Festkörperionik und Elektrochemie.*



Batterie zum Selbstbasteln: In den Zitronenhälften stecken zwei verschiedene Metallplättchen, eins aus Kupfer, das andere aus Zink. Sobald der Stromkreis geschlossen wird – hier durch Drähte und die Elektrolytbrücke vorne im Bild – läuft in der Zitrone eine chemische Reaktion ab. Da Zinkatome ihre Elektronen weniger festhalten als Kupferatome, gibt Zink Elektronen an Kupfer ab – es fließt Strom und die Glühbirne leuchtet. Der Zitronensaft leitet den Strom und dient als Elektrolyt.

(Bild: Eva Mutoro/Gießen)

In Mobiltelefonen und anderen tragbaren Geräten sind Lithium-Ionen-Batterien längst unverzichtbar. Auch in Elektroautos könnten sie zukünftig als Energiespeicher dienen. Dafür aber müssen sie noch sicherer werden.



Dieses Test-Hybridauto fährt mit einer Lithium-Ionen-Batterie.

(Bild: Evonik)

## Lithium-Ionen-Batterien für Elektroautos

Unter den elektrischen Energiespeichern hat sich die Lithium-Ionen-Batterie als das zukunftsreichste System durchgesetzt. Wegen der hohen Zellspannung von 3,6 Volt speichern Lithium-Ionen-Akkus bezogen auf das Batterievolumen mehr Energie und geben mehr Leistung ab als herkömmliche Batterien. Beide Größen spielen unter anderem eine wichtige Rolle bei der Anwendung in Fahrzeugen: Die Menge der gespeicherten Energie entscheidet über die Reichweite eines Elektrofahrzeugs. Eine ausreichend hohe Leistungsdichte wiederum ist unverzichtbar beim Beschleunigen. Dank der hohen Zellspannung lassen sich leistungsstarke Lithium-Ionen-Batterien aus vergleichsweise wenigen

Zellen aufbauen. Außerdem weisen sie im Gegensatz zu Nickel-Batterien weder einen Memory-Effekt noch den so genannten Lazy-Battery-Effekt auf. Bei herkömmlichen Batterien verringern diese beiden Effekte die nutzbare Kapazität, wenn man die Batterien vor dem Wiederaufladen nur unvollständig entladen hat. Lithium-Ionen-Akkus hingegen lassen sich ganz oder teilweise entladen, ohne zu große Kompromisse hinsichtlich der Batterielebensdauer eingehen zu müssen. Weiteres Plus der Lithiumsysteme ist ihre nur geringe Selbstentladung. Das erhöht die Effizienz der Batterie und verhindert Schäden durch Lagerung.

### In Mobiltelefonen, Autos und Solaranlagen

Über 99 Prozent der Energiespeicher in Mobiltelefonen, Laptops, Kameras, MP3-Spielern und anderen tragbaren Geräten basieren bereits auf Lithium-Ionen-Akkus. Die modernen Energiespeicher eignen sich aber auch für viele andere Anwendungen, vor allem für Kraftfahrzeuge mit Hybrid- oder Vollelektroantrieb sowie für Elektroboote, Elektrofahrräder und Motorroller. Angesichts der stetig steigenden Kraftstoffpreise und der angestrebten Reduktion des Ausstoßes von Kohlendioxid werden diesen Antriebssystemen große Marktchancen vorhergesagt.

Als zukunftssträftig gilt ferner der Einsatz von Lithium-Ionen-Batterien in mobilen und stationären Speichersystemen in der Industrie – etwa in elektrischen Antrieben von Maschinen und Transporteinrichtungen – sowie in Energiespeichern in Industrie und Haushalt, die mit Strom aus Wind- und Solaranlagen gespeist werden. Der Vorteil: Stationäre Großbatterien auf Lithium-Basis lassen sich als Puffer nutzen, die sich bei Stromüberschuss aufladen und bei Versorgungsengpässen Strom liefern. So können sie Spitzenlasten reduzieren und Wohn- und Verwaltungsimmobilien optimal und unterbrechungsfrei mit Strom versorgen – das würde die Effizienz im Strommarkt deutlich steigern.

Prognosen zufolge wird das Marktvolumen für großformatige Lithium-Ionen-Batterien vermutlich im Jahr 2015 die Schwelle von 10 Milliarden Euro übersteigen. Voraussetzung für eine starke Marktdurchdringung ist, dass Leistung und Lebensdauer von Lithium-Ionen-Batterien weiter gesteigert, die Sicherheit erhöht und die Kosten gesenkt werden.

### Speziell strukturierte Elektroden

Elektroden für Lithium-Ionen-Batterien bestehen üblicherweise aus winzigen, nur wenige Mikrometer großen Partikeln aus Aktivmaterial, die auf einer Metallfolie, dem Stromsammelr, in einer etwa 20 bis 200 Mikrometer dicken Schicht gebunden sind. Auf der negativen Elektrode befinden sich beispielsweise Graphitpartikel, auf der positiven Elektrode winzige Teilchen aus Lithiummetalloxiden. Die Partikel können Lithium-Ionen speichern und wieder abgeben und machen so das Laden und Entladen der Batterie möglich.

Für die Beschichtung werden die Partikel in einem Lösungsmittel zusammen mit einem Bindemittel fein verteilt. Die genaue Zusammensetzung dieser Dispersion wird dem jeweiligen Beschichtungsverfahren und den gewünschten elektrochemischen Parametern der Elektroden angepasst. Das Flächengewicht der Schicht, ihre Höhe, Breite und Porosität sowie ihre Kontur bestimmen die Eigenschaften des Lithium-Ionen-Akkus. Weiß man,

wie sich die Struktur der Elektroden auf die Eigenschaft der Zelle auswirkt, kann man die Elektroden quasi der jeweiligen Anwendung maßschneidern. So braucht man beispielsweise für Zellen, die pro Volumen viel Energie speichern sollen, dicke Elektroden mit viel Aktivmaterial. Die dicke Schicht weist aber auch einen hohen Widerstand auf, so dass die Leistungsdichte geringer ist. Dünne Schichten hingegen führen zu leistungsstärkeren Batterien, die aber vergleichsweise weniger Energie speichern können.

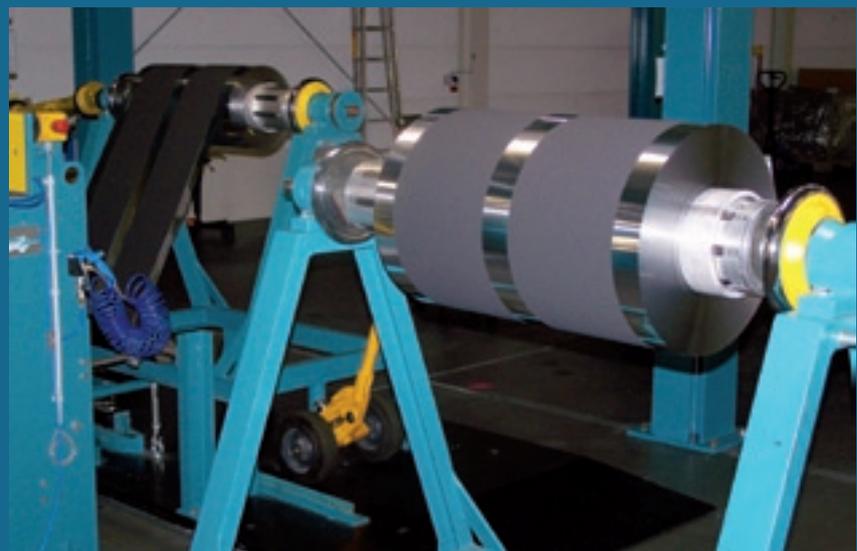
### Keramische Membran statt Plastikfolie

In der Lithium-Ionen-Batterie trennt eine Membran die negative von der positiven Elektrode und sorgt so für die Funktionsfähigkeit der Zelle. Als Trennmembran in der Verbraucherelektronik werden derzeit poröse Folien aus den Kunststoffen Polyethylen oder Polypropylen eingesetzt, die allerdings bei Temperaturen oberhalb von 140 beziehungsweise 170 Grad Celsius schmelzen. Eine Überhitzung, die bei hohen



**Keramik von der Rolle: Der keramische Separator steigert die Sicherheit von Lithium-Ionen-Akkus.**

(Bild: Evonik)



**Eine Rolle Kathodenmaterial für Lithium-Ionen-Akkus.**

(Bild: Evonik)

Belastungen oder bei Missbrauch in großen Batterien auftreten kann, überstehen die Folien daher nicht. Solche Temperaturspitzen können dann Kurzschlüsse verursachen, die zu einem Versagen der Batterie führen.

Für Hochleistungsbatterien haben Wissenschaftler von Evonik eine flexible keramische Membran entwickelt. Sie besteht aus einem Kunststoff mit keramischer Beschichtung. Wegen ihrer keramischen Eigenschaften ist diese Trennfolie den bislang eingesetzten Filmen aus Polyethylen oder Polypropylen deutlich überlegen. Die keramische Folie ist beständiger gegen Hitze und Chemikalien, lässt sich schneller mit Elektrolyten benetzen und zeigt ein hervorragendes Ladeverhalten. Sicherheitstests haben gezeigt, dass die keramische Folie große Lithium-

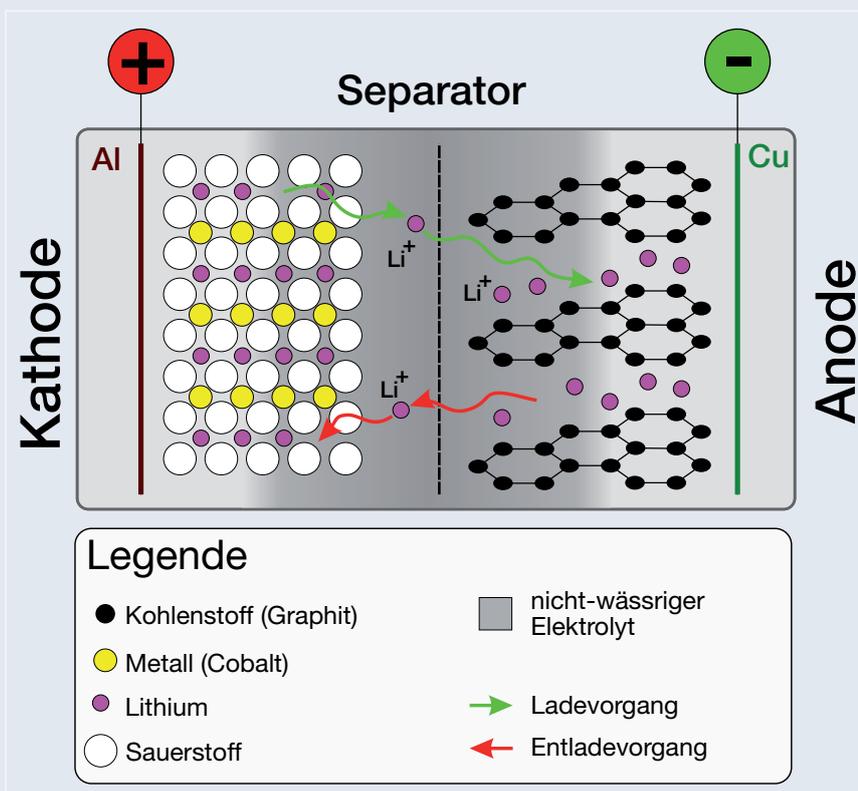
ionen-Batterien so sicher macht, dass sie in modernen Hybrid- und Vollelektroantrieben eingesetzt werden können.

In der Vergangenheit sind Versuche, vollelektrische Fahrzeuge in den Markt zu bringen, hauptsächlich an der Batterietechnik gescheitert. Getestet wurden Blei-, Nickel-Cadmium- und die weniger bekannte Zebra-Batterie, eine Natrium-Nickelchlorid-Batterie. Heutige Hybridfahrzeuge verwenden Nickelmetallhydrid-Batterien, die den Lithiumionen-Batterien aber hinsichtlich Energie- und Leistungsdichte deutlich unterlegen sind. Ein zu Testzwecken mit einer Lithium-Ionen-Batterie ausgerüstetes Hybridauto hat inzwischen mehr als 70 000 Kilometer zurückgelegt und bewiesen, dass die neue Batterietechnik alltagstauglich ist.

#### Ernst Robert Barensee

*Der Autor ist Leiter Lithium-Ion Technology bei Creavis Technologies & Innovation, einer Forschungseinheit von Evonik Degussa.*

## So funktioniert die Lithium-Ionen-Batterie



Eine Lithium-Ionen-Batterie besteht aus Anode, Kathode, Separator und Elektrolyt. Der Separator trennt Anode und Kathode elektrisch voneinander, während der Elektrolyt, der die Elektroden und den Separator durchtränkt, die ionische Leitfähigkeit sicherstellt.

Anode und Kathode bestehen aus dünnen Metallfolien als Stromsammelern. Darauf aufgebracht werden Aktivmaterialien, die Lithium-Ionen einlagern und wieder abgeben können. Im entladenen Zustand befinden sich die Lithium-Ionen in der Kathode. Wird nun ein Ladestrom angelegt, fließen die Ionen durch den Elektrolyten zur Anode und werden dort eingelagert. Bei der Entladung kehrt sich dieser Prozess um. Durch die Verwendung bestimmter Aktivmaterialien ist dieser Prozess hoch reversibel und ermöglicht einer Lithium-Ionen-Batterie viele Lade- und Entladezyklen.

Wasserstoff kann erst als Kraftstoff eingesetzt werden, wenn es entsprechende Tanks für Autos gibt. Neue metallorganische Speicher-materialien könnten das Problem lösen.



Unter dem Elektronenmikroskop: Nanowürfel aus metallorganischen Gerüstmaterialien könnten das Problem der Speicherung von Wasserstoff lösen.

(Bild: BASF)

## Maßgeschneiderte Speichermaterialien

Die Vorräte an fossilen Rohstoffen sind begrenzt und ihre weitere Verbrennung führt zu gravierenden klimatischen Veränderungen. In einer alternativen Energiewirtschaft aus regenerativen Quellen benötigt man besonders für den mobilen Einsatz einen effizienten Energieträger. Als aussichtsreicher Kandidat bietet sich aufgrund seines hohen gewichtsspezifischen Energieinhalts der Wasserstoff an. Sein großer Vorteil: Bei der Nutzung im Verbrennungsmotor oder bei der noch effizienteren Umwandlung in der Brennstoffzelle entsteht nur Wasser.

Ein bislang ungelöstes Kernproblem im mobilen Einsatz der Wasserstofftechnik ist die Speicherung von Wasserstoff, denn um mit den heutigen

Benzin- oder Dieseltanks konkurrieren zu können, reicht die volumen- und gewichtsbezogene Speicherdichte der Wasserstofftanks noch nicht aus. Außerdem sollte das Tanken nicht länger als fünf Minuten dauern und das Speichersystem nicht mehr als 100 Euro pro Kilogramm gespeichertem Wasserstoff kosten.

Die momentan verfügbaren Tanks speichern Wasserstoff entweder als Gas unter hohen Drücken oder als Flüssigkeit bei extrem niedrigen Temperaturen. Sie weisen allerdings prinzipielle Nachteile auf: Die Flüssigtanks sind zu voluminös, und die Gastanks sind den meisten Verbrauchern wegen der hohen Drücke nicht geheuer. Eine Lösung dieser Probleme wäre die

Speicherung in leichten Festkörpern, die Wasserstoff entweder chemisch oder physikalisch binden.

### Chemische Speicherung als Hydrid

Bei der chemischen Speicherung, der so genannten Chemisorption, werden hauptsächlich Hydridspeicher untersucht, die reversibel im Fahrzeug beladen werden können. Hydride sind chemische Verbindungen aus Metallen und Wasserstoff. Bei dieser Art der Speicherung spaltet sich das Wasserstoffmolekül an der Metalloberfläche und wird dann im Metall eingelagert. So lässt sich in einem Metall pro Volumen mehr Wasserstoff speichern als in flüssiger Form.

Die Speicherung von Wasserstoff in einem Metall wurde bereits 1866 für Palladium beobachtet. Allerdings speichert Palladium, bezogen auf sein Gewicht, nur relativ wenig Wasserstoff. Andere Elemente, beispielsweise Titan und Magnesium, nehmen zwar mehr Wasserstoff auf, geben ihn aber erst bei Temperaturen über 250 Grad Celsius wieder ab. Diese Metalle können daher nicht als Wasserstoffspeicher für Autos eingesetzt werden.

Schon besser geeignet sind die so genannten komplexen Hydride aus Alkalimetallen und Aluminium. Mitte der 1990er-Jahre entdeckten die Forscher Borislav Bogdanovic und Manfred Schwickardi vom Max-Planck-Institut für Kohlenforschung in Mülheim an der Ruhr, dass ein solches Hydrid aus Na-

trium und Aluminium schon bei etwa 100 Grad Celsius mit Wasserstoff be- und entladen werden kann, wenn man es mit geringen Anteilen Titan versetzt. Seit dieser Entdeckung wird diese Substanz – ein Natriumalanat der chemischen Formel  $\text{NaAlH}_4$  – intensiv untersucht und ist heute das am weitesten entwickelte Speichersystem unter den komplexen Hydriden.

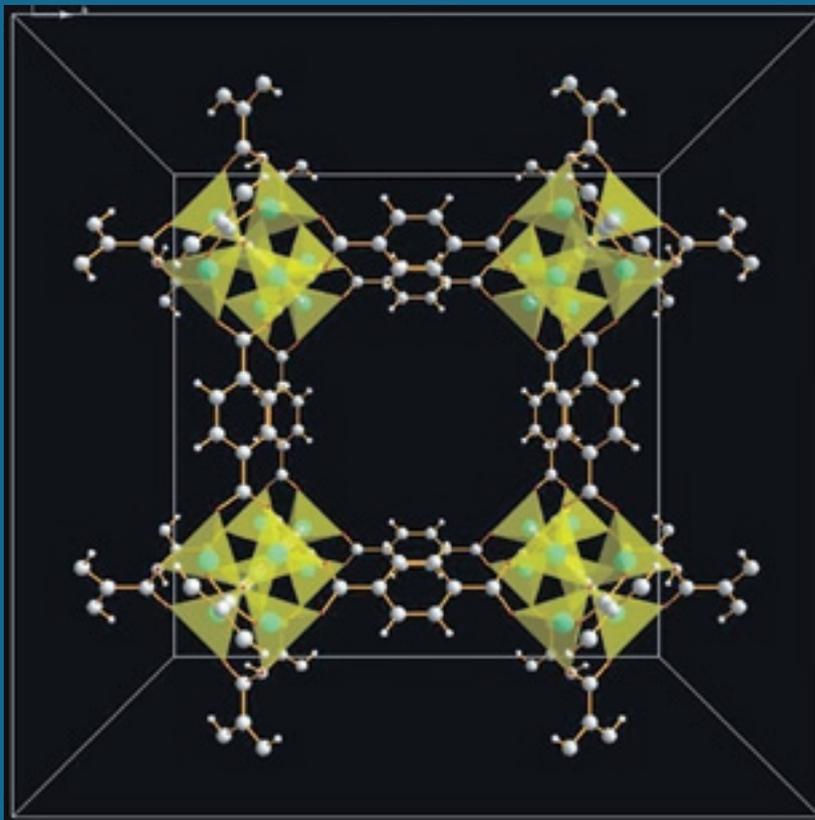
Theoretisch kann dieses Titan-dotierte Natriumalanat 5,6 Gewichtsprozent Wasserstoff reversibel speichern, also 56 Gramm Wasserstoff pro Kilogramm Speichermaterial. Viele andere Leichtmetallhydride, die derzeit ebenfalls intensiv erforscht werden, speichern zwar mehr, geben den Wasserstoff aber erst bei Temperaturen von über 200 Grad Celsius wieder frei.

Ein prinzipielles Problem bei allen Hydridspeichern ist die Bindungswärme, die beim schnellen Tanken entsteht und durch eine aufwendige Tankkonstruktion mit einer zusätzlichen externen Kühlung während des Tankvorgangs abgeführt werden muss.

## Physikalische Bindung bei tiefen Temperaturen

Bei der zweiten Variante der Wasserstoffspeicherung in Festkörpern, der Physisorption, bindet der Wasserstoff nicht chemisch, sondern über Anziehungskräfte, die so genannten Van-der-Waals-Kräfte, an die Oberfläche des Festkörpers. Da diese Van-der-Waals-Kräfte relativ schwach sind, können große Mengen Wasserstoff so nur bei tiefen Temperaturen, etwa bei der Temperatur von flüssigem Stickstoff (-196 Grad Celsius), gespeichert werden, und zwar am besten von Materialien mit Nanoporen. Diese besitzen wegen ihrer zahlreichen winzigen Poren eine große innere Oberfläche, die den Wasserstoffmolekülen viel Platz zur Anlagerung bietet. Die innere Oberfläche ist um ein Vielfaches größer als die äußere Oberfläche des Materials.

Aktivkohle beispielsweise besitzt eine innere Oberfläche von über 2000 Quadratmetern pro Gramm, oder anders ausgedrückt: Aktivkohle vom Volumen eines Würfelzuckers hat eine innere Oberfläche von der Größe eines halben Fußballfeldes. Für kristalline Materialien zeigten bislang Zeolithe – Gerüststrukturen aus Aluminium, Silizium und Sauerstoff – die höchsten Werte mit etwa 900 Quadratmetern pro Gramm. Vor wenigen Jahren aber wurden völlig neue Materialien hergestellt, die den Wasserstoffmolekülen eine Anlagerungsfläche von teils mehr als 4000 Quadratmetern pro Gramm bieten. Diese neuen Speicherstoffe bestehen aus Clustern von Metalloxiden, die über organische Moleküle verbun-



Struktur von MOF-5: An den Ecken sitzen je vier Zinkoxid ( $\text{Zn}_4\text{O}$ )-Tetraeder (gelb), die durch Benzolabkömmlinge verbunden sind.

den sind und so ein dreidimensionales poröses Netzwerk aufbauen. Wegen ihrer chemischen Struktur nennt man die neuen Verbindungen metallorganische Gerüststrukturen oder kurz MOFs (von Metal-Organic Frameworks). MOFs besitzen die geringste Dichte aller bisher bekannten kristallinen Materialien. Wegen ihrer außerordentlich „löchrigen“ Struktur können sie, wie erste Messungen zeigten, bei tiefen Temperaturen viel mehr Wasserstoff aufnehmen als alle anderen kristallinen mikroporösen Materialien. Die Wasserstoffspeicherung in MOFs beruht auf der Physisorption, das heißt, dass sich Wasserstoffmoleküle an die große innere Oberfläche anlagern.

### Großtechnische Herstellung von MOFs

Bislang wurden schon über 2000 verschiedene MOFs synthetisiert. Davon eignen sich aber nur jene für die technische Anwendung, die eine hohe innere Oberfläche besitzen und zudem kostengünstig hergestellt werden können. Ein Beispiel ist ein Gerüst namens MOF-5, das bei einem Druck von etwa 50 Bar und der Temperatur von flüssigem Stickstoff (-196 Grad Celsius) gute fünf Gewichtsprozent Wasserstoff speichert. Diese Speicherkapazität ist mehr als doppelt so groß wie die der besten Zeolithe und vergleichbar mit jener der besten Kohlenstoffmaterialien. Vor kurzem wurden sogar MOFs

mit Oberflächen bis 4700 Quadratmetern pro Gramm hergestellt, die bis zu sieben Gewichtsprozent Wasserstoff speichern.

Auch die kostengünstige großtechnische Produktion von MOFs gelingt bereits. Das Chemieunternehmen BASF kann die Gerüstmaterialien in einem elektrochemischen Verfahren bei Raumtemperatur und Normaldruck herstellen. Damit ist die Wasserstoffspeicherung durch Physisorption an MOFs eine Alternative zur chemischen Speicherung in Hydriden.

Chemiker können bei der Herstellung der MOFs die chemische Zusammensetzung, die Porengrößen und die Porengrößenverteilung gezielt verändern. So lassen sich die Wechselwirkungen zwischen Wasserstoff und dem Speichermaterial im Detail untersuchen. Die große Herausforderung besteht darin, die Porengröße der MOFs zu optimieren, ohne die Oberfläche zu reduzieren. So lässt sich das Speichermaterial dem Energieträger Wasserstoff quasi auf den Leib schneiden.

#### Michael Hirscher

*Der Autor leitet die Arbeitsgruppe Wasserstoffspeicherung am Max-Planck-Institut für Metallforschung in Stuttgart.*

In Zeiten steigender Energiepreise haben Solaranlagen Hochkonjunktur, denn die Sonne ist eine schier unerschöpfliche Energiequelle. Auch Sand, Rohstoff für Solarzellen aus Silizium, gibt es reichlich. Nur die Umwandlung von Sonne in Strom muss noch effizienter werden.



## Vom Sand zur Solarzelle

Die Strahlung der Sonne bestimmt direkt oder indirekt alle wesentlichen Vorgänge der gesamten belebten Natur. Für den Lebenszeitraum der Menschheit ist diese Quelle der Energie unerschöpflich – und sie ist, abgesehen von den Ausgaben für die Anlage, kostenlos, sauber und frei von politischem Einfluss.

Es gibt verschiedene Konzepte, Sonnenenergie zu nutzen. Eines davon ist die Photovoltaik, bei der Solarzellen die Strahlung der Sonne in Strom umwandeln. Die Photovoltaik nutzt den photoelektrischen Effekt, also die Tatsache, dass Sonnenlicht positive und negative Ladungsträger in einem Festkörper freisetzen kann.

### Bald günstigere Solarzellen

Die heute eingesetzten Solarzellen bestehen aus einem Halbleitermaterial. Halbleiter sind Stoffe, die unter Zufuhr von Licht oder Wärme elektrisch leitfähig werden, während sie bei tiefen Temperaturen isolierend wirken. Der Halbleiter absorbiert das eingestrahelte Sonnenlicht und baut eine elektrische Spannung auf, denn der Lichteinfall setzt negativ geladene Elektronen frei, die sich bewegen können. Dadurch entstehen gleichzeitig positiv geladene, ebenfalls bewegliche Löcher. Diese positiven und negativen Ladungen werden über Kontaktflächen, die sich auf der Vorder- und Rückseite der Solarzelle befinden, quasi aufgesammelt. Die Kontaktfläche an der Rückseite, der Pluspol, ist eine

vollflächige, dünne Schicht aus Aluminium. Auf der Vorderseite bilden Kontaktfinger aus dünnen Silberleitbahnen den Minuspol. Die Ladungsträger werden über Sammelschienen, auch Busbar genannt, gesammelt. Die elektrische Energie fällt als Niedervolt-Gleichstrom an und wird nach Umwandlung in Wechselstrom direkt verbraucht oder ins Stromnetz eingespeist.

Über 90 Prozent der weltweit produzierten Solarzellen bestehen aus dem Halbleitermaterial Silizium, das als das zweithäufigste Element der Erdrinde in Quarzsand, chemisch: Siliziumdioxid, und anderen Mineralen ausreichend vorhanden ist. Allerdings ist die Herstellung von hochreinem Silizium für Solarzellen teuer. Zudem

können die derzeitigen Fertigungsstätten den Bedarf nicht decken. Beides schränkt die Wettbewerbsfähigkeit des Solarstroms aus Silizium-basierten Solarzellen momentan noch ein. Angeregt durch die enorm gestiegene Nachfrage nach Solarzellen werden die Produktionskapazitäten für Solarsilizium aber jetzt ausgebaut. Die Preise dürften dadurch fallen, und die Kosten für die Gewinnung von Solarstrom werden sich denen des Stroms aus fossilen Brennstoffen nähern.

### Begrenzter Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad einer Solarzelle gibt an, wie viel einfallendes Licht sie in elektrischen Strom umwandelt. Der theoretische Wirkungsgrad von Solarzellen auf Siliziumbasis beträgt zwar 25 Prozent. Für industriell gefertigte Solarzellen liegt er aber bislang nur zwischen 13 und 18 Prozent. Das hat mehrere Gründe.

Geschnittene und gereinigte Siliziumscheiben, so genannte Wafer, ha-



**Nicht nur auf Dächern lassen sich Solaranlagen installieren. Photovoltaikkraftwerke, wie hier im bayrischen Miesbach, sind im Kommen.**

(Bild: Oxaion)

ben eine silbrig glänzende Oberfläche, die etwa 40 Prozent der einfallenden

Sonnenstrahlen reflektiert. Um möglichst viel Sonnenlicht in Strom umzuwandeln, sollte die Reflexion so klein wie möglich sein. Die Vorderseite des Siliziumwafers wird daher chemisch behandelt, üblicherweise angeätzt, damit sie weniger Licht reflektiert. Außerdem wird zusätzlich eine Antireflexionsschicht aufgebracht, vergleichbar der Beschichtung von Brillengläsern. Diese Schicht besteht aus Siliziumnitrid und bedingt die dunkelblaue Farbe der Solarzellen.

Für einen optimalen Lichteinfall sollte die Vorderseite des Siliziumwafers vollständig der Lichteinstrahlung zur Verfügung stehen. Solarzellen werden daher dort installiert, wo die Sonneneinstrahlung am größten ist, also etwa auf Dächern, die nach Süden, Südosten oder Südwesten zeigen. Die auf der Vorderseite angebrachten Kontakte verkleinern die bestrahlbare Fläche jedoch, da das Sonnenlicht nicht durch die Kontakte scheitern kann. Man versucht daher diese Beschattung durch möglichst dünne Linien der Kontaktfinger so gering wie möglich zu halten.



**Solarzellen auf einem Münchener Mehrfamilienhaus.**

(Bild: Gehriker Umweltschonende Energiesysteme GmbH)



**Ein Mitarbeiter vom TÜV Rheinland prüft die Haltbarkeit von Photovoltaik-Modulen mit dem Hagelschlag-Test. Dabei werden genormte Hagelkörner mit einer genau festgelegten Geschwindigkeit auf die Module geschossen.**

(Foto: TÜV Rheinland)

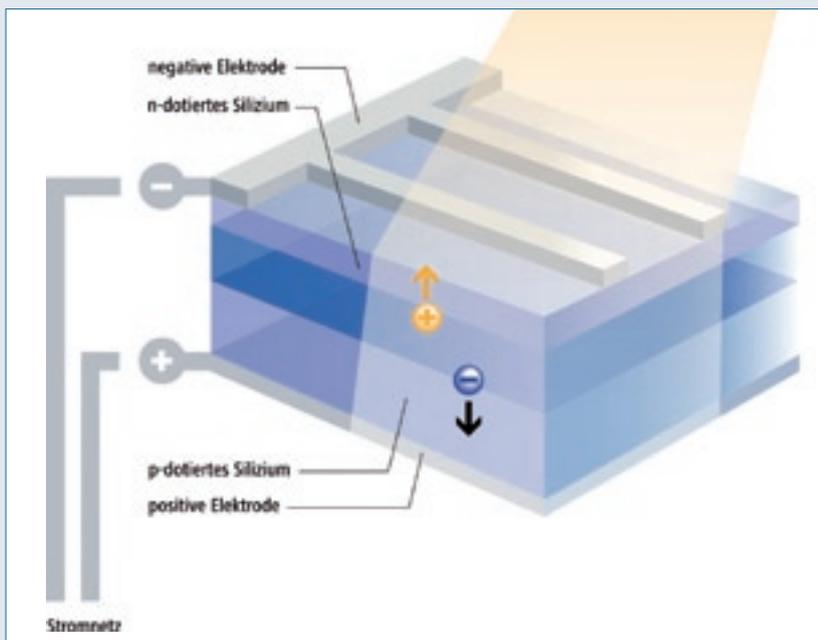
## So wird solares Silizium hergestellt

Zur Herstellung einer Solarzelle werden in das Halbleitermaterial Silizium Fremdatome eingebaut, die entweder mehr oder weniger Elektronen als Silizium zur Verfügung stellen. Bei einem so erzeugten Überschuss an negativ geladenen Elektronen spricht man von n-Dotierung; bei einem Mangel, anders ausgedrückt: bei einem Überschuss an positiv geladenen Löchern, von p-Dotierung.

Die p-dotierte Schicht enthält einen geringen Anteil Bor, das im Herstellungsprozess schon der Siliziumschmelze zugegeben wird. Anschließend kristallisiert die Schmelze zu monokristallinen Siliziumzylindern, die aus einem einzigen Siliziumkristall bestehen, oder zu polykristallinen Siliziumblöcken. Aus den Zylindern oder Blöcken werden dünne Scheiben der Stärke 0,15 bis 0,3 Millimeter gesägt, die so genannten Siliziumwafer. Die n-Dotierung der Wafer erfolgt bei über 800 Grad Celsius in einer Gasatmosphäre mit phosphorhaltigen Sub-

stanzen. Dabei diffundiert eine Phosphorschicht etwa 0,001 Millimeter tief in den Siliziumwafer. Im weiteren Prozess bleibt diese Phosphordotierung nur auf der Vorderseite, also der später dem Sonnenlicht zugewandten Seite der Siliziumwafer erhalten.

Die Dotierung ist entscheidend für die Umwandlung von Sonnenenergie in Strom: Bei Einstrahlung von Sonnenlicht werden elektrische Ladungsträger – also negativ geladene Elektronen und positiv geladene Löcher – im Silizium freigesetzt, die sich nicht begegnen dürfen, denn dann würden sie sich neutralisieren und es würde kein Strom fließen. An der Grenzfläche zwischen den p- und n-dotierten Schichten trennen sich die beiden Ladungsträger: Die Elektronen fließen auf die p-dotierte Rückseite und die Löcher auf die n-dotierte Vorderseite des Siliziumwafers. Dieser Vorgang stoppt, wenn kein Sonnenlicht einfällt, startet aber bei Sonnenschein sofort wieder.



Schema eines Wafers: Sonnenlicht setzt negativ geladene Elektronen und positive geladene Löcher frei, die zu den Elektroden wandern. (Bild: guukaa, fotolia.com)

Bei zu dünnen Kontaktfingern erhöht sich jedoch der elektrische Widerstand und die Leistung der Solarzelle nimmt ab. Heute werden mit Siebdruck Kontaktfinger aus Silber aufgebracht, die 0,02 Millimeter dick und 0,05 bis 0,1 Millimeter breit sind.

Den Wirkungsgrad limitiert auch, dass eine Solarzelle aus Silizium nur einen Ausschnitt aus dem Strahlungsspektrum der Sonne nutzt, denn Silizium absorbiert nicht über den gesamten Strahlungsbereich der Sonne.

### Noch ausbaufähig

Die Stromausbeute einer einzelnen Solarzelle aus Silizium, die 150 mal 150 Millimeter misst, beträgt etwa 0,5 Volt. In der Regel sind acht bis über 50 solcher Einzelzellen zu Solarmodulen zusammengeschaltet. Zum Schutz vor Niederschlägen, Staub und anderen Einflüssen werden die Module hermetisch gekapselt, das heißt, sie werden in einen Rahmen hinter einer gehärteten Glasscheibe montiert und auf der Rückseite mit Kunstharz vergossen. Etablierte Hersteller von Solarzellmodulen geben eine Laufzeitgarantie von bis zu 20 Jahren.

Die Solartechnik funktioniert, ihre physikalischen Grenzen sind aber noch nicht erreicht. Durch umfassende Forschung und Entwicklung sowie die Optimierung der Herstellung wird sich die Energiegewinnung mit Solarzellen weiter etablieren.

### Christina Modes

Die Autorin leitet die Business Unit Thick Film der Thick Film Material Division beim Edelmetall- und Technologiekonzern Heraeus in Hanau.

Der Markt für Solarenergie boomt. Noch bestehen die meisten Photovoltaik-Anlagen aus dem anorganischen Halbleiter Silizium, doch organische Solarzellen sind im Kommen.



(Bild: Tobias Marx, fotolia.com)

## Strom aus Plastik

Die Bedeutung von regenerativen Energien nimmt stetig zu. Durch das Gesetz über erneuerbare Energien und der damit verbundenen Förderung von Solarstrom wächst allein der Markt für Solarenergie in Deutschland jährlich um bis zu 40 Prozent. Momentan bestehen etwa 90 Prozent der verkauften Solarzellen aus Silizium. Doch die Bedeutung anderer Verfahren steigt, denn die Herstellung von Silizium-Solarzellen benötigt viel Energie und die bestehenden Produktionsanlagen können die Nachfrage kaum noch decken.

Hier kommen organische Solarzellen ins Spiel. Sie nutzen in ihrer photoaktiven Schicht organische Farbstoffe, die extrem viel Licht absorbieren. Dabei gilt: Je höher die Absorption ist, desto

dünnere kann die photoaktive Schicht und damit die Solarzelle gestaltet werden. Organische Solarzellen sind daher biegsamer, formanpassungsfähiger und leichter als solche aus Silizium. Von Vorteil ist auch, dass ihre Produktion kostengünstiger und weniger energieintensiv ist, da keine Hochtemperatur- und Vakuumprozesse erforderlich sind. Mit einem gezielten Design der Farbstoffmoleküle lassen sich zudem die Eigenschaften der Solarzelle, vor allem ihre Absorption und damit der Wirkungsgrad, modifizieren.

In einer organischen Solarzelle ist die das Sonnenlicht absorbierende Schicht zwischen zwei Elektroden eingebettet. Die negative Elektrode besteht aus Aluminium, Kalzium oder

Magnesium, die positive Elektrode aus einem transparenten, leitfähigen Oxid. Meist wird das teure Indium-Zinn-Oxid verwendet. Es gibt bereits kommerzielle Träger aus Glas oder Folien aus Kunststoff, die mit Indium-Zinn-Oxid beschichtet sind und dem Ganzen Stabilität verleihen.

### Ausgeklügelte Ladungstrennung

In der photoaktiven Schicht einer organischen Solarzelle laufen drei wesentliche Schritte ab: Zunächst regt die Absorption von Sonnenlicht Elektronen der organischen Moleküle an, sodass sie aus dem höchsten besetzten Molekülorbital (HOMO von highest occupied molecular orbital) eine Stufe höher springen, und zwar in das niedrigste

unbesetzte Molekülorbital (LUMO von lowest unoccupied molecular orbital). Dadurch entstehen freie Plätze im HOMO. An diese Löcher sind die Elektronen über elektrostatische Wechselwirkungen gebunden und dadurch im Molekül gefangen – Strom fließt aber erst, wenn die Elektronen beweglich sind. Löcher und Elektronen müssen also getrennt werden.

Diese Ladungstrennung geschieht im nächsten Schritt, bei dem die angeregten Elektronen wieder auf energetisch tiefer liegende Niveaus zurückfallen. Der Trick in der Solarzelle ist nun, dass man die Elektronen nicht in „ihren“ Molekülen auf ein tiefer liegendes Energieniveau zurück springen lässt, sondern in Molekülorbitale von anderen Molekülen. Man konstruiert die Solarzelle also aus zwei Sorten Molekülen: Die einen geben leicht Elektronen ab, die anderen nehmen leicht welche auf. Damit der Elektronenübergang funktioniert – und zwar ohne, dass das Loch mit dem Elektron mitwandert –, müssen die Orbitale der verschiedenen Moleküle energetisch genauestens aufeinander abgestimmt werden.

Im dritten und letzten Schritt wandern die auf diesem Weg getrennten Löcher und Elektronen zu den jeweiligen Elektroden – es fließt ein Strom. Da sich die Ladungsträger in organischen Halbleitern wesentlich schlechter fortbewegen können als in anorganischen, dürfen die organischen Schichten nur einige hundert Nanometer dick sein. Das ist aber kein Problem, da die organischen Farbstoffe extrem viel Licht absorbieren und das Manko in der Leitfähigkeit damit kompensieren.

Die verschiedenen Typen von organischen Solarzellen unterscheiden sich in den Licht absorbierenden Substanzen. Man kann Kunststoffe einsetzen, also große organische Polymere, oder eher kleine Moleküle oder Mischungen aus beiden. Entscheidend ist dabei, dass die verschiedenen Molekülsorten so aufeinander abgestimmt sind, dass sie sich leicht Elektronen übergeben.

In der Produktion ist es am einfachsten, wenn man erst eine Molekülsorte als Schicht auf den Träger aufbringt und dann die andere. Doch dieses Doppelschichtkonzept ist nicht

sehr effektiv, da die beiden Moleküle nur an der Grenzfläche in Wechselwirkung treten. Man mischt sie daher besser in einer Schicht.

## Solarzellen aus Polymeren

Bei den polymeren Solarzellen sitzen in der photoaktiven Schicht zwei verschiedene Polymere, die viel Licht absorbieren und dabei unterschiedliche Bereiche des Sonnenspektrums abdecken. Problematisch ist allerdings das Auftragen der beiden Polymere auf den Träger, denn sie mischen sich nur schlecht und bilden daher auf dem Träger getrennte Bereiche, die einige Mikrometer messen. Das mag nicht dramatisch erscheinen, doch schon diese Phasentrennung im Mikromaßstab führt zu Verlusten bei der Absorption des Sonnenlichts.

Als Alternative verwendet man so genannte Block-Copolymere. Sie bestehen aus zwei Polymeren, die über chemische Bindungen miteinander verknüpft sind. Allerdings gibt es nicht viele Block-Copolymere, die sich für den Einsatz in Solarzellen eignen.



Apparatur zur Charakterisierung organischer Solarzellen

(Bild: © Universität Freiburg)



Organische Solarzellen sind flexibler als solche aus Silizium.

(Bild: © Siemens Pressebild)

Eine andere Möglichkeit ist, die Polymere als Nanopartikel abzuscheiden, die zwischen 40 und 100 Nanometer messen. Für diese Methode verwendet man entweder Nanopartikel, die schon beide Polymere enthalten, oder eine Mischung aus zwei Sorten Nanopartikeln, die jeweils aus nur einem Polymer bestehen.

Die Wirkungsgrade von polymeren Solarzellen sind noch gering, sie liegen bisher unter zwei Prozent. Zum Vergleich: Industriell gefertigte Solarzellen aus Silizium erreichen Wirkungsgrade zwischen 13 und 18 Prozent.

### Kleinere Moleküle, höhere Wirkungsgrade

Höhere Wirkungsgrade von fast sechs Prozent erreichen Solarzellen mit kleinen Molekülen als Lichtabsorber. Sie werden über thermisches Verdampfen im Hochvakuum hergestellt, ein Verfahren, das für die Serienfertigung von Displays aus organischen Leuchtdioden (siehe Beiträge auf den Seiten 12 und 15) entwickelt wurde. In den älteren Solarzellen dieses Typs liegen die Elektronen-gebenden und die Elektronen-aufnehmenden Moleküle in getrennten Schichten vor. Ein neueres Konzept sind die so genannten pin-Solarzellen (siehe Kasten), bei denen dotierte Halbleiterschichten den Ladungstransport verbessern.

Die höchsten Wirkungsgrade versprechen organische Solarzellen, die Polymere und kleine Moleküle kombinieren. Mischt man beispielsweise geeignete Polymere und Fullerene, sollten sogar Wirkungsgrade bis zehn Prozent möglich sein. Fullerene sind kugelförmige Verbindungen aus Kohlenstoff. Das bekannteste unter ihnen ist  $C_{60}$ , wegen seiner Form auch als Fußballmolekül bezeichnet. Damit beim Elektronenübergang von den Polymeren auf die Fullerene weniger Energie verloren

geht, müssen die Materialien aber noch besser aufeinander abgestimmt werden. Auch den roten und infraroten Bereich des Sonnenlichts nutzen diese Zelltypen noch nicht ausreichend.

Verbesserungen erhofft man sich von neuen Herstellungsbedingungen, beispielsweise anderen Prozesstemperaturen oder einem anderen Verhältnis von Polymer zu Fulleren. Schon durch einfaches Härten der Solarzelle mit Chemikalien oder Wärme kann beispielsweise die Anordnung der Moleküle derart verbessert werden, dass sich Parameter wie die Absorption oder die Beweglichkeit der Ladungsträger erhöhen und die energetische Ausbeute steigt. Bisher wurden Wirkungsgrade von fünf Prozent erreicht.

### Vergleichbar mit amorphem Silizium

Es gibt viele Ideen, die organische Photovoltaik voranzubringen. Der Schlüssel sind die organischen Halbleiter als Herzstück jeder Solarzelle aus Kunststoff. Sie gilt es zu verstehen und so zu optimieren, dass möglichst viel Strom aus Sonnenenergie erzeugt werden kann. Organische Halbleiter galten lange als unattraktiv, weil ihre physikalischen Eigenschaften nicht reproduzierbar waren. Die Leitfähigkeit von kristallinem Silizium erreichen sie zwar noch nicht. Doch ein Polymer, das Elektrizität ähnlich gut leitet wie das in den Dünnschicht-Solarzellen bereits verwendete amorphe Silizium, gibt es bereits.

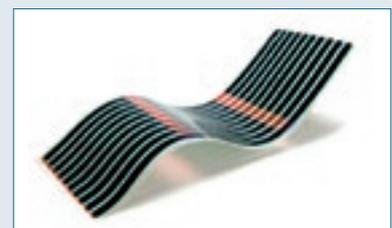
#### Klaus Griesar

*Der Autor ist Senior Manager Business Development beim Pharma- und Chemiekonzern Merck in Darmstadt.*

## So funktionieren organische pin-Solarzellen

Den Namen „pin“ verdanken die organischen pin-Solarzellen ihrem Aufbau: Die photoaktive Schicht liegt innen (i) zwischen zwei organischen Halbleiterschichten, die auch als Transportschichten bezeichnet werden. In diese Halbleiterschichten wurden gezielt Moleküle eingebaut, die einen Überschuss an positiven (p) beziehungsweise negativen (n) Ladungsträgern bewirken. Diese Dotierung erleichtert den Ladungsträgern den Fluss zur Elektrode und erhöht so die Effizienz der Zelle. Die dem Licht zugewandte Halbleiterschicht ist transparent und ihre Dicke wird so gewählt, dass das Interferenzmaximum von einfallendem und reflektiertem Licht in der Mitte der photoaktiven Schicht liegt. Zudem schützt diese Schicht die photoaktive Schicht vor Beschädigungen beim Aufdampfen der Deckkontakte. Die photoaktive Schicht einer pin-Zelle besteht aus einem tiefblauen Farbstoff und einem  $C_{60}$ -Fulleren als Elektronensammler.

Die Schichten der pin-Zellen sollten wegen der geringen Beweglichkeit der positiven Ladungsträger nicht dicker als 60 Nanometer sein. Allerdings kann man mehrere dünne Zellen übereinander stapeln, um eine höhere Absorption zu erreichen. Man spricht dann von Tandemzellen.



**Organische Solarzellen sind biegsam.**

(Bild: Merck KGaA)

Die Sonne liefert ihre Energie zwar umsonst, aber die Umwandlung in Strom ist teuer. Das liegt vor allem am Silizium, dessen Aufbereitung für den Einsatz in Solarzellen aufwendig ist. Neue Herstellungsverfahren und neue Materialien sollen die Kosten senken.



Zu teuer? Neue elektrochemische Verfahren könnten die Herstellung von Solarzellen kostengünstiger machen.

(Bild: Thaut Images, Fotolia.com)

## Es muss nicht immer Silizium sein

Die Sonne hat schon immer eine wesentliche Rolle in der Energieversorgung der Menschen gespielt. Pflanzen speichern Sonnenenergie beispielsweise im Holz, das dann zum Heizen verwendet wird. Moderne Ansätze gehen weit darüber hinaus und nutzen unter anderem Rapsöl als Kraftstoff. Auch Solarkollektoren zur Erwärmung von Wasser im Heizungskreislauf von Wohnhäusern, zur Nutzung als Prozesswärme in Industrieanlagen und zur Dampferzeugung in solarthermischen Kraftwerken werden immer populärer.

In den vergangenen Jahren hat auch die direkte Wandlung von Sonnenlicht in Strom ohne zwischengelagerte Wärmeerzeugung wachsendes Interesse gefunden. Immer mehr So-

laranlagen werden auf Wohnhäusern, landwirtschaftlichen Gebäuden und Industrieanlagen installiert. Im von Sonne nicht gerade verwöhnten Deutschland wäre dieser Boom ohne die Förderpolitik der Bundesregierung allerdings kaum möglich gewesen.

Photovoltaik ist eine elegante, auch in kleinen Einheiten und bei geringerer Sonneneinstrahlung effizient zu betreibende Technik. Aber der so erzeugte Strom ist vergleichsweise teuer, denn die Herstellungskosten für die derzeit überwiegend am Markt befindlichen Module aus kristallinem Silizium sind hoch. Dies gilt besonders für die monokristallinen, also aus einem einzigen Kristall bestehenden Siliziumscheiben, die sonst nur die Computerindustrie für Mikroprozessoren benötigt. Doch auch

das weniger aufwendig aufbereitete, aber ebenfalls hochreine polykristalline Silizium ist teuer.

### Verzicht auf hochkristallines Silizium

Eine wesentliche Rolle in der zukünftigen Energieversorgung wird die Photovoltaik daher nur spielen, wenn die Herstellungskosten für Solarzellen deutlich sinken. Dies wurde teilweise bereits mit der Entwicklung von Dünnschichtzellen erreicht, in denen die solar aktiven Materialien nicht separat hergestellt und anschließend zu Zellen und Modulen verschaltet werden, sondern direkt in Modulstruktur aufgebracht werden. Zu diesem Typ gehören Module aus amorphem und mikrokristallinem Silizium, die beispielsweise

durch Aufdampfen von Siliziumschichten aus der Gasphase hergestellt werden. Auch andere Materialien spielen neben Silizium bereits eine Rolle bei der Herstellung von Dünnschichtzellen, vor allem Cadmiumtellurid – eine halbleitende Substanz aus Cadmium und Tellur – sowie bestimmte halbleitende Kupferverbindungen wie Kupferindiumselenid.

Diese Substanzen werden aus der Gasphase oder aus einer Lösung auf einem relativ teuren Trägermaterial abgeschieden und müssen bei Temperaturen über 300 Grad Celsius stabilisiert werden. Dennoch sind solche Zellen kostengünstiger herzustellen als kristalline Siliziumzellen. Die Zeit, in denen die Module die für ihre Herstellung aufgewendete Energie wieder einspielen, verringert sich daher. Für Dünnschichtszellensolarzellen beträgt diese Energierückzahlzeit weniger als ein Jahr, für Zellen aus kristallinem Silizium mehrere Jahre.

**Kontrollierte Nanostrukturen**

Einen weiteren Sprung hin zu preiswerten Solaranlagen versprechen Her-

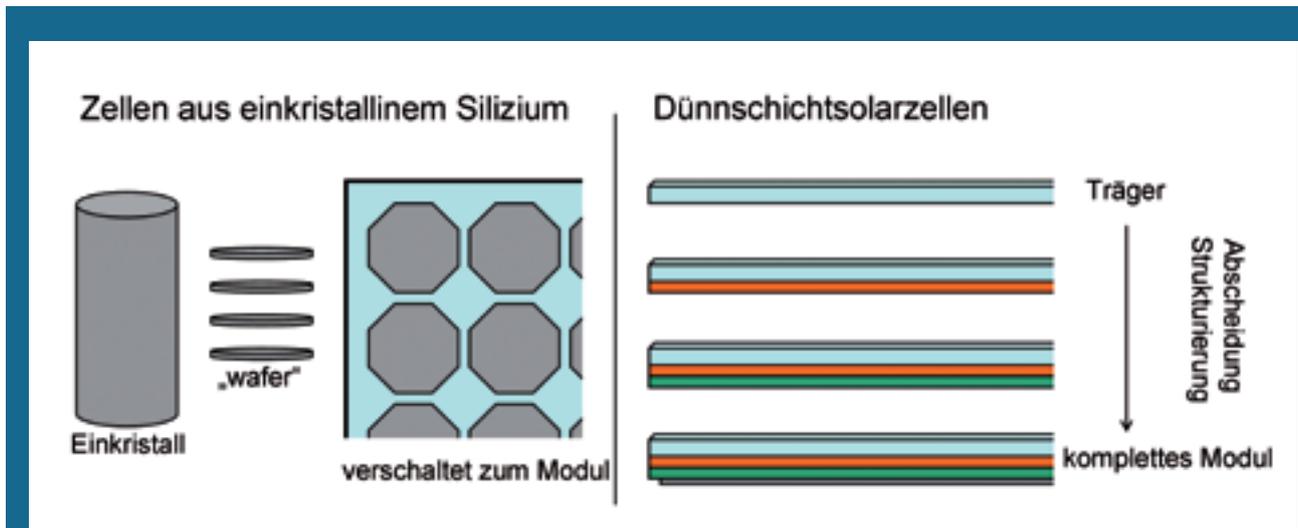
stellungsprozesse, die durchgehend bei niedriger Temperatur erfolgen und zusätzlich noch kostengünstige Kunststofffolien oder technische Textilien als Träger verwenden. In diese Rubrik fallen zum einen Solarzellen aus organischen Halbleitern (siehe Beitrag auf Seite 37). Zum anderen lassen sich auch viele anorganische Halbleiter auf solchen Trägern abscheiden. Hier bietet sich besonders ein Verfahren namens Elektrodeposition an, bei dem die Abscheidung elektrochemisch erfolgt.

Der Vorteil der Elektrodeposition: Das Wachstum der Filme lässt sich gut kontrollieren, denn die Konzentration der Vorstufen, die Temperatur der Lösungen und andere Bedingungen lassen sich frei einstellen. Außerdem können der Lösung bestimmte chemische Hilfsmittel, so genannte Additive, zugegeben werden, die die Filmbildung beeinflussen.

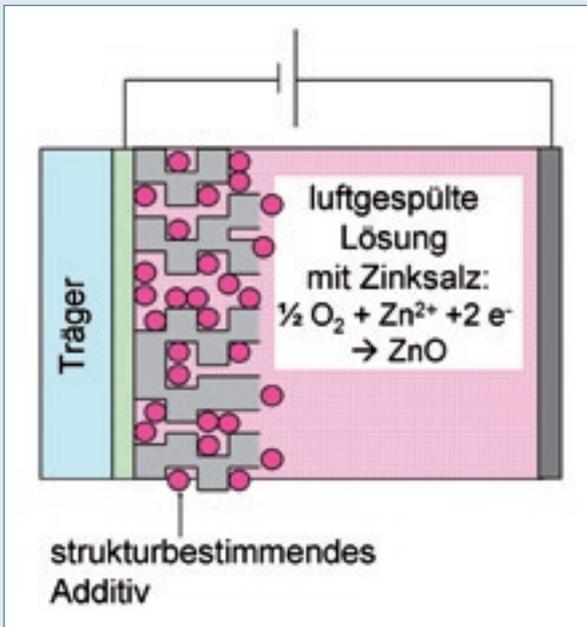
Als besonders geeignet für die Elektrodeposition hat sich Zinkoxid erwiesen, denn es scheidet sich schon bei relativ geringen Temperaturen um 70 Grad Celsius als kristalliner Film aus wässriger Lösung ab. Außerdem

wächst es auf vielen verschiedenen elektrisch leitfähigen Unterlagen. Die Struktur des Zinkoxids kann dabei über Additive gesteuert werden, die an dessen Oberfläche binden. Die genaue Einstellung der Filmstruktur bis in Nanometer-Dimensionen ist ein entscheidendes Kriterium in der Optimierung von Solarzellen, denn die aktiven Grenzflächen bilden sich auf der Nanoebene. Sie bestimmen, wie gut das absorbierte Licht in nutzbare elektrische Ladungsträger – in negativ geladene Elektronen und positiv geladene Löcher – umgewandelt wird und wie gut diese Ladungsträger getrennt werden können. Denn treffen Elektronen und Löcher aufeinander, rekombinieren sie und es fließt kein Strom.

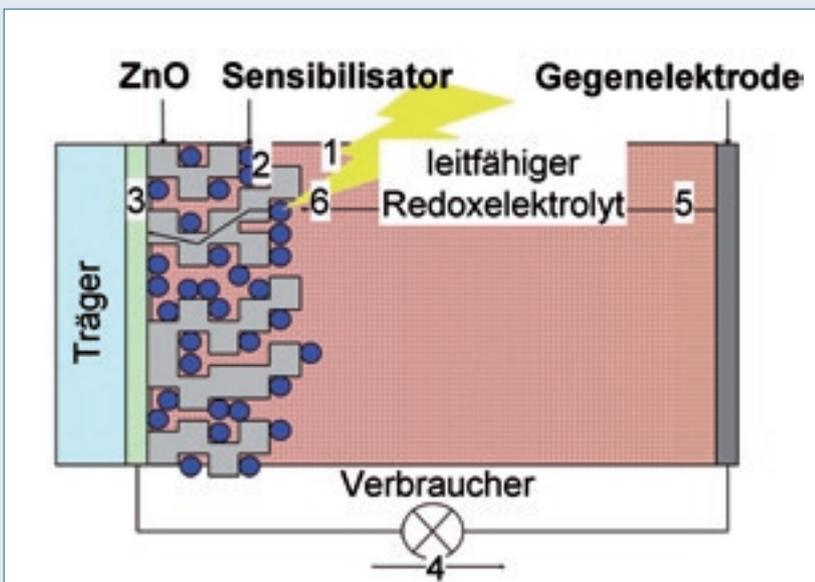
Die Möglichkeit, die Nanostruktur des Zinkoxid-Films zu kontrollieren, macht Zinkoxid zu einem interessanten Elektrodenmaterial. Gekoppelt mit seiner geringen Giftigkeit und seiner guten Verfügbarkeit in der Erdkruste gilt Zinkoxid als eine der Substanzen, die für eine photovoltaische Energieversorgung in großem Maßstab genutzt werden könnte.



Unterschiedliche Arten von Solarzellen: Während die herkömmlichen Siliziumzellen aus einzeln hergestellten und dann verschalteten Modulen bestehen (links), werden Dünnschichtzellen bereits als Modul produziert (rechts) und sind daher kostengünstiger.



Zinkoxid (ZnO) ist ein interessantes Elektrodenmaterial. Das Schema zeigt das Prinzip eines elektrochemischen Verfahrens, bei dem sich Zinkoxid aus wässriger Lösung auf einem Träger abscheidet. Das Additiv (rote Kreise) sorgt für die Bildung von Poren in der Zinkoxid-Schicht.



Zinkoxid absorbiert kein sichtbares Licht und muss daher mit Absorbermolekülen (Sensibilisatoren) sensibilisiert werden. Das Schema zeigt die Funktionsweise einer farbstoffsensibilisierten Solarzelle mit Lichtabsorption (1), Übergabe eines Elektrons hoher Energie an die Halbleiterelektrode (2), Einsammeln der Elektronen (3) und Weitergabe im äußeren Stromkreis (4) sowie Schließen des Stromkreises durch Übergabe eines Elektrons bei niedrigerer Energie an die Kontaktphase (5), die das Elektron an das Sensibilisatormolekül zu dessen Regeneration (6) übergibt.

## Zinkoxid mit organischen Farbstoffen kombinieren

Es gibt allerdings einen gravierenden Haken: Zinkoxid absorbiert kein sichtbares Licht. Deshalb muss seine Oberfläche mit intensiven Absorbern modifiziert werden. Ein Vorgehen, das aus der Farbfotografie als Sensibilisierung von Silberbromid gut bekannt ist. Als Sensibilisatoren für Zinkoxid eignen sich organische Farbstoffe, die Licht aufnehmen und Elektronen hoher Energie an Zinkoxid abgeben sowie umgekehrt Elektronen niedrigerer Energie von einer zweiten Kontaktphase übernehmen, um den Stromkreis zu schließen.

Die Sensibilisatoren wirken am besten, wenn sie als Schicht aus nur einer Lage Moleküle an die Oberfläche gebunden werden. Damit sie dennoch viel Licht absorbieren, muss die Träger-elektrode eine große Oberfläche aufweisen und wird daher als poröser Film abgeschieden. Durch die vielen Porenwände vergrößert sich die Oberfläche enorm. Auch für die Herstellung solcher poröser Filme eignet sich die Elektrodeposition ausgezeichnet.

Die bislang am erfolgreichsten für farbstoffsensibilisierte Elektroden eingesetzte Kontaktphase besteht ebenfalls aus einem elektrochemischen System, nämlich aus einer iodhaltigen organischen Lösung. Einfacher zu handhaben wären diese Zellen, wenn sie statt des flüssigen Elektrolyten ein Gel oder einen organischen oder anorganischen Halbleiter enthielten. Daran wird derzeit intensiv gearbeitet. Den Solarenergieforschern, und erst recht den Elektrochemikern unter ihnen, wird die Arbeit so schnell nicht ausgehen.

### Derck Schlettwein

*Der Autor ist Professor für Angewandte Physik an der Justus-Liebig-Universität in Gießen.*

Thermoelektrische Generatoren erzeugen Strom aus einem Temperaturgefälle. Sie könnten beispielsweise die Wärme von Autoabgasen nutzen, um die Bordelektronik zu speisen. Forscher weltweit suchen nach thermoelektrischen Materialien, die diese Wärmewandlung rentabel machen.



Mit den Abgasen von Autos und Kraftwerken geht Wärmeenergie verloren. Thermoelektrische Materialien sollen diese Wärme in Strom umwandeln.

(Bild: DX, Fotolia.com)

## Wunderbare Wärmewandler

Automobile, Maschinen und Kraftwerke sind schlechte Futterverwerter: Sie nutzen durchschnittlich weniger als ein Drittel der ihnen zugeführten Energie. Der Rest geht als Wärme verloren. Gelänge es, die großen Mengen an Abwärmenergie zu nutzen, fiel die Energiebilanz von Verbrennungsprozessen deutlich günstiger aus. Die Suche nach Wegen, die verlorene Wärmeenergie zumindest teilweise zu verwerten, führt zu einer bereits seit mehr als hundert Jahren bekannten Technik: der Thermoelektrik.

Das thermoelektrische Energy Harvesting, die Ernte von Abwärme aus Verbrennungsprozessen, steht aktuell hoch im Kurs, und weltweit hat ein

regelrechter Forschungswettlauf um höhere Wirkungsgrade begonnen, angespornt durch Visionen wie jene vom Auto als mobilem Kleinkraftwerk. Könnte man mit der Wärme des Abgases zumindest teilweise die Bordelektronik speisen, ließen sich etwa fünf bis sieben Prozent des Kraftstoffs sparen. Das wäre ein bedeutender Beitrag zum Klimaschutz.

### Schon geringe Temperaturgefälle nutzen

Thermoelektrische Wandler arbeiten geräuschlos, vibrationsfrei, äußerst zuverlässig und erzeugen keine Emissionen. Ihr Herz sind Halbleitermaterialien. Verbindet man zwei verschiedene ther-

moelektrisch aktive Halbleiter miteinander und erzeugt an der Verbindungsstelle eine Temperaturdifferenz, entsteht ein elektrisches Feld. Umgekehrt: Legt man eine elektrische Spannung an die Verbindungsstelle an, ergibt sich ein Temperaturgefälle. Wie viel Strom erzeugt wird oder wie groß der Kühleffekt ist, hängt dabei maßgeblich von den jeweils verwendeten Materialien ab.

Voraussetzung für die Wandlung von Wärme in elektrische Energie ist also ein bestehendes Temperaturgefälle, das nicht groß sein muss. Thermoelektrische Uhren beispielsweise nutzen allein die geringe Temperaturdifferenz zwischen Körper- und Raumtemperatur.



Mit der Abgaswärme eines Autos könnte man seine Bordelektronik speisen.

(Bild: amridesign, Fotolia.com)

In Weltraumsonden und Satelliten werden thermoelektrische Systeme seit Jahrzehnten als Energielieferanten eingesetzt. Für alltägliche Anwendungen aber sind sie noch zu teuer in der Herstellung und außerdem noch nicht ergiebig genug. Ein Maß für ihre Effizienz ist der so genannte ZT-Wert, eine Gütezahl, die jahrzehntelang bei 1 stagnierte – das ist zu wenig, um Abwärme zu nutzen. Als Rentabilitätsschwelle für den wirtschaftlichen Einsatz in einem thermoelektrischen Generator gelten Werte um 1,5 bis 2. Neue Materialien hingegen haben in Laborversuchen bereits Werte bis 3,5 erreicht.

### Nanotechnik trickst Naturgesetze aus

Auf der Suche nach effizienteren thermoelektrischen Materialien und optimierten Fertigungsprozessen verändern Wissenschaftler bekannte thermoelektrische Materialien oder entwickeln neue. Dabei steht ihnen eine reiche Auswahl zur Verfügung, denn die Palette an thermoelektrischen Materialien reicht von Legierungen über Halbleiter und Halbmetalle bis zu Keramiken.

Ob sich ein Wärmewandler wirtschaftlich nutzen lässt, hängt zum einen von seiner Thermokraft ab, also davon, wie viel Strom bei einer bestimmten Temperaturdifferenz fließt. Zum anderen

sollten effiziente thermoelektrische Wandler Strom gut, Wärme hingegen schlecht leiten. Denn dann ist das Temperaturgefälle möglichst groß, wenn das Material an einer Stelle erwärmt wird. Hier jedoch kommen den Materialforschern physikalische Naturgesetze in die Quere: Eine hohe elektrische bei gleichzeitig niedriger thermischer Leitfähigkeit ist nicht so einfach zu erreichen.

Moderne „High ZT“-Materialien, an denen derzeit intensiv geforscht wird, tricksen die Natur daher gewissermaßen aus. Ihr atomarer Aufbau ist so ausgefeilt konstruiert, dass die innere Struktur des Materials zwar die Wärmeleitung einschränkt, die Beweglichkeit der Elektronen aber nicht stört oder sogar fördert. Im Wettlauf um möglichst hohe ZT-Werte gelten derzeit nanotechnisch hergestellte Materialien als besonders vielversprechend. Sie bestehen entweder aus reinen Nanopartikeln oder aus einer Matrix, in die Nanopartikel eingebettet sind.

Seit den 1990er-Jahren experimentieren Materialforscher mit nanodimensionalen Drähten aus Halbmetallen wie Bismut, in denen Strom nur in einer Richtung entlang der Drahtachse fließt. Solche Drähte haben Durchmesser unter 15 Nanometern und erreichen ZT-Werte bis 3. Der Haken: Die Nanodrähte eignen sich nur bedingt für den Bau von thermoelektrischen Generatoren.

Besser zu verarbeiten sind Materialien, die aus vielen Nanoschichten aufgebaut sind. In diesen Supergitter genannten Werkstoffen fließen Wärme und Strom grundsätzlich sowohl innerhalb der Schichten als auch senkrecht dazu. Der Clou aber ist, dass Wärme senkrecht zu den Schichten deutlich schlechter geleitet wird, während Strom auch in dieser Richtung weitgehend ungestört fließt. Das verbessert den ZT-Wert.

Für solche thermoelektrischen Nanomaterialien müssen die Wissenschaftler Nanoschichten oder Nanoteilchen gezielt anordnen. Es gibt aber auch Werkstoffe, die geeignete Nanostrukturen von alleine bilden, wenn sich verschiedene Phasen des Materials entmischen.

Verbesserte Wirkungsgrade können auch ganz ohne Nanotechnik erreicht werden. Ein Beispiel für solche nicht nanostrukturierten Thermoelektrika sind bestimmte Hochtemperaturmaterialien, die so genannten Skutterudite – benannt nach der norwegischen Lagerstätte Skutterud. In den Skutteruditen für thermoelektrische Werkstoffe bilden die Elemente Kobalt und Antimon ein Kristallgitter, das in seinen Freiräumen schwere Atome beherbergen kann. Solche „gefüllten“ Skutterudite leiten Wärme vergleichsweise schlecht, elektrischen Strom aber gut.

Die Beispiele zeigen: An thermoelektrischen Werkstoffen mangelt es nicht und das Energy Harvesting rückt in greifbare Nähe. Die neuen thermoelektrischen Materialien werden zukünftig aus Autos und Kraftwerken bessere Kostverwerter machen.

### Harald Böttner

*Der Autor leitet die Abteilung Thermoelektrik und integrierte Sensorsysteme am Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik in Freiburg.*

Dreck, Gestank und Dioxine – Müllverbrennung hat ein schlechtes Image. Zu Unrecht, denn moderne Müllöfen emittieren kaum noch schädliche Abgase und können obendrein umweltfreundlich Energie erzeugen.



Für die einen ist es Müll, für die anderen ein wertvoller Brennstoff.

(Bild: © Erwin Wodicka – Fotolia.com)

## Energie aus Müll

Müllverbrennungsanlagen sind heute keine Dreckschleudern mehr. In den vergangenen 20 Jahren wurden Verbrennung und Rauchgasreinigung technisch derart verbessert, dass die Müllöfen heute nur noch Bruchteile der Abgase emittieren, die sie noch in den 1980er-Jahren erzeugten. Schon im Jahr 2005 erklärte der damalige Bundesumweltminister Jürgen Trittin, dass Müllverbrennungsanlagen bei den Emissionen von Dioxinen, Staub und Schwermetallen keine Rolle mehr spielen. Und im Magazin der Umweltschutzorganisation Greenpeace war im April 2007 unter dem Titel „Der Müll und die Mythen“ zu lesen, dass die Dioxinbelastung wegen der strengen Immissionsschutzverordnung auf ein Tausendstel im Vergleich zu 1990

gesunken sei – obwohl sich die Zahl der Müllverbrennungsanlagen in den vergangenen 20 Jahren fast verdoppelt hat. Im Jahr 2007 gab es in Deutschland 72 Müllverbrennungsanlagen.

Natürlich gilt trotzdem: Aus ökologischer Sicht müssen Abfälle so weit wie möglich vermieden werden; vorausgesetzt die Vermeidung selbst erzeugt keine Nachteile. Der dennoch anfallende Müll aber sollte so effizient wie möglich verwertet werden, denn in ihm stecken viele Komponenten, die sich stofflich oder thermisch nutzen lassen.

### Müll statt fossiler Brennstoffe

Abfälle werden heute kontinuierlich und nur noch zu einem geringen Teil

per Hand getrennt. Moderne Verfahren nutzen dabei neben dem magnetischen und elektrostatischen Verhalten der Stoffe auch andere physikalische Eigenschaften, etwa ihre Dichte oder ihr Absorptionsvermögen von infraroter Strahlung. So lassen sich Eisenmetall, Aluminium und Buntmetalle, auch Kunststoffe wie Polyethylen, Polypropylen und Polystyrol sortenrein voneinander trennen. Papier, Holz, Glas, Bauschutt und kompostierbare Grünabfälle haben die Abfallproduzenten in Industrie, Gewerbe und Haushalten größtenteils schon vorweg aussortiert. Dennoch fallen allein in Deutschland jährlich etwa 26 Millionen Tonnen Müll an, für dessen stoffliche Trennung man mehr Energie aufwenden müsste, als zur Erzeugung ursprünglich eingesetzt

wurde. In der Vergangenheit landeten diese Reste auf Deponien oder in Müllverbrennungsanlagen.

Seit Juni 2005 ist die Deponierung unbehandelter Abfälle in Deutschland gesetzlich verboten. Der wesentliche Grund: In Deponien entwickelt sich unter Luftabschluss das Deponiegas Methan, das in die Atmosphäre entweicht und einen 23-mal stärkeren Treibhauseffekt bewirkt als Kohlendioxid.

Ziel ist daher, aus dem nicht stofflich verwertbaren Abfall Energie zu gewinnen und so fossile Primärenergieträger wie Kohle, Erdöl oder Erdgas zu substituieren. Der Heizwert des Abfalls entscheidet darüber, wie er energetisch verwertet werden kann. Sortierverfahren trennen den Restabfall in Fraktionen mit verschiedenen Heizwerten auf. Der Anteil mit einem Heizwert von zehn Megajoule pro Kilogramm oder weniger brennt nicht selbstständig, sondern benötigt eine Stützfeuerung mit Erdgas oder Heizöl. Dies ist das Prinzip der klassischen Müllverbrennungsanlagen.

Die Fraktion mit einem Heizwert von mindestens elf Megajoule pro Kilogramm aber lässt sich als Brenn-

stoff, auch Ersatzbrennstoff genannt, nutzen. Die Heizwerte dieser Ersatzbrennstoffe liegen meist zwischen elf und 25 Megajoule pro Kilogramm und sind damit vergleichbar mit jenen von Brennholz oder Braunkohle. Ersatzbrennstoffe lassen sich im Gemisch mit Kohle in Kohlekraftwerken oder auch in Zementöfen verfeuern. Wegen ihres Gehalts an Papier, Holz und Textilien zählen sie zumindest zu etwa 50 Prozent zu den regenerativen, klimaneutralen Brennstoffen.

Die Verwendung von Ersatzbrennstoffen muss allerdings gründlich überwacht werden, beginnend mit der Kontrolle der Brennstofflieferungen bis zur Messung der Emissionen. Denn trotz größter Sorgfalt bei ihrer Herstellung bleiben Ersatzbrennstoffe Abfall, sind also – anders als Kohle, Heizöl, Erdgas und Holz – chemisch uneinheitlich zusammengesetzt.

## Wirkungsgrad bis 85 Prozent

Wie effizient die energetische Müllverwertung ist, hängt nicht nur vom Heizwert des Abfalls, sondern auch entscheidend vom Wirkungsgrad des Kraftwerks ab. In der Regel lässt der

Wirkungsgrad von Prozessen der Energieumwandlung zu wünschen übrig. Ein großes Optimierungspotenzial der Energienutzung steckt daher in der Effizienzsteigerung dieser Prozesse.

In einem Verbrennungskraftwerk erzeugt die Feuerungswärme überhitzten Dampf, der eine Turbine antreibt und über einen Generator elektrischen Strom produziert. So lässt sich aber nur etwa ein Drittel der eingesetzten Primärenergie in nutzbare Energie umwandeln. Besteht jedoch die Möglichkeit, zusätzlich Wärme in ein Dampf- oder Fernwärmenetz einzuspeisen, steigt der Wirkungsgrad auf 80 bis 85 Prozent. In Chemiewerken, Papierfabriken und anderen Industriestandorten, die viel Dampf benötigen, können Ersatzbrennstoff-Kraftwerke bestehende Versorgungsanlagen daher optimal ergänzen.

Ein Beispiel für einen integrierten Ver- und Entsorgungsverbund ist der Industriepark Höchst in Frankfurt am Main, der mit seinen über 90 ansässigen Unternehmen und 22 000 Beschäftigten einen jährlichen Energiebedarf von fast zwei Terawattstunden elektrischem Strom – so viel verbrauchen 500 000 Haushalte jährlich – und rund vier Millionen Tonnen Dampf hat. Neben der klassischen Strom- und Dampferzeugung in einem Kohlekraftwerk und einer Gasturbine wird im Höchster Industriepark bereits die Abwärme von chemischen Produktionsprozessen sowie von der Verbrennung von Klärschlamm und Sonderabfall genutzt. Eine Ersatzbrennstoff-Anlage, die jährlich 675 000 Tonnen Ersatzbrennstoffe aufnehmen soll, befindet sich schon im Bau. Ab Mitte nächsten Jahres wird sie die ansässigen Unternehmen mit Strom und Dampf versorgen. Pro Stunde wird die neue Anlage 70 Megawatt elektrische Leistung – das entspricht dem Bedarf von etwa 150 000 Haushalten – oder 250 Ton-



Der Industriepark Höchst in Frankfurt am Main: Im Jahr 2009 soll hier eine Anlage in Betrieb gehen, die aus Müll erzeugte Ersatzbrennstoffe in Strom und Dampf umwandelt.

(Bild: Infraseriv GmbH & Co., Höchst KG)

nen Dampf in das Netz des Standortes einspeisen.

In Höchst ging im Sommer 2007 als erste ihrer Art in Europa außerdem eine Biogasanlage in Betrieb, die aus den organischen Bestandteilen industrieller Abwässer Methan gewinnt. Drei Blockheizkraftwerke wandeln das so gewonnene Biogas in elektrischen

Strom um. Damit lässt sich sogar aus Abwasser noch Energie gewinnen.

#### Marcell Peuckert

*Der Autor ist Mitglied der Geschäftsführung von T2C, der Betreibergesellschaft der Ersatzbrennstoff-Anlage im Industriepark Höchst in Frankfurt am Main.*

## So funktioniert das Ersatzbrennstoff-Kraftwerk

Moderne Ersatzbrennstoff-Kraftwerke erzielen einen hohen Wirkungsgrad. Verfahrenstechnisch basieren sie auf dem Prinzip eines Wirbelschichtofens. Dieser vertikal konstruierte Ofen ist unten mit Sand gefüllt, den eingeblasene heiße Luft aufwirbelt. Die Wirbelschicht aus heißem Sand, die sich mit dem Brenngut mischt, hat flüssigkeitsähnliche Eigenschaften und sorgt für eine gute Wärmeleitung. In klassischen Müllverbrennungsanlagen hingegen wandert das zu verbrennende Material über einen Feuerungsrost.

Verglichen mit der Rostfeuerung erlaubt die Wirbelschichtverbrennung eine bessere Temperaturkontrolle. Das ist gerade bei Brennstoffen mit hohen Heizwerten, die durch hohe Verbrennungstemperaturen den Wirkungsgrad steigern, von Vorteil. Außerdem garantiert ein exakt einstellbares Temperaturintervall von 850 bis 950 Grad Celsius eine vollständige Verbrennung und verringert so die Bildung von schädlichen Stickoxiden. Um die Emissionen von Stickoxiden im Rauchgas noch weiter zu senken,

wird Ammoniakwasser in den Kessel gespritzt. Die Stickoxide reagieren dabei zu Stickstoff. Alternativ ist eine katalytische Umsetzung der Stickoxide in den abgekühlten Rauchgasen kurz vor Erreichen des Schornsteins möglich. Der hierbei erzeugte Druckabfall wirkt sich jedoch negativ auf den Gesamtwirkungsgrad aus. Daher wird in Kraftwerken, deren Hauptzweck die Energieerzeugung und nicht die Abfallbeseitigung ist, die Einspritzung von Ammoniakwasser bevorzugt.



Modell der Ersatzbrennstoff-Anlage, die derzeit im Industriepark Höchst gebaut wird.

(Bild: Infraseriv GmbH & Co. Höchst KG)

Wasserstoff und Sauerstoff vereinigen sich in einer heftigen Reaktion zu Wasser. Brennstoffzellen zähmen diese Reaktion und machen die enorme Energie, die dabei entsteht, in elektrischer Form verfügbar. Das Prinzip ist seit über 100 Jahren bekannt, doch an der kostengünstigen Anwendung im Alltag hapert es noch.



Das unbemannte Forschungsflugzeug Helios der Nasa: Tagsüber flog es mit Sonnenenergie, nachts wurde es mit Brennstoffzellen betrieben. Helios flog bis in eine Höhe von 30 Kilometern – bis es im Jahr 2003 über dem Pazifik zerbrach und abstürzte.

(Bild: Nasa)

## Energiegewinnung ohne Abgase

Im August 2003 ereignete sich in New York City einer jener spektakulären Stromausfälle, die ganz Manhattan in nächtliches Dunkel legen. Inmitten der dunklen Wolkenkratzer erstrahlte aber diesmal ein einziges Gebäude in seinem normalen Lichterglanz: das Condé Nast Building, 4 Times Square. Wie war das möglich? Die Stromversorgung des Gebäudes beruht auf dem Einsatz von Brennstoffzellen – und man hatte nur auf einen Stromausfall gewartet, um deren Leistungsfähigkeit wirksam demonstrieren zu können.

Das Prinzip der Brennstoffzelle ist lange bekannt. Im Jahr 1800 hatten William Nicholson und Anthony Carlisle entdeckt, dass sich Wasser mit elektrischem Strom in seine Bestandteile zer-

legen lässt, also in die Gase Wasserstoff und Sauerstoff. Den umgekehrten Schritt vollzog William Robert Grove 1838: Er konstruierte eine Apparatur, in der sich die Gase Wasserstoff und Sauerstoff unter Gewinnung von Elektrizität zu Wasser vereinten – die erste Brennstoffzelle.

### Gezähmte Knallgasexplosion

Welches Ausmaß an Energie freigesetzt wird, wenn Wasserstoff mit Sauerstoff zu Wasser verbrennt, zeigen Bilder der Katastrophe vom 6. Mai 1937, als der mit Wasserstoff gefüllte Zeppelin „Hindenburg“ bei seiner Landung in Lakehurst, New York, in Flammen aufging. In Sekundenschnelle war alles vorbei.

Diese Verbrennung von Wasserstoff zu Wasser, auch Knallgasexplosion genannt, wird in der Brennstoffzelle gezähmt, und die freiwerdende Energie wird in elektrischer Form verfügbar. Von Groves Entdeckung der Brennstoffzelle im Jahr 1838 vergingen noch einige Jahrzehnte, bis Wilhelm Ostwald, einer der Gründerväter der Physikalischen Chemie und Nobelpreisträger, das Phänomen 1893 erklären konnte. Ostwald erkannte, dass die reagierenden Gase in der Brennstoffzelle nicht in direkten Kontakt miteinander treten dürfen. Sie müssen durch ein Material – flüssig oder fest – voneinander getrennt sein. Allerdings muss dieses Material die ungewöhnliche Eigenschaft besitzen, die Reaktion dennoch in kontrollierter Form zu ermöglichen. Wie kann das geschehen?

Gegen Ende des neunzehnten Jahrhunderts hatte sich die Vorstellung durchgesetzt, dass Ionen, also elektrisch geladene atomare Einheiten, elektrische Ladung transportieren, beispielsweise in wässrigen Lösungen. Ostwald selbst gehörte auf diesem Gebiet zu den Pionieren seiner Zeit. Tatsächlich konnte er die Funktionsweise von Groves Brennstoffzelle leicht über bewegliche Ionen erklären. In Frage kommen dabei entweder die positiv geladenen Wasserstoff-Ionen, auch Protonen genannt, oder die negativ geladenen Hydroxid-Ionen. Die Triebkraft der chemischen Reaktion, bei der aus den Elementen Wasserstoff und Sauerstoff Wasser entsteht, sorgt dafür, dass die beweglichen Ionen auf der einen Seite der Brennstoffzelle gebildet und auf der anderen verbraucht werden.

Die positiv geladenen Protonen bilden sich auf der Wasserstoff-Seite aus Wasserstoffmolekülen und vereinigen sich dann auf der Sauerstoff-Seite mit Sauerstoffmolekülen zu Wasser. Bei der Bildung der Protonen bleibt negative Ladung in Form von Elektronen zurück, während bei der Reaktion zu Wasser Elektronen verbraucht werden.

So bilden sich getrennte Ladungen und damit eine elektrische Spannung zwischen den Polen der Zelle, zwischen Anode und Kathode.

Fügt man zwischen Anode und Kathode einen äußeren Verbraucher ein und lässt Strom durch ihn fließen, so ergibt sich die elektrische Leistung der Zelle als Produkt aus Spannung und Strom. Schaltet man mehrere dieser elementaren Brennstoffzellen hintereinander, erhöht sich die Spannung entsprechend. Werden sie parallel geschaltet oder vergrößert man die Flächen der Elektroden, was auf dasselbe hinausläuft, erhöht sich der Strom. Mit diesen Maßnahmen lässt sich die Leistung erheblich steigern.

Bei einer Brennstoffzelle nimmt die verfügbare Spannung mit anwachsendem Strom ab, und die Leistung durchläuft ein Maximum. Diese maximale Leistung einer zusammengesetzten Brennstoffzelle kann beispielsweise fünf Kilowatt (etwa sieben PS) betragen. Es gibt aber auch Brennstoffzellen-Aggregate mit einer über tausendmal höheren Leistung, die bereits kleine Kraftwerke sind.

## In Bussen, Kraftwerken und Wohnhäusern

Kommen wir auf die im Condé Nast Building verwendeten Brennstoffzellen zurück: In ihnen dient Phosphorsäure als Protonenleiter, und ihre Betriebstemperatur liegt bei 200 Grad Celsius. Diese Phosphorsäure-Brennstoffzellen haben Marktreife erlangt und kosten in der Anschaffung etwa 3000 Euro pro Kilowatt. Einheiten mit einer Leistung von 100 Kilowatt werden zum Beispiel in Bussen eingesetzt. Aggregate mit wesentlich höheren Leistungen werden stationär betrieben, oft als verbraucher-nahe Kraftwerke, die Haushalte in ihrer Umgebung sowohl mit Strom als auch mit Wärme versorgen, bekannt als Kraft-Wärme-Kopplung. Wegen der erforderlichen langen Aufheizzeit eignen sich Phosphorsäure-Brennstoffzellen jedoch nicht für Anwendungen im Haushalt oder in privaten Automobilen.

Weitaus bessere Zukunftschancen räumt man hier der so genannten Membran-Brennstoffzelle ein. In ihr dient eine Trennschicht aus Kunststoff als Protonenleiter; die Betriebs-



Nobelpreisträger Wilhelm Ostwald (1853 bis 1932) klärte das Prinzip der Brennstoffzelle auf. Er erkannte, dass die Gase Wasserstoff und Sauerstoff nicht in direktem Kontakt miteinander treten dürfen.



Dieser Bus fährt mit Brennstoffzellen-Technik.

(Bild: [www.blueclick.com](http://www.blueclick.com))

temperatur liegt zwischen 70 und 80 Grad Celsius. Zurzeit befindet sich die Membran-Brennstoffzelle noch in der Entwicklung. Es gibt aber schon Prototypen unterschiedlicher Größe und Leistung. Die kleineren Einheiten eignen sich für tragbare elektronische Geräte, die größeren mit einer Leistung von etwa fünf Kilowatt können private Haushalte mit Elektrizität versorgen. Als Demonstrationsobjekt ist in Albany im US-Bundesstaat New York ein Wohnhaus gebaut worden, das seinen gesamten Energiebedarf auf diese Weise deckt. Die Automobilindustrie experimentiert mit Membran-Brennstoffzellen, die Leistungen von etwa 20 Kilowatt besitzen, und auf einem Marineflugplatz in Indiana wird sogar eine Einheit mit einer Leistung von 250 Kilowatt betrieben.

## Solar- und Brennstoffzellen koppeln

Zukunftsweisend ist die Idee, Membran-Brennstoffzellen mit Solarzellen zu koppeln. Bei dieser Kombination genügt Sonnenlicht als einzige

Energiequelle, um elektrische Energie bei Tag und Nacht zur Verfügung zu stellen. Auf diese Weise kann man zum Beispiel Motoren über lange Zeit ununterbrochen laufen lassen.

Zu Beginn dieses Jahrzehnts erregte das unbemannte Forschungsflugzeug Helios öffentliches Aufsehen, weil es mit einer solchen Kopplung wochenlang flog. Am Tag betrieb die von den Solarzellen bereit gestellte elektrische Energie nicht nur die Motoren, sondern diente auch der Gewinnung von Wasserstoff aus Wasser. In der Nacht wurden mit diesem Wasserstoff Brennstoffzellen betrieben, die dann nicht nur die Motoren mit Energie versorgten, sondern auch das Wasser zurückgewannen, das am nächsten Tag wieder benötigt wurde.

Helios hat uns ein Ideal vor Augen geführt: das Ideal der abgasfreien Energieumwandlung – ohne fossile Brennstoffe, ohne laute Verbrennungsmotoren und vor allem ohne Belastung der Umwelt mit Kohlendioxid. Noch sieht die Wirklichkeit anders aus. Die

Argumente gegen die Verbrennung von Kohle, Öl und Erdgas sind erdrückend – und die Endlichkeit des Vorrats an fossilen Brennstoffen ist längst nicht mehr das einzige. Die gegenwärtige Erderwärmung geht mit der Erhöhung der Konzentration der Treibhausgase in der Atmosphäre Hand in Hand, und das beim Verbrennen fossiler Brennstoffe entstehende Kohlendioxid spielt dabei eine entscheidende Rolle. Die Konzentration von Kohlendioxid in der Atmosphäre korreliert klar mit der mittleren globalen Temperatur. Noch also ist der Abstand zwischen der Vision einer abgasfreien Energiegewinnung und der Wirklichkeit immens. Lassen sich die Prozesse, die das Forschungsflugzeug Helios in der Luft hielten, auf unseren Alltag übertragen?

Diese Frage führt unmittelbar zum Konzept der Wasserstoff-Energiewirtschaft (siehe Beitrag auf Seite 73). Doch bleiben wir bei der Brennstoffzelle. Für sie gilt zunächst: Wenig Wasserstoff bewirkt viel. Kürzlich ist ein mit Membran-Brennstoffzellen betriebenes Versuchsfahrzeug mit zwei Kilogramm Wasserstoff von Valencia nach Berlin gefahren, also etwa 3000 Kilometer. Der Haken: Wenn man ein Automobil mit einem 100-Kilowatt-Motor mit Membran-Brennstoffzellen betreiben will, benötigt man dafür etwa 50 Gramm Platin als Katalysatormaterial. Das ist nicht nur teuer – 50 Gramm Platin kosten momentan etwa 2000 Euro –, sondern in großem Maßstab gar nicht möglich. Die Weltproduktion an Platin würde kaum genügen, um Deutschlands Neuwagen mit solchen Brennstoffzellen auszustatten.

## Alkali-Brennstoffzelle: Kobalt statt Platin

Wie das Problem der teuren Katalyse gelöst werden kann, zeigt das Beispiel der Alkali-Brennstoffzelle. In ihr fließen keine positiv geladenen Protonen



Zusammengesetztes Element aus zwanzig gestapelten elementaren Festoxid-Brennstoffzellen. So lassen sich höhere Spannungen erreichen.

(Bild: Fraunhofer IKTS)

von der Anode zur Kathode, sondern negativ geladene Hydroxid-Ionen von der Kathode zur Anode. Auch hier entsteht bei 80 Grad Celsius Wasser aus den Elementen, und auch hier diente zunächst Platin als Katalysatormaterial.

Die amerikanische Luft- und Raumfahrtbehörde NASA hat die Platinkosten nicht gescheut und Alkali-Brennstoffzellen sowohl im Apolloprogramm als auch in den Space Shuttles eingesetzt. Inzwischen hat sich gezeigt, dass man statt Platin auch das viel kostengünstigere Kobalt verwenden kann. Londoner Prototyp-Taxis fahren mittlerweile mit Alkali-Brennstoffzellen, die als Katalysator Kobalt enthalten. Gegenüber den Membran-Brennstoffzellen weisen Alkali-Brennstoffzellen aber einen wesentlichen Nachteil auf: Sie enthalten eine aggressive alkalische Flüssigkeit.

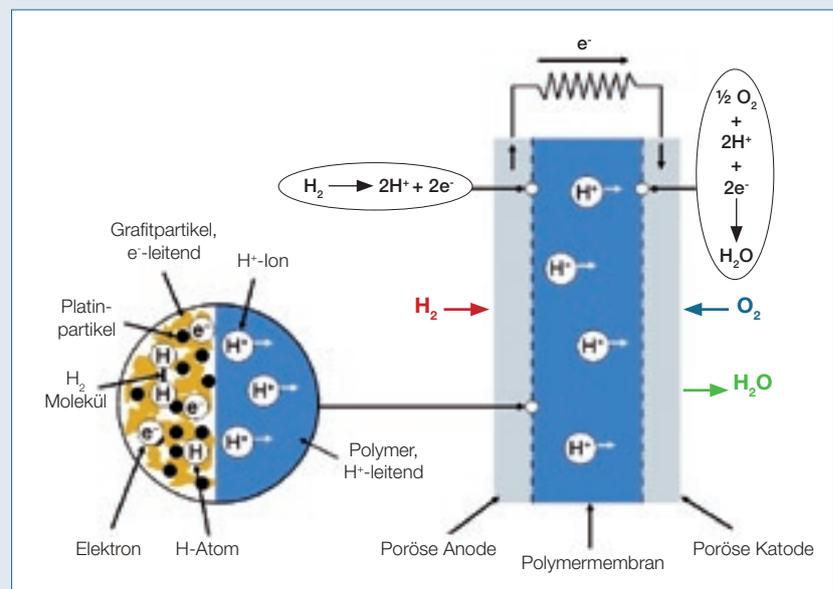
Nach heutiger Schätzung werden zukünftig ohnehin nicht die Alkali-Brennstoffzellen den größten Marktanteil haben, sondern die Festoxid-Brennstoffzelle mit einem für 2025 prognostizierten Marktanteil von 40 Prozent und die Schmelzcarbonat-Brennstoffzelle mit einem Marktanteil von 25 Prozent. Diese Typen werden zwar bei sehr hohen Temperaturen betrieben und eignen sich daher nicht für den Einsatz in kleinen, tragbaren Geräten. Für lokale Kraftwerke, die Stadtteile oder Industrieanlagen über die Kraft-Wärme-Kopplung mit Energie versorgen, sind sie aber sehr attraktiv. Aus der hohen Temperatur ergibt sich auch ein Vorteil: Statt reinem Wasserstoff kann man auch Kohlenwasserstoffe einsetzen, die bei den hohen Temperaturen gasförmig sind und als Verbrennungsprodukte Wasser und Kohlendioxid ergeben.

In der Schmelzcarbonat-Brennstoffzelle, die bei 650 Grad Celsius arbeitet, übernehmen Carbonat-Ionen den Ladungstransport. Auch hier entsteht



Ein Ingenieur überwacht das Aufwickeln einer Membran für Brennstoffzellen. Ist sie aufgerollt, wird sie in die Produktionsanlage gebracht und zur Membran-Elektroden-Einheiten, dem Herzstück einer Membran-Brennstoffzelle, verarbeitet.

(Bild: BASF)



Schema einer Membran-Brennstoffzelle: Links wird Wasserstoff ( $H_2$ ), rechts Sauerstoff ( $O_2$ ) zugeführt. Dazwischen befindet sich eine Membran, die die beiden Gase trennt, aber Protonen ( $H^+$ ) passieren lässt. Wasserstoffmoleküle können die Membran nicht passieren. An Platinkatalysatoren auf der linken Seite spalten sich Wasserstoffmoleküle in Protonen und Elektronen ( $e^-$ ). Die Protonen reagieren auf der anderen Seite der Membran mit Sauerstoff zu Wasser ( $H_2O$ ). Bei dieser Reaktion entsteht viel Energie.

Wasser aus den Elementen. Die Carbonat-Ionen werden auf der Kathodenseite unter Aufnahme von Elektronen aus Sauerstoff und Kohlendioxid gebildet. An der Anode geben sie ihre Elektronen wieder ab und reagieren mit Wasserstoff zu Wasser und Kohlendioxid, das dann wieder der Kathodenseite zugeführt wird. Als Katalysator wird das kostengünstige Nickel verwendet.

Die Schmelzcarbonat-Brennstoffzelle befindet sich noch in der Testphase und soll später nur stationär eingesetzt werden. Geplant sind Anlagen mit Leistungen von unter einem Megawatt bis zu etwa 100 Megawatt, die kleinere Städte oder Stadtteile mit Elektrizität und Wärme versorgen. Der gebildete heiße Wasserdampf soll nicht nur die Haushalte mit Fernwärme versorgen, sondern auch in Dampfturbinen zur Gewinnung weiterer elektrischer Energie eingesetzt werden.

Die Festoxid-Brennstoffzelle ist der Schmelzcarbonat-Brennstoffzelle in einem entscheidenden Punkt überlegen: Ihr Ionenleiter ist ein keramischer Feststoff, der bei hohen Temperaturen wesentlich einfacher zu handhaben ist als

eine Flüssigkeit. Die Betriebstemperatur liegt bei 800 bis 1000 Grad Celsius. Erst bei dieser hohen Temperatur erreicht man in dem festen Ionenleiter eine hinreichend hohe Leitfähigkeit für die Sauerstoff-Ionen. Weltweit wird intensiv nach Materialien gesucht, die Sauerstoff-Ionen schon bei 750 Grad Celsius oder weniger leiten.

Die Leistungsbandbreite der Festoxid-Brennstoffzellen ist größer als die der Schmelzcarbonat-Brennstoffzellen. Festoxid-Brennstoffzellen lassen sich sowohl in lokalen Kraftwerken einsetzen als auch in kleineren stationären Einheiten, die einzelne Wohnhäuser oder Gebäudekomplexe mit elektrischer Energie versorgen. Die kompakten modularen Einheiten mit einer Leistung von etwa 25 Kilowatt eignen sich besonders für große Städte. In Tokio speisen sie bereits Strom in die lokalen Netze ein.

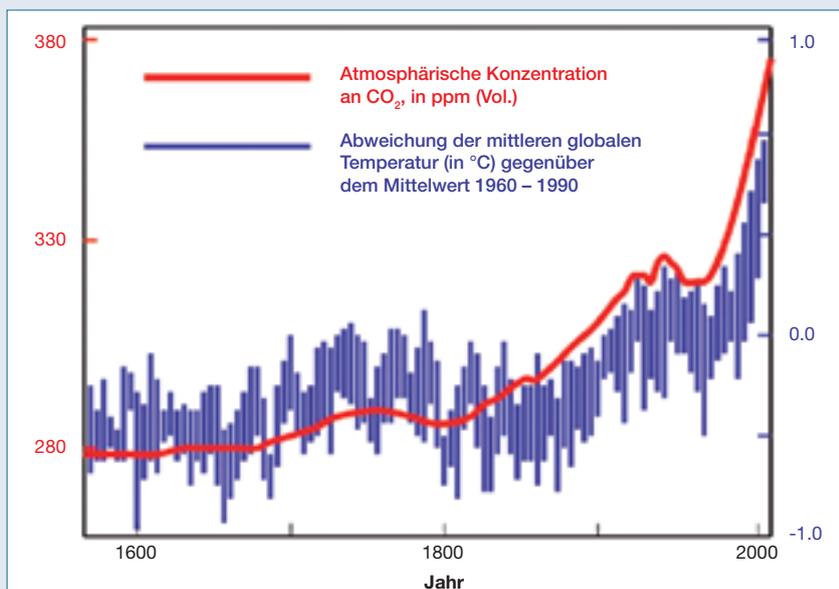
### Die Frage nach der Primärenergie bleibt

Brennstoffzellen wandeln chemische Energie umweltfreundlich in elektrische Energie um. Das gilt zwar

auch für Batterien, doch die Batterie bewahrt die aus dem Netz bezogene elektrische Energie lediglich in chemischer Form auf und gibt sie bei Bedarf wieder als elektrische Energie ab. Sie muss aufgeladen werden, sobald die chemisch gespeicherte Energie aufgebraucht ist. Die Brennstoffzelle hingegen arbeitet kontinuierlich. Aber auch für den Einsatz einer mit Wasserstoff betriebenen Brennstoffzelle muss elektrische Energie aufgewendet werden, und zwar zur Gewinnung des Wasserstoffs aus Wasser. Bei der Brennstoffzelle handelt es sich also letztendlich auch um ein System, das elektrische Energie chemisch speichert und später wieder abgibt. Es bleibt die Frage nach der primären Quelle elektrischer Energie. Wenn man die fossilen Brennstoffe schonen und die Umwelt nicht mit Treibhausgasen belasten möchte, bieten sich an: Kernenergie, Solarenergie, Wasser- und Windenergie. Hier die optimale Mischung zu finden, ist die Aufgabe für die Zukunft.

#### Klaus Funke

*Der Autor ist Professor für Physikalische Chemie an der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster.*



Korrelation zwischen der Konzentration von Kohlendioxid in der Atmosphäre und der Erderwärmung. Die rote Linie beschreibt die Konzentration von Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) in ppm. Die Einheit ppm steht für „Parts per Million“ und bedeutet den millionsten Teil (wie Prozent für den hundertsten Teil steht). Die blauen Striche kennzeichnen die Erderwärmung. Die Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff in einer Brennstoffzelle liefert Energie ohne Ausstoß von Kohlendioxid und ist daher klimaneutral.

Die Verbrennung von Energieträgern wie Kohle, Erdöl und neuerdings auch Biokraftstoffen ist eine Grundlage unseres Wohlstandes. Obwohl diese Form der Energiewandlung weder sonderlich effektiv noch sauber ist, hat sie noch lange nicht ausgedient. Verbrennungsforscher sollen die Prozesse optimieren.



## Bald auf kleinerer Flamme?

Feuer ist eins der antiken vier Elemente. Seine Beherrschung bedeutete eine immense Errungenschaft für die Zivilisation. In einer Welt ohne Feuer gäbe es kein warmes Essen, keine Heizung und kein anderes als das Tageslicht. Es fehlten weithin sichtbare Leuchtsignale zur Warnung und Kommunikation, und auch mit Handwerkszeug und Instrumenten sähe es dürrtig aus – ohne Rösten, Schmelzen, Schmieden, Glühen, Verhütten gäbe es keine Nadeln, Messer, Harken, Schaufeln aus Metall. Auch Geldmünzen und andere metallische Gebrauchsgegenstände wären nicht im Umlauf. Man sollte besser auch nicht krank werden – weder könnte man in heißem Wasser Geräte reinigen, noch durch Destillation Arzneien oder Wirkstoffe für Salben herstellen.

Die Beherrschung und kontrollierte Nutzung des Feuers spielt in fast allen Lebensbereichen eine wichtige Rolle und hat im Zuge der Industrialisierung noch mehr an Bedeutung gewonnen. Verbrennung erzeugt heißen Wasserdampf zur Bereitstellung mechanischer und elektrischer Energie und machte so viele Arbeits- und Fertigungsprozesse erst möglich. Betriebe sind nicht mehr auf einen bestimmten Standort, beispielsweise an einem Fluss, festgelegt. Mit Kraftwerken zur Stromerzeugung und der flächendeckenden Elektrifizierung, mit der Einführung von Verbrennungsmotoren für Kraftfahrzeuge, Eisenbahnen, Schiffe und Flugzeuge, mit der Etablierung eines internationalen Transportwesens waren gewaltige Umwälzungen verbunden – die uns nun heute zu schaffen machen.

### Eigentlich zu schade zum Verbrennen

Unsere Infrastruktur hängt zum überwiegenden Anteil von der Verbrennung von Kohle, Erdöl und Erdgas ab, also von fossilen Energieträgern. An der Energieversorgung in Deutschland haben nicht fossile Primärenergieträger laut Angaben des Umweltbundesamtes einen Anteil von weniger als zehn Prozent. Dabei sind die Probleme der Verbrennung nicht erst seit der laufenden Klimadebatte bekannt. Die Bildung von umweltschädlichen Abgasen, darunter das Treibhausgas Kohlendioxid, sowie von Staub- und Rußpartikeln, aber auch die Endlichkeit und die geographische Lage der fossilen Vorräte geben Anlass, Alternativen einzufordern.

Die Kritik an der Verbrennung fossiler Energieträger richtet sich dabei auf verschiedene Aspekte. So ist beispielsweise der Gesamtwirkungsgrad dieser Form der Energiewandlung erschreckend niedrig: Die im Brennstoff steckende chemische Energie muss zunächst heißen Dampf erzeugen, der in einer Turbine entspannt und dann über einen Generator in elektrische Energie umgewandelt wird. Der Strom muss umgespannt und zum Anwender transportiert werden – und wird dort vielleicht benutzt, um Wasser zu kochen.

Auch in herkömmlichen Autos oder Diesellokomotiven geht ein großer Teil der in den fossilen Kraftstoffen steckenden chemischen Energie als Wärme verloren. Ganz davon abgesehen ist es keine besonders intelligente und effiziente Nutzung der Energie, wenn zum Bewegen einer Person von etwa 75 Kilogramm zusätzlich die Masse eines Autos von etwa einer Tonne mitbewegt werden muss. Überhaupt sind Erdöl und Kohle eigentlich zu schade zum Verbrennen – als Synthesebausteine für andere Produkte wären sie nützlicher.

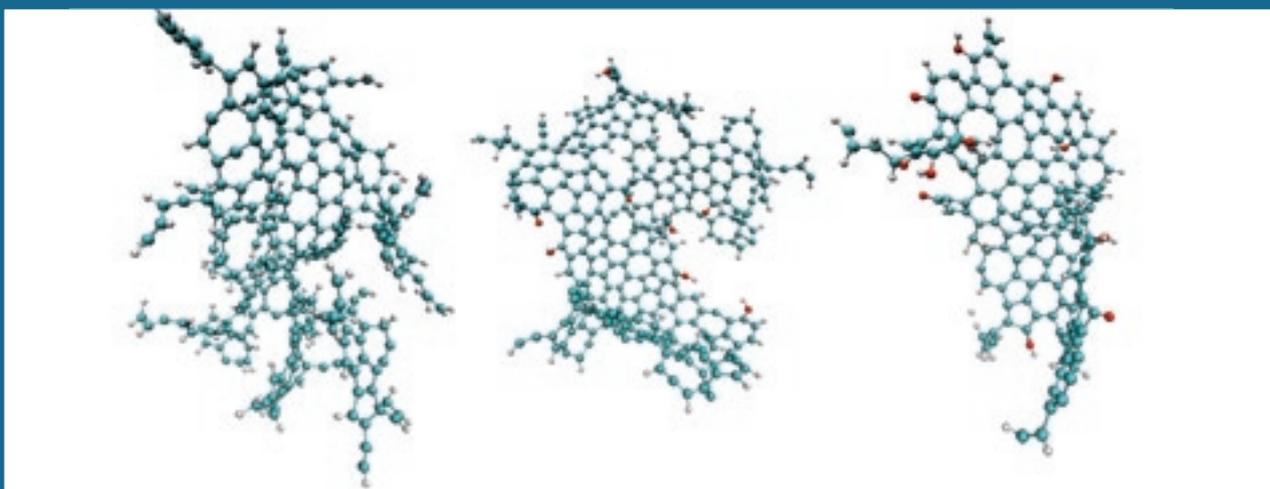
## Noch kein Abschied von der Verbrennung

Es gibt also genug Gründe, sich die Umstellung von der Verbrennung auf andere Prozesse der Energieerzeugung zu wünschen. Doch egal, wie wir das Energieproblem in den nächsten zehn bis 20 Jahren angehen: Selbst wenn es global gelingt, ein Viertel des (steigenden!) Energiebedarfs aus alternativen, sinnvollerweise regenerativen Quellen zu decken, werden die verbleibenden 75 Prozent immer noch aus der Verbrennung fossiler Rohstoffe stammen. Daher befassen sich Verbrennungsforscher intensiv mit Techniken, die eine möglichst effiziente, schadstoffarme Verbrennung gestatten, sowie mit Brenner- und Maschinenkonzepten, die unterschiedliche Brennstoffe verkraften und flexibel auf ein entsprechendes Angebot reagieren können.

Welche Schadstoffe bei einer Verbrennung entstehen, hängt nicht nur von den Brennstoffen ab, sondern auch von den Bedingungen der Verbrennung und den dabei ablaufenden chemischen Reaktionen. Kohlenwasserstoffe, die in Kohle, Erdgas, Flugzeugbenzin,

Otto- und Dieselmotoren enthalten sind, bilden bei ihrer Verbrennung Wasser und klimaschädliches Kohlendioxid. Bei einer zu geringen Sauerstoffzufuhr entstehen auch giftiges Kohlenmonoxid und Ruß. Außerdem können sich bei sehr hohen Verbrennungstemperaturen aus dem Stickstoff der Luft Stickoxide bilden, die es ebenfalls zu vermeiden gilt. Die Reaktionsschritte entlang dieser Kette der klassischen Kohlenwasserstoff-Verbrennung sind weitgehend bekannt und lassen sich am Computer simulieren. Entsprechende Computermodelle dienen auch der Optimierung von Brennräumen und Abgaskatalysatoren.

Weniger gut gelöste chemische Probleme betreffen die Entstehung von Ruß. Neue Feinstaubrichtlinien für den Straßenverkehr in Ballungsräumen beruhen darauf, dass nicht nur die weithin erkennbaren schwarzen Qualmwolken, sondern vor allem auch die sehr kleinen, für das menschliche Auge unsichtbaren Rußteilchen gesundheitsschädlich sind. Die Bildung dieser winzigen Rußpartikel ist äußerst kompliziert: Aus kleinen Brennstoffmolekülen mit wenigen Kohlenstoffatomen



Vorformen von Rußteilchen: Aus kleinen Brennstoffmolekülen entstehen vielfältige Gebilde, die wie aus Maschendraht zusammengesetzt erscheinen.

(Bild: aus S. H. Chung, A. Violi, Carbon 45 (2007), 2400-2410, mit Genehmigung von Elsevier)

entstehen zunächst aromatische Ringverbindungen und daraus vielfältige Gebilde, die wie aus Maschendraht zusammengesetzt erscheinen. Diese Nanostrukturen aus Kohlenstoff sind Vorformen der Rußpartikel. Details dieser Prozesse werden derzeit noch intensiv erforscht. Interessanterweise spielen ähnliche Reaktionen auch im interstellaren Raum eine Rolle, und ihr Verständnis hilft auch bei der Entwicklung von Kohlenstoffnanomaterialien für die molekulare Elektronik.

### Machbar, aber teuer: Nachrüstung von Kraftwerken

Hinsichtlich der Vermeidung von Schadstoffen ist es hilfreich, stationäre Verbrennungssysteme von mobilen zu unterscheiden. Stationär ist in diesem Zusammenhang beispielsweise ein Kraftwerk für die Stromerzeugung oder ein Dieselmotor als Notstromaggregat, bei denen durch entsprechende Steuerung kontrollierte Verbrennungsbedingungen eingehalten werden können. Ein einmal aufgeheizter Kessel wird langfristig bei nahezu optimalen Bedingungen gefahren, und Kraftwerke können nachträglich um großvolumige

und teure Filteranlagen, die dem Stand der Technik entsprechen, ergänzt werden. Für die kleineren mobilen Verbrennungssysteme ist eine Nachrüstung in diesem Umfang undenkbar.

Auch Wirkungsgrade von stationären Anlagen können durch Kopplung verschiedener Prozesse erhöht werden. Die Steuerung des stationären Systems kann dabei über Sensoren erfolgen, die wichtige Reaktionspartner am Ort der Entstehung nachweisen. Selbst das schnelle Anfahren von Gas-kraftwerken, die im Spitzenlastbetrieb zugeschaltet werden, lässt sich so mit moderner Lasertechnik in Echtzeit kontrollieren.

Mit Hilfe von Chemie und Verfahrenstechnik kann der Kohlendioxid-Ausstoß von stationären Großanlagen verringert werden. Intensiv wird erforscht, wie sich Kohlendioxid abtrennen, speichern oder verwerten lässt. Gelänge es, das Kohlendioxid-Problem zu lösen, könnten sogar Kohlekraftwerke wieder salonfähig werden, zumindest für eine Übergangszeit. Während alternative Kraftwerke – egal ob sie auf Wasserkraft, Sonnenlicht,

Gezeitenströmungen oder Erdwärme basieren – ihre Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit erst noch unter Beweis stellen müssen, ist die Energiegewinnung aus Kohle ein etablierter, technisch gut verstandener Prozess.

### Computergesteuerte Motoren

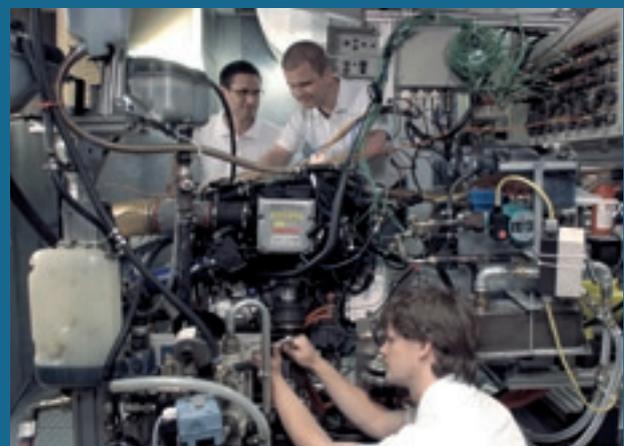
Mobile Antriebe unterscheiden sich deutlich von stationären Verbrennungsanlagen, auch wenn es um Schadstoffe geht: Da ein Motor nicht besonders schwer und teuer sein sollte, müssen zusätzliche Filter und Nachrüstungen nicht nur vom Gewicht, sondern auch von den Kosten im Rahmen bleiben. Außerdem ähnelt die Verbrennung in einem mobilen System nur bedingt der in einem stationären: Ein Automotor läuft bei Start oder Langstreckenfahrt in unterschiedlichen Betriebszyklen und jedes einzelne Zündereignis gibt individuell einen etwas anderen Verbrennungsverlauf.

Um die Bildung von Ruß und Stickoxiden weitgehend zu unterdrücken und zudem die Effizienz zu erhöhen – und damit den Ausstoß von Kohlendioxid zu senken – werden neue



Zwei Mitarbeiter von Daimler verschaffen sich detaillierte Einblicke in die Verbrennung eines Fahrzeugmotors, indem sie die Einspritz- und Verbrennungsvorgänge visualisieren.

(Bild: Daimler)



Wissenschaftler tüfteln am DiesOtto-Motor, einem Benziner mit Diesel-Genen.

(Bild: Daimler)

Verbrennungskonzepte entwickelt. Für zukünftige Motoren und Gasturbinen schlagen Verbrennungsforscher beispielsweise niedrigere Temperaturen und einemöglichst gute Durchmischung von Brennstoff und Luft vor. Das klingt allerdings einfacher als es ist, denn bei zu niedriger Verbrennungstemperatur erlischt die Flamme, und außerdem kann ein gut durchmischt brennbares Gemisch leicht ungewollt explodieren. Damit solche Konzepte optimal funktionieren, braucht man eine Computersteuerung der Verbrennung auf der Basis von Echtzeit-Informationen über wichtige Betriebsgrößen. Solche neuen Verbrennungsmotoren werden auch in Deutschland entwickelt; ein Beispiel ist der im Juli 2007 vorgestellte DiesOtto-Motor von Daimler, der Benzin- und Dieselsechnik kombiniert.

Zum Verbrennungsmotor gibt es nicht so viele Alternativen wie für Systeme der Stromerzeugung. Zur Verfügung stehen vor allem Brennstoffzellen, Elektromotoren oder Hybridantriebe, wobei entscheidend ist, wie die Betriebsstoffe – Wasserstoff, Methanol oder elektrischer Strom – erzeugt werden. All diese Konzepte werden konventionelle Verbrennungsmotoren nicht so schnell ersetzen. Stattdessen wer-

den Verbrennungsmotoren und auch Gasturbinen an Bedeutung gewinnen, die regenerative Brennstoffe nutzen. Diese Biokraftstoffe stellen, abgesehen von Problemen bei ihrer Erzeugung, besondere Anforderungen an die Maschine, in der sie verbrannt werden, und zwar unabhängig davon, ob sie als Zusatz oder als reiner Kraftstoff eingesetzt werden.

### Umweltfreundliche Biokraftstoffe?

Angenommen, man unternimmt mit dem Auto eine Weltreise und bekäme überall Biokraftstoff angeboten: In einigen Ländern würde er aus Mais hergestellt, in anderen aus Palm- oder Olivenöl, aus Weizen, Rüben oder Zuckerrohr, in den Ländern mit fortgeschrittener Technik vielleicht sogar aus Holz und Kompost. Dieses Gedankenspiel zeigt, dass es ein ungeheuer weites Spektrum von Substanzen gibt, die sich als Biosprit anbieten und die sich im Energiegehalt, in Zündgrenzen, Verbrennungstemperaturen, Fließeigenschaften und natürlich auch in der Bildung von Zwischen- und Endprodukten unterscheiden. Chemisch können Biokraftstoffe Alkohole wie Ethanol und Butanol sein, Ether oder Ester wie der

beispielsweise aus Rapsöl gewonnene Biodiesel.

Da diese Moleküle in ihrem Gerüst bereits Sauerstoff enthalten, wird ihnen eine geringere Tendenz zur Rußbildung nachgesagt als den verwandten Kohlenwasserstoffen – eine Eigenschaft, die aber erst jetzt detailliert untersucht wird. Selbst die Verbrennung von Ethanol, das in Brasilien schon lange als Kraftstoff eingesetzt wird, ist chemisch noch nicht bis ins letzte Detail aufgeklärt. Und Butanol, das ebenfalls als Biokraftstoff propagiert wird, liegt nicht nur in einer, sondern gleich in vier verschiedenen chemischen Strukturen vor, die sich in der Lage der Alkoholgruppe im Molekül unterscheiden. Bei der Verbrennung erzeugen diese vier Formen unterschiedliche Zwischenprodukte, wie ein neues massenspektrometrisches Verfahren erst kürzlich nachweisen konnte. Und nicht nur das: Bei der Verbrennung von Butanol und anderen Alkoholen entstehen auch Luftschadstoffe wie Formaldehyd und Acetaldehyd.

Bei Brennstoffgemischen, beispielsweise Benzin mit geringen Anteilen Bioethanol, und erst recht bei Kraftstoffen aus diversen Quellen von Biomasse, ist es noch schwierig, das komplette Spektrum der emittierten Abgase vorherzusagen. Für Verbrennungsforscher, für Chemiker, Physiker, Verfahrenstechniker und Ingenieure, gibt es also – und gerade jetzt – eine Menge zu tun, denn Verbrennung wird zumindest im mobilen Bereich auch in den kommenden Jahren eine wichtige Rolle spielen. Die Devise lautet daher: Wenn schon verbrennen, dann möglichst sauber und effizient!

### Katharina Kohse-Höinghaus

*Die Autorin ist Professorin für Physikalische Chemie an der Universität Bielefeld und Erste Vorsitzende der Deutschen Bunsen-Gesellschaft für Physikalische Chemie.*



Verbrennungsforschung: Zwei Entwickler von Bosch testen neue Systeme für die Motorsteuerung. Mit kontrollierter Selbstzündung werden Kraftstoff und Luft gleichmäßig im gesamten Brennraum gemischt, verteilt und vollständig verbrannt.

(Bild: Bosch)

Die Nutzung von Erdöl hat die Welt verändert. Nun wird der fossile Rohstoff knapp, und die Menschheit sucht Alternativen. Kraftstoffe sollen zukünftig aus Holz, Stroh und anderen ungenießbaren Pflanzenresten hergestellt werden und später vielleicht sogar aus Algen.



Raps: Rohstoff für Biodiesel.

## Biosprit vom Acker und aus dem Meer

Die uns zur Verfügung stehenden materiellen Rohstoffe in der Erdhülle bestehen aus den 92 natürlich vorkommenden chemischen Elementen. Will der Mensch die Rohstoffe nutzen, muss er sie sammeln und physikalisch-chemisch modifizieren. Da das Energie erfordert, sind materielle Rohstoffe und Energie unauflösbar miteinander verknüpft.

An Energie stehen der Menschheit drei nachhaltige primäre Quellen zur Verfügung: Neben Licht aus dem Fusionsreaktor Sonne, physikalisch betrachtet ein 5500 Grad Celsius heißer schwarzer Strahler, und Erdwärme (Geothermie) lässt sich die Planetenbewegung von Erde und Mond in Form der Gezeiten nutzen. Sonnenenergie

stellt den Löwenanteil und wurde in fossilen Rohstoffen über Jahrtausende gespeichert. Wir sind dabei, diesen Speicher im Zeitraum von wenigen Generationen zu leeren.

### Hafer als erster Superkraftstoff

Mobilität galt in der Evolution schon immer als Wettbewerbsvorteil und gewinnt im Zeitalter der Globalisierung weiter an Bedeutung. Grundlage für Mobilität ist Energie. Das erste Superbenzin der Menschheit war Hafer, ein Kraftstoff aus einer regenerativen Energiequelle, und ein gut genährtes Pferd war bis Anfang des vergangenen Jahrhunderts schnelles Transportmittel für Waren und Information.

Der Kraftstoff zu Beginn des Industriezeitalters, der Dampflokotiven antrieb, war Koks aus Steinkohle. Der dabei als Abfall anfallende Steinkohlenteer bildete die stoffliche Basis für die Vorläufer der heutigen chemischen Industrie.

Der Zweite Weltkrieg wiederum wurde durch Kraftstoffe aus der Kohleverflüssigung angetrieben. Anfang der 1950er-Jahre hing die deutsche Industrie noch ganz vom Rohstoff Kohle ab, da Erdöl und Erdgas hierzulande nicht wirtschaftlich verfügbar waren. Erst 1956 nach der Suez-Krise wurde Erdöl in Deutschland zu einem ernsthaften Konkurrenten von Kohle. Die Entwicklung von Verfahren, die Erdöl in Kraftstoffe umwandeln, sowie der zuneh-

## So funktioniert die Verflüssigung von Biomasse zu Kraftstoff

Für die Umwandlung von trockenen Pflanzenabfällen in Kraftstoffe entwickeln Wissenschaftler vom Forschungszentrum Karlsruhe derzeit ein dreistufiges Verfahren aus Schnellpyrolyse, Vergasung und Kraftstoffsynthese. In diesem Konzept wird die Biomasse in einem ersten Schritt durch Hitze unter Luftausschluss pyro-



Teil einer Pilotanlage im Forschungszentrum Karlsruhe: Hier wird Biomasse durch Schnellpyrolyse zu einem Öl verflüssigt, aus dem anschließend Kraftstoffe hergestellt werden.

(Bild: Forschungszentrum Karlsruhe)

lysiert. Dabei entsteht ein so genanntes Bio-Crudeoil, eine Suspension aus Pyrolyseöl und Pyrolysekoks, dessen Energiedichte 15- bis 20-mal höher ist als die Energiedichte der Ausgangsbiomasse. Die Pyrolyse soll dezentral in kleinen Anlagen durchgeführt werden, und zwar möglichst dort, wo die Biomasse lokal entsteht. Anschließend wird das gewonnene Bio-Crudeoil zu einer größeren zentralen Anlage transportiert, wo es in einem Vergaser zu Kohlenmonoxid und Wasserstoff umgesetzt wird. Die Mischung aus Kohlenmonoxid und Wasserstoff nennen Chemiker Synthesegas. Die Vergasung erfolgt bei Sauerstoffzufuhr, einem Druck von 30 bis 80 Bar und Temperaturen zwischen 1200 und 1500 Grad Celsius. Das Mischungsverhältnis von Kohlenmonoxid zu Wasserstoff in dem Synthesegas hängt dabei von den jeweils verwendeten Rohstoffen und Verfahren ab und kann durch eine weitere Stufe, bei der Kohlenmonoxid mit Wasser umgesetzt wird, den folgenden Umsetzungen angepasst werden. Aus dem so gewonnenen Synthesegas wird über bekannte chemische Prozesse Diesel oder Benzin hergestellt.

### Kohle und Erdgas sind keine Alternativen

Heute müssen wir erkennen, dass eine Zukunftsplanung auf der Basis Erdöl immer unsicherer wird. Daher ist es eine wichtige Aufgabe, alternative Rohstoffe für die bislang erdölbasierten Kraftstoffe bereitzustellen. Wenn der Verteilungskampf ums Öl zu immer größeren wirtschaftlichen Engpässen führt, können Kohle und Erdgas zwar prinzipiell als Alternativen dienen. Doch

da sie ebenfalls fossiler Natur sind, lösen sie die Probleme nicht wirklich. Eine nachhaltige Option ist, das einfallende Sonnenlicht zu nutzen und den Weg in eine solare Rohstoff- und Energiewirtschaft zu gehen. Auf Kernfusion zu setzen, also die Energiequelle der Sonne auf die Erde zu holen, ist aus heutiger Sicht nicht wirtschaftlich: Was die Sonne allein durch ihr Gravitationsfeld löst, nämlich ein heißes Plasma zusammenzuhalten, ist auf der Erde ein schwer zu lösendes Problem.

Da die kostengünstige Speicherung von Strom oder Wasserstoff in Automobilen, Flugzeugen und Schiffen noch nicht gelingt, werden die Kraftstoffe der mittleren Zukunft weiterhin organische Flüssigkeiten sein, denn nur sie können eine hohe Energiedichte einfach speichern. Außerdem lässt sich so die vorhandene Infrastruktur weiterhin nutzen.

### Erst aus Pflanzenölen oder Stärke, später aus Holz und Stroh

Seit einigen Jahren sind die so genannten Biokraftstoffe der ersten Generation, bei deren Herstellung nur ein Teil der Pflanze genutzt wird, auf dem Markt. Bekanntester Vertreter ist Biodiesel, ein in Deutschland überwiegend aus Rapsöl und fossilem Methanol erzeugter Rapsölmethylester. Für den Einsatz in Ottomotoren hingegen eignet sich Bioethanol, für dessen Produktion heute noch überwiegend Stärke aus Getreide eingesetzt wird. Die Ethanolgewinnung aus Holz, genauer: aus Lignocellulose, oder aus Siedlungsabfällen befindet sich in der Entwicklung und ist zukunftssträftig. Denn damit Nahrungsmittel- und Kraftstoffsektor nicht um Rohstoffe konkurrieren, sollen zukünftige Kraftstoffe aus Ernterückständen wie Stroh oder Restholz gewonnen werden.

mende Automobilverkehr ließen den Ölverbrauch in Deutschland steigen, bis schließlich Mitte der 1960er-Jahre das Zeitalter der Kraftstoffherstellung aus Kohle vorbei war.

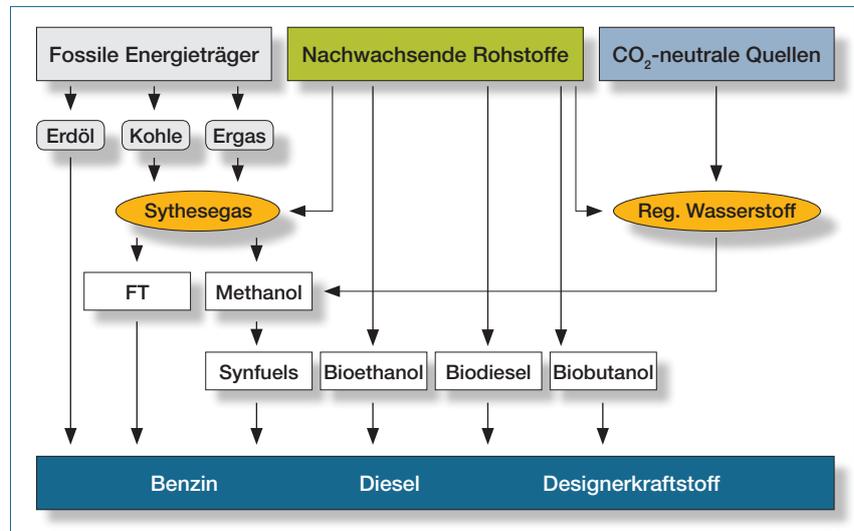
Seitdem hat sich die Welt, katalysiert durch Erdöl, in wenigen Jahrzehnten so stark verändert wie nie zuvor. Die Nachteile sind offensichtlich: Umweltverschmutzung, Klimawandel sowie der Verlust von Lebensräumen und Artenvielfalt.

Für diese Kraftstoffe der zweiten Generation, die jegliches Pflanzenmaterial nutzen, gibt es trotz intensiver Forschung noch keine großtechnischen Produktionsanlagen. Ein Grund ist, dass Biomasse ein komplexes Stoffgemisch ist, dessen Zusammensetzung je nach Pflanzensorte, Bodenbeschaffenheit und Klima des Anbaugebietes variiert.

Für die Produktion von Biokraftstoffen der zweiten Generation gibt es verschiedene Strategien. Restholz, Stroh und andere cellulosehaltige Rohstoffe können beispielsweise mit geeigneten Enzymen in Bioethanol umgewandelt werden, während sich feuchte Biomasse wie Ernterückstände, Klärschlamm oder Traubentrester besser zu Biogas, einer Mischung aus Methan und Kohlendioxid, vergären lässt. Eine andere Verwertung feuchter Biomasse ist die Umsetzung in überkritischem Wasser zu Wasserstoff und Kohlendioxid, aus denen der Kraftstoff Methanol zugänglich ist. Als überkritisch bezeichnet man Wasser, das einem Druck von mindestens 221 Bar und einer Temperatur von mindestens 374 Grad Celsius ausgesetzt wird. Unter diesen Bedingungen wird aus harmlosem Wasser eine aggressive Substanz. Für trockene Pflanzenabfälle wird derzeit auch ein dreistufiges Verfahren aus Schnellpyrolyse, Vergasung und Kraftstoffsynthese entwickelt (siehe Kasten).

### Biosprit aus dem Meer

Die Äcker für die Gewinnung von Biokraftstoffen der dritten Generation werden die Weltmeere sein. Hier wachsen Mikroalgen, die hauptsächlich aus Cellulose bestehen. Das stützende Lignin, das holzige Pflanzen in ihren Zellwände enthalten und das bei der Umwandlung in Kraftstoffe stört, fehlt bei den leichten Meerestalg. Außerdem verbraucht ihr Anbau kein Süßwasser – ein in Zukunft immer wichtiger werdendes Kriterium.



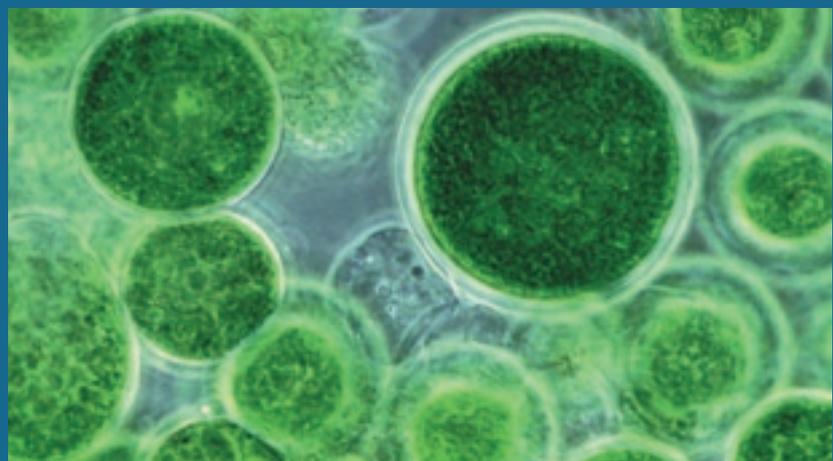
Das Schema zeigt die verschiedenen Wege der Kraftstoffherzeugung aus fossilen und regenerativen Energiequellen. FT steht für die Fischer-Tropsch-Synthese, bei der Synthesegas in flüssige Kohlenwasserstoffe umgewandelt wird. Eine Alternative zu diesem Prozess ist die Umsetzung von Synthesegas über das Zwischenprodukt Methanol zu synthetischen Kraftstoffen, den Synfuels.

Die Umprogrammierung der Weltwirtschaft von Wachstum auf eine nachhaltige Entwicklung bedarf der Zusammenarbeit von Natur-, Ingenieur-, Geistes- und Sozialwissenschaften, also aller Wissenschaftsdisziplinen. Es ist eine ihrer wichtigsten Zukunftsaufgaben, eine nach-fossile und nachhaltige Ära der Stoff- und Energieversorgung zu organisieren. Die Entwicklung von Verfahren für die Kraftstoffgewinnung aus regenerativen Rohstoffen spielt hier eine

Schlüsselrolle. Flankierende Maßnahmen – wie die Erhöhung von Wirkungsgraden aller Produktionsprozesse und die Verlangsamung des Wachstums der Weltbevölkerung – sind aber notwendig, um die Stoff- und Energieversorgung nachhaltig zu sichern.

### G. Herbert Vogel

Der Autor ist Professor für Technische Chemie an der Technischen Universität Darmstadt.



Mikroalgen unter dem Mikroskop: Sie sind der Rohstoff für Kraftstoffe der dritten Generation. (Bild: Fraunhofer IGB)

Treibt die Produktion von Biokraftstoffen die Preise für Nahrungsmittel in die Höhe? Werden deswegen Regenwälder gerodet? Eine generelle Antwort gibt es nicht, denn Biosprit ist nicht gleich Biosprit. Ein differenzierter Blick auf die Kraftstoffe von morgen.



Weizen: Auf den Teller oder in den Tank? Die Entwicklung von Biokraftstoffen der zweiten Generation wird diese Frage erübrigen.

(Bild: © H.-J. Sydow)

## Wie „bio“ ist Biosprit?

Menschen, die schon einmal unter Nahrungsmittelknappheit oder gar einer Hungersnot gelitten haben, reagieren spontan mit Unbehagen, wenn sie hören, dass Getreide statt im Brot im Tank landet. Ist das ein altmodisches Gefühl? Angesichts der riesigen Mengen an Biomasse, die die Natur jährlich durch Photosynthese erzeugt, nimmt sich der Kraftstoffverbrauch der Menschheit gering aus. Der weltweite Energiebedarf für den Verkehr liegt nur bei drei Prozent der jährlich in Biomasse gebundenen Energie. Man muss sich auch ins Gedächtnis rufen, dass mit den modernen Biokraftstoffen eine uralte Verfahrensweise ihre Renaissance erfährt. Vor dem fossilen Zeitalter war Biomasse schon einmal der Kraftstoff schlechthin, und zwar als Pferdefutter.

Trotzdem ist die Frage berechtigt, ob unser Durst nach Biokraftstoffen den Hunger in der Welt verstärken wird. Schließlich müssen heute fünfmal mehr Menschen ernährt werden als vor der Erfindung des Autos. Außerdem beansprucht die Menschheit die Biosphäre schon bis an die Grenzen ihrer Belastbarkeit.

### Gründe für Biokraftstoffe

Der Auslöser für die Entwicklung von Biokraftstoffen war zunächst das Bestreben, unabhängig vom politischen Druck der Organisation Erdöl exportierender Länder (OPEC) zu sein. Kraftstoffe aus Biomasse verschiedenster Herkunft sollten Benzin und Diesel aus Rohöl ersetzen oder ergänzen.

Mittlerweile verfolgt man mit dem Einsatz von Biokraftstoffen noch zwei andere Ziele: Klimaschutz und Schonung der endlichen fossilen Ressourcen. Kraftstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen, die durch Photosynthese aus dem Kohlendioxid der Atmosphäre entstanden sind, setzen bei der Verbrennung im Fahrzeug nur so viel Kohlendioxid frei, wie die Natur zuvor in den Pflanzen gebunden hat.

Die wichtigsten Biokraftstoffe heute sind Ethanol, Biodiesel und Pflanzenöle. Brasilien hat nach den Ölkrisen in den 1970er-Jahren eine effiziente Technik aufgebaut, um aus Zuckerrohr Ethanol für den Verkehr zu gewinnen. In Deutschland hingegen steht ein anderes Verfahren an erster Stelle: Hier wird seit über einem Jahrzehnt Biodie-

sel durch Umwandlung von Rapsöl in Rapsölmethylester hergestellt.

Mittlerweile haben andere Länder nachgezogen. So werden in den USA aus Mais und Weizen ähnlich große Mengen Ethanol erzeugt wie in Brasilien aus Zuckerrohr. Außerdem gewinnen die USA aus Raps und Soja große Mengen Biodiesel. In Ländern wie Malaysia und Indonesien wachsen Ölpalmen auf riesigen Plantagen, die Palmöl für Biodiesel liefern.

Da die bisherigen Prozesse jedoch in vieler Hinsicht unbefriedigend sind, trimmen Forscher weltweit die noch jungen Produktionsverfahren für Biokraftstoffe auf Effizienz. Enzymatische Verfahren beispielsweise zielen darauf ab, Ethanol nicht nur aus Zucker, sondern aus allen Kohlenhydraten der Pflanzen zu gewinnen, also auch aus Stärke, Cellulose und Hemicellulose. Endziel ist die Verwertung der Kohlenhydrate der gesamten Pflanzenmasse.

Besonders deutsche Wissenschaftler gehen noch einen prinzipiell anderen Weg: Sie versuchen, jede Form von Biomasse – nicht nur die Kohlenhydrate

– zu verwerten, indem sie die Biomasse bei hohen Temperaturen vergasen und das entstehende Gas in einer anschließenden Reaktion katalytisch in Kraftstoffe umwandeln (siehe Beitrag auf Seite 57). Da diese Kraftstoffe durch Verflüssigung von Biomasse entstehen, nennt man sie Biomass-to-Liquid- oder abgekürzt BtL-Kraftstoffe. Die Umwandlung von Synthesegas in flüssige Kohlenwasserstoffe haben die beiden deutschen Chemiker Franz Fischer und Hans Tropsch im ersten Drittel des vergangenen Jahrhunderts entwickelt. Mit dem Verfahren, das man noch heute als Fischer-Tropsch-Synthese bezeichnet, wurde damals Synthesegas aus Kohle in Kraftstoffe umgewandelt. Biokraftstoffe, bei deren Herstellung die ganze Pflanze und nicht nur ihr Korn oder Öl genutzt wird, werden als Kraftstoffe der zweiten Generation bezeichnet.

### Der Haken: Biomasse ist keine Primärenergie

Das Konzept der Biokraftstoffe ist zwar auf den ersten Blick bestechend, zeigt aber bei genauer Betrachtung deutliche Schwächen, denn Biomasse

ist keine Primärenergie im Sinne von Rohöl, Kohle oder Erdgas. Man kann sie nicht einfach fördern, sondern man muss sie erst erzeugen. Anbau, Ernte, Transport, Lagerung, Trocknung und andere Aufbereitungsschritte sowie die eigentliche Kraftstoffsynthese verbrauchen viel Energie. Der tatsächliche Bedarf an Biomasse für Kraftstoffe ist also erheblich größer, als es der Vergleich der Energieinhalte suggeriert.

Daraus folgen zwei gravierende Fragen: Stehen überhaupt genug Flächen bereit, um Pflanzen für die Kraftstoffgewinnung anzubauen? Und gibt es genügend Wasser? Der Flächenbedarf zwingt dazu, Wald- oder Agrarfläche umzuwidmen; der Wasserbedarf erhöht den ohnehin schon zu hohen Süßwasserverbrauch der Landwirtschaft.

Obwohl der Einsatz von Biomasse für Kraftstoffe gemessen am globalen Biomasseaufkommen heute noch völlig unbedeutend erscheint, treten schon Schwierigkeiten auf. So müssen tropische und subtropische Wälder weichen, um Platz für Zuckerrohr- und Palmölplantagen zu schaffen. Auch die Klimaneutralität erweist sich als Fata



Verladung von Zuckerrohr: In Brasilien hat sich die Produktion von Bioethanol aus Zuckerrohr längst etabliert.

(Bild: Shell)

Morgana: Die Emissionen von Treibhausgasen während der Erzeugung von Biosprit sind keinesfalls zu vernachlässigen. Und außerdem bedrängen Biokraftstoffe die Nahrungsmittelproduktion.

## Synergien zwischen Biosprit und Nahrungsmitteln nutzen

Die Umwandlung von Bauernhöfen in Energiefarmen hat auf den Weltmärkten zu Preiserhöhungen bei Weizen, Mais und Soja geführt. Unabhängig davon, ob Ernteausfälle und Spekulation diese Entwicklung verstärken, deuten sie einen Trend an. Europa und die USA werden ihr landwirtschaftliches Exportverhalten ändern. Dies führt zwar kurzfristig zu schmerzhaften Preisanstiegen, kann aber auch bewirken, dass die Bauern in Entwicklungs- und Schwellenländern ihre lokalen Märkte zurückgewinnen, die sie an die hoch subventionierte Landwirtschaft der USA und der EU verloren haben.

Die Produktion von Biokraftstoffen und Nahrungsmitteln kann sich auch gegenseitig fördern. Abfälle aus der Biokraftstoffproduktion etwa können

als Futtermittel dienen. Andererseits ist es möglich, Gülle, Stroh und andere landwirtschaftliche Abfälle sowie Abfallfette und sonstige Reste aus der Nahrungsmittelindustrie als Vorstufen für Kraftstoffe einzusetzen.

Eine weitere Synergie besteht darin, genügsame Pflanzen, die den Wasserhaushalt und die Qualität von stark degradierten Böden stabilisieren oder gar verbessern, im Fruchtwechsel oder unterstützend zum Anbau von Nahrungsmitteln einzusetzen. In Indien oder Madagaskar wird dazu beispielsweise mit *Jatropha* experimentiert, einer strauchartigen Wildpflanze, deren Früchte bis zu 40 Prozent Öl enthalten. Sie gedeiht auch auf kargen Böden, benötigt wenig Wasser und kann das lokale Mikroklima günstig beeinflussen und so den übrigen Anbau verbessern.

## Die Zukunft für Biokraftstoffe in Deutschland

Im Jahr 2006 wurden in Deutschland zweieinhalb Millionen Tonnen Biodiesel, eine halbe Million Tonnen Bioethanol und eine Million Tonnen Pflanzenöle als Kraftstoffe getankt. Der

Anteil von Biosprit am deutschen Kraftstoffeinsatz belief sich damit auf gut sechs Prozent. Im Jahr 2007 wurden schon über fünf Milliarden Liter Biokraftstoffe in den Verkehr gebracht.

Während in der Vergangenheit ein großer Teil des Biokraftstoffs aus heimischer Produktion stammte, muss jetzt immer mehr importiert werden. Allerdings hat der Boom bei Biokraftstoffen im Frühjahr 2008 etliche Dämpfer erfahren, die die Bundesregierung veranlassen haben, das Tempo des Ausbaus zu drosseln. Zu den schon seit Jahren geäußerten ökonomischen und ökologischen Einwänden hat sich ein technisches Problem gesellt: Unser Fahrzeugpark ist für hohe Beimischungen von Biosprit nicht geeignet.

Laut Statistiken der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) wurden in Deutschland im Jahr 2007 auf einer Fläche von knapp zwei Millionen Hektar Energiepflanzen angebaut. Dies entspricht zehn Prozent der landwirtschaftlichen Fläche Deutschlands. Auf 1,4 Millionen Hektar, umgerechnet auf sieben Prozent der gesamten Anbaufläche, wuchsen Kraftstoffpflanzen. Legt



Bioethanol-Anlage in Zeitz in Sachsen-Anhalt: CropEnergies, ein Unternehmen der Südzucker-Gruppe, produziert hier Bioethanol aus Getreide und Zuckersirup.

(Bild: Martin Jehnichen)

man die von der FNR angegebenen Flächenerträge für Biodiesel, Pflanzenöl und Bioethanol zugrunde, konnte diese Fläche nur einen Teil des deutschen Bedarfs an Biokraftstoffen decken.

Optimistische Szenarien gehen davon aus, dass die Fläche für Energiepflanzen in Deutschland verdoppelt werden könnte. Damit würde ein Fünftel der deutschen Agrarfläche für Energiepflanzen und davon der größte Teil für Biokraftstoffe eingesetzt werden. Ob diese Szenarien Wirklichkeit werden, hängt auch von der Entwicklung der Getreidepreise, der Getreideproduktion sowie staatlicher Maßnahmen ab.

Für die Land- und Forstwirtschaft ergeben sich Chancen, aber auch Risiken wegen des Energie-, Wasser-, Dünge- und Pflanzenschutzmittelbedarfs der neuen Kulturen. Zudem müssen technische Fragen nach Transport und Lagerung der Biomasse gelöst werden. Man wird zügig auf Biokraftstoffe der zweiten Generation übergehen, da die Kraftstoffausbeute durch Nutzung der gesamten Pflanze deutlich steigt und außerdem Bioabfälle aller Art als Rohstoff dienen können.

## Die Agenda für die kommenden Jahre

Die Konkurrenz zwischen den Grundbedürfnissen der wachsenden Weltbevölkerung und den noch schneller wachsenden Mobilitätsansprüchen ist in vollem Gang. Der Markt für Biosprit wächst, und dank staatlicher Förderprogramme gewinnen die neuen Kraftstoffe weltweit immer mehr an Bedeutung. Die Umwandlung von Wald und landwirtschaftlichen Flächen, auf denen einst Nahrungsmittel wuchsen, in Kraftstoffplantagen setzt sich fort.

Die Produktion von Biokraftstoffen ist kein Selbstzweck, sondern will – das ist das eigentliche Ziel – zur Entwicklung einer regenerativen Verkehrsstruktur beitragen. Um dieses Vorhaben umweltschonend und ökonomisch zu erreichen, müssen vor allem ertragreiche und genügsame Pflanzen entwickelt werden. Auch der Schutz der Böden vor Erosion und Versalzung durch Intensivbewässerung darf nicht vernachlässigt werden.

Was also ist in den kommenden Jahren zu tun? Einen Ausgleich zwi-

schen Nahrung und Mobilität können ehrgeizige Effizienzstrategien schaffen. Hier sollte die Reduktion des Kraftstoffverbrauchs weiterhin ganz oben auf der Agenda stehen, denn sie vermeidet einen überstürzten Ausbau der Produktion von Biokraftstoffen und entspannt die Konkurrenz zur Nahrungsmittelversorgung. Hebel sind hier einerseits effizientere Antriebe, andererseits der verstärkte Einsatz von leichteren Materialien im Fahrzeugbau. Auch die Weiterentwicklung von Batterien für Hybridautos, die Strom aus dem öffentlichen Netz beziehen und damit teilweise Kraftstoffe substituieren, ist ein wichtiger Schritt auf dem Weg zu einer nachhaltigen Verkehrsstruktur.

### Hermann Pütter

*Der Autor war bis zu seinem Ruhestand Anfang 2006 langjähriger Mitarbeiter des Chemieunternehmens BASF, zuletzt als wissenschaftlicher Direktor und Leiter der Forschungsgruppe Elektrochemische Prozesse. Seit 2007 ist er Energiekoordinator der Gesellschaft Deutscher Chemiker. Hermann Pütter hat auch den Beitrag auf Seite 17 verfasst und ist Mitautor des Beitrags auf Seite 73.*



In Deutschland gibt es zurzeit 3800 Biogasanlagen. Und es werden immer mehr. Kein Wunder, denn Biogas lässt sich so vielseitig nutzen wie Erdgas, ist aber erneuerbar. Biogas aus Pflanzen von einem Hektar Anbaufläche deckt den jährlichen Kraftstoffbedarf von fünf Fahrzeugen der Golfklasse.



Biovergasung ist umweltfreundliche Energiegewinnung aus Biomasse.

(Bild: EnvTec Biogas)

## Kraftstoff, Wärme und Strom aus dem Bioreaktor

**B**iogas ist ein energiereiches Gas, das aus 50 bis 70 Prozent Methan, 30 bis 45 Prozent Kohlendioxid und geringen Anteilen an Schwefelwasserstoff, Wasserstoff und Stickstoff besteht. Es bildet sich beim Abbau von organischer Substanz durch Methanbakterien, die zu den ältesten Lebensformen auf der Erde zählen. Dieser Abbauprozess erfolgt nur im anaeroben Milieu, also nur dann, wenn Sauerstoff fehlt. Am Abbau der Biomasse sind neben den Methanbakterien viele andere Mikroorganismen beteiligt. Sie zerlegen die verschiedenen organischen Substanzen, die überwiegend aus Kohlenhydraten, Fetten und Eiweißen bestehen, zunächst in ihre Einzelbausteine. Methanbakterien wan-

deln diese dann in Biogas um. Bei der mikrobiellen Umwandlung von Biomasse bildet sich Methan je nach Ausgangsmaterial entweder durch Spaltung von Essigsäure, wobei neben Methan auch Kohlendioxid entsteht, oder durch Oxidation von Wasserstoff mit Kohlendioxid.

Die Methangärung ist ein wichtiger Glied im Stoffkreislauf der Natur. Bereits 1776 beschrieb der italienische Physiker Alessandro Volta Biogas als „brennbare Luft über Sümpfen“. Aber erst 110 Jahre später wurde die Entstehung von Biogas auf die Tätigkeit von Mikroorganismen zurückgeführt.

### Als Treibgas schon vor dem Zweiten Weltkrieg

Technisch eingesetzt wurde die Methangärung erstmals vor über 100 Jahren, jedoch zunächst nur, um organisches Material in Klärschlamm abzubauen. Energetisch genutzt wurde das dabei entstehende Gas damals noch nicht.

Erst vor Beginn des Zweiten Weltkriegs wurde in Deutschland Klärschlamm zusammen mit landwirtschaftlichen Reststoffen gezielt zu Biogas vergärt, das als Kraftstoff diente, vorzugsweise für schwere Fahrzeuge wie Lastkraftwagen. Das Rohgas wurde dafür getrocknet, von Kohlendioxid und

Schwefelwasserstoff befreit und zur Lagerung in Stahlflaschen verdichtet. Das hat funktioniert, jedoch kam es vereinzelt zum Bersten der Drucktanks, wenn das Gas nicht genügend getrocknet und entschwefelt wurde.

Nach dem Zweiten Weltkrieg wurden erste größere Biogasanlagen entwickelt, um in der Landwirtschaft anfallende organische Reste zur Erzeugung von Strom und Wärme zu nutzen. Teils diente das Gas auch als Treibstoff für Traktoren.

Bis zum Jahr 2000 nahm die Zahl der Biogasanlagen in Deutschland nur langsam zu. Erst seit vor acht Jahren das Erneuerbare-Energien-Gesetz eingeführt wurde, das die Einspeisung von Strom aus Biogas in das öffentliche Netz regelt und eine feste Vergütung garantiert, steigen sowohl die Zahl der Anlagen als auch die installierte Leistung stark an. In den vergangenen zehn Jahren ist die Zahl der Biogasanlagen um den Faktor sechs gewachsen. Die derzeit 3800 Biogasanlagen mit einer installierten elektrischen Leistung von mehr als 1300 Megawatt decken etwa 1,3 Prozent der deutschen Stromproduktion.

### Energiepflanzen für höhere Gasausbeute

Biogasanlagen unterscheiden sich von anderen Anlagen, die Biomasse umsetzen, vor allem darin, dass sie eine breite Palette an Biomasse in Energie umwandeln: Gülle, Jauche, Mist, Erntereste aus der Landwirtschaft, häusliche Bioabfälle, Reststoffe und Nebenprodukte aus der Agrar- und Lebensmittelindustrie sowie industrielle Abwässer und Klärschlamm aus der Abwasserreinigung.

Im Zuge des aktuellen Ausbaus von erneuerbaren Energiequellen werden Pflanzen auch speziell für die Biogaserzeugung angebaut. Diese Energiepflanzen zeichnen sich durch eine hohe Energiedichte aus, sind ganzjährig lagerungsfähig und lassen sich gut vergären. Für die Biogaserzeugung eignen sich sämtliche Pflanzen, die viel Biomasse pro Flächeneinheit liefern und zum Erntezeitpunkt nur wenig verholzt sind. Zurzeit werden vor allem Silomais und Silage aus ganzen Getreidepflanzen, Grünroggen oder Gras eingesetzt. Bezogen auf die Frischmasse liefern Energiepflanzen deutlich

höhere Biogasausbeuten als Gülle. Noch besser eignen sich einige ausgewählte Abfallstoffe aus der Lebensmittel- und Agrarindustrie – wie altes Brot und Altfette –, die jedoch nur begrenzt verfügbar sind.

Biogas kann auf unterschiedliche Weise energetisch genutzt werden. Je nach Aufbereitungsgrad kann es in einem Heizkessel Wärme erzeugen oder in einem Blockheizkraftwerk oder einer Brennstoffzelle Strom und Wärme. Außerdem kann Biogas als Kraftstoff dienen oder ins Erdgasnetz eingespeist werden.

Derzeit wird Biogas überwiegend in Blockheizkraftwerken zur kombinierten Strom- und Wärmeerzeugung eingesetzt und der Strom ins Netz eingespeist. Ein geringer Teil der Abwärme des Verstromungsaggregates hält die Prozesstemperatur der Biogasanlage aufrecht, der überwiegende Teil steht anderweitig zur Verfügung, etwa zur Versorgung mit Nahwärme, für Trocknungsprozesse oder zur Kälteerzeugung. Ein Kubikmeter Biogas erzeugt durchschnittlich je 2,5 Kilowattstunden Strom und Nutzwärme.



Die Biogasbranche boomt: Biogaspark zur Stromerzeugung in Penkun in Mecklenburg-Vorpommern.

(Bild: NAWARO Bionenergie AG)



Noch sieht man sie selten: Tankstelle für Biogas.

(Bild: Österreichischer Biomasse-Verband)

Die Umwandlung von Biogas in Strom erfolgt in speziellen Gasmotoren mit Fremdzündung sowie in Seriendieselmotoren, denen zur Selbstzündung eine geringe Menge Zündöl zugeführt werden muss. Da die Abwärme eines Blockheizkraftwerkes wegen der häufig abgeschiedenen Lage von Biogasanlagen meistens nur unvollständig oder nicht ganzjährig genutzt werden kann, gewinnen andere Wege der Verwertung stärker an Bedeutung.

## Ein Hektar für 68 000 Kilometer

Besonders interessant ist der Einsatz von Biogas als Kraftstoff im Verkehr, der neben der vollständigen energetischen Nutzung noch viele andere Umweltvorteile hat. Für die Verwendung als Kraftstoff muss das Gas fast vollständig getrocknet und entschwefelt werden. Außerdem wird Kohlendioxid abgetrennt und der Methangehalt so auf mindestens 97 Prozent angehoben. Damit herkömmliche Erdgasfahrzeuge Biomethan tanken können und mit einer Tankfüllung möglichst lange Strecken fahren, wird es

auf einen Druck von etwa 250 Bar verdichtet.

Die bei der Verbrennung von Biogas im Motor entstehenden Abgase enthalten keine Feinstäube und deutlich weniger Stickoxide und Schwefeldioxide als die Abgase aus herkömmlichen Otto- und Dieselmotoren. Verglichen mit anderen Biokraftstoffen zeichnet sich Biogas durch eine höhere energetische Flächeneffizienz aus. Bei Verwendung von Silomais, bei dem die ganze Pflanze vergoren wird, erhält man pro Hektar eine Methanmenge, die einem Dieseläquivalent von etwa 4000 Litern entspricht. Somit reicht die von einem Hektar bereitgestellte Methanmenge für eine Fahrstrecke von etwa 68 000 Kilometern oder deckt, anders gerechnet, den durchschnittlichen jährlichen Kraftstoffbedarf von fünf Fahrzeugen der Golfklasse.

Die bisherigen Biokraftstoffe der ersten Generation, Biodiesel und Bioethanol, weisen zwar eine schlechtere Flächeneffizienz auf, besitzen aber den Vorteil, dass sie als flüssige Kraftstoffe

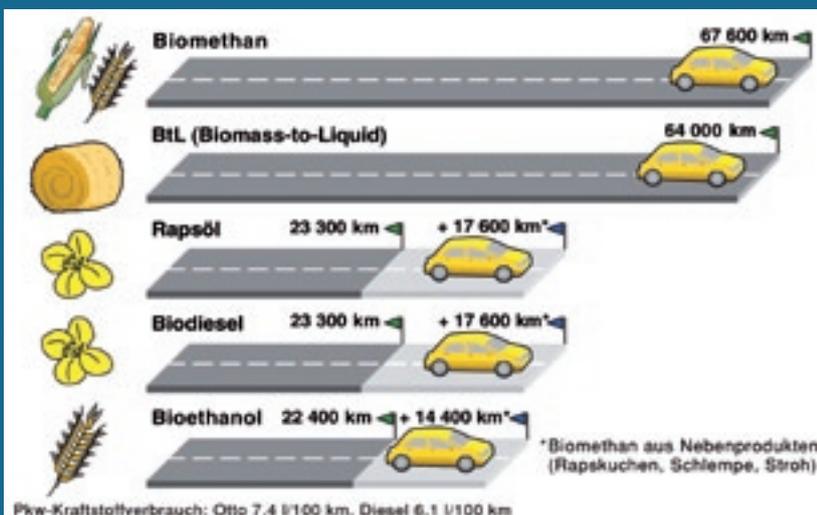
problemlos in die vorhandene Kraftstoffkette integriert werden können. Während in Skandinavien und der Schweiz Biomethan als Kraftstoff vor allem im Flottenbetrieb bereits weit verbreitet ist, befindet sich die Nutzung in Deutschland erst am Anfang.

## Biogas statt Erdgas

Wird Biogas auf Erdgasqualität aufbereitet, kann es in das vorhandene Erdgasnetz eingespeist werden. Derzeit gibt es in Deutschland bereits zwölf solcher Anlagen: je eine in Hessen, Brandenburg und Sachsen-Anhalt, drei in Baden-Württemberg und je zwei in Bayern, Nordrhein-Westfalen und Niedersachsen. Vier weitere Anlagen, die Biogas ins Ergasnetz einspeisen werden, gehen voraussichtlich noch 2008 in Betrieb und 16 befinden sich in der Planungsphase. Mit dem beschleunigten Ausbau der Einspeisung von Biomethan ins Erdgasnetz streben die Gasversorger an, unabhängiger von Gasimporten zu werden und die Emissionen von Treibhausgasen zu reduzieren.

Auch der Einsatz von Biogas in Brennstoffzellen wird immer interessanter, da im Vergleich zu herkömmlichen Nutzungsrouten ein wesentlich höherer elektrischer Wirkungsgrad (von etwa 50 Prozent) erreicht werden kann, bei gleichzeitig geringem Wartungsaufwand und ohne die bei motorischer Verbrennung störenden Lärmemissionen. Versuche mit verschiedenen Brennstoffzellen wurden bereits erfolgreich abgeschlossen, jedoch müssen die Techniken bis zum Praxiseinsatz noch optimiert werden. Außerdem ist die Herstellung von Brennstoffzellen bislang noch zu teuer.

Die Beispiele zeigen, dass Biogas aufgrund der Ähnlichkeit zu Erdgas zukünftig vielfältige Aufgaben in einer nachhaltigen Energiewirtschaft übernehmen



Biokraftstoffe im Vergleich: So weit kommt ein PKW mit Biokraftstoffen von einem Hektar Anbaufläche. Bei der Produktion von Rapsöl, Biodiesel und Bioethanol fallen Reste an, die noch zu Biogas vergärt werden können. Die Strecke, die man mit diesem Biogas fahren könnte, ist zusätzlich angegeben. (Bild: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V.)

kann. Da Biogas zeitlich und räumlich flexibel einsetzbar ist, kann es besonders auch im Verbund mit anderen erneuerbaren Energieträgern die Energieeffizienz verbessern. Trotz der vielfältigen Nutzungsmöglichkeiten darf jedoch nicht übersehen werden, dass Biogas voraussichtlich nicht mehr als

zehn Prozent des Primärenergieverbrauchs decken können. Es muss daher zukünftig besonders darauf geachtet werden, dass die verschiedenen erneuerbaren Energieträger dort eingesetzt werden, wo sie jeweils die höchste Effizienz erreichen. Für Biogas ist das die kombinierte Erzeugung von

Strom und Wärme sowie die Nutzung als Kraftstoff im Verkehr.

**Peter Weiland**

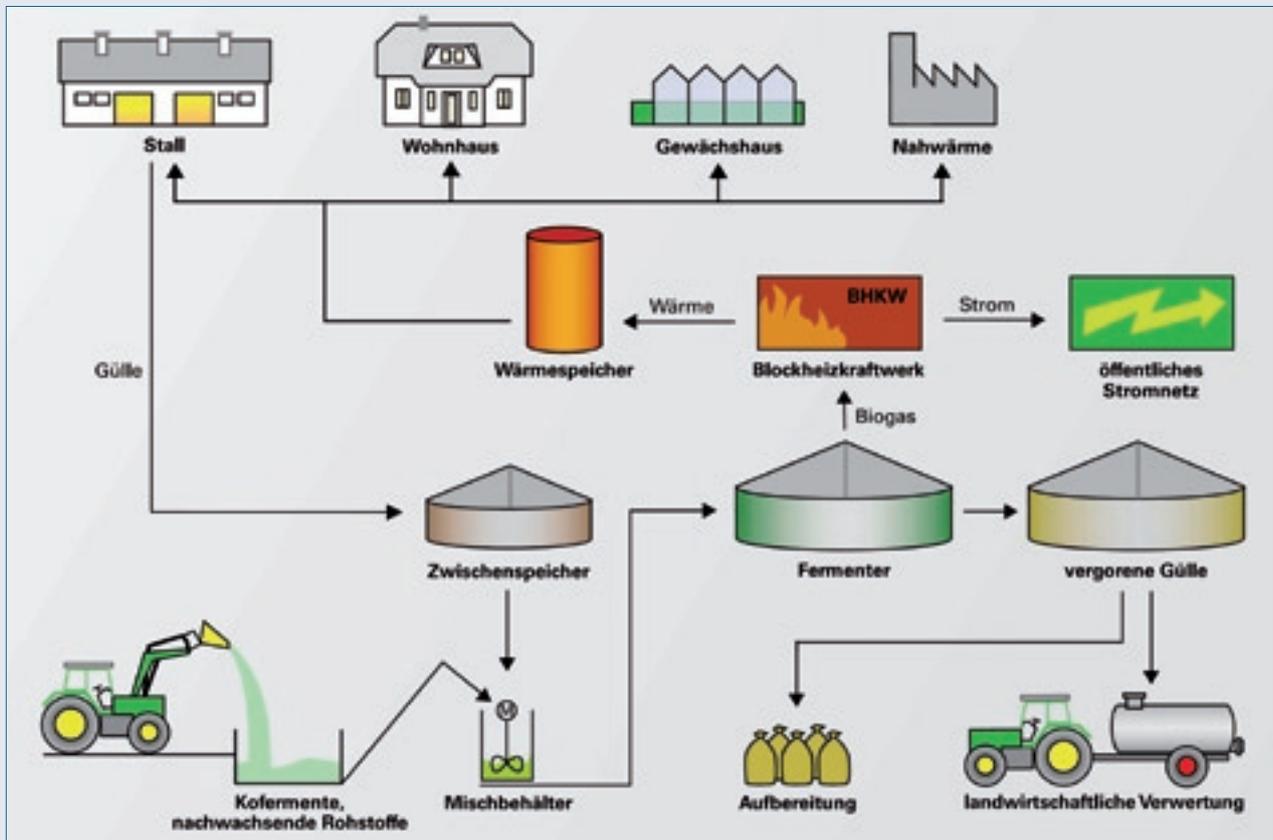
*Der Autor ist Direktor und Professor am Institut für Agrartechnologie und Biosystemtechnik des Johann Heinrich von Thünen-Instituts in Braunschweig.*

## So funktioniert eine Biogasanlage

Für die Vergärung von Biomasse zu Biogas gibt es viele verschiedene Verfahren. Herzstück einer jeden Biogasanlage ist der Fermenter, ein Bioreaktor, in dem Bakterien die Biomasse unter Ausschluss von Sauerstoff in Biogas umwandeln. Die Fermenter sind gasdichte Behälter, die wärmeisoliert sind und bei einer Temperatur zwischen 35 und 55 Grad Celsius betrieben werden. Das zu vergärende

Material gelangt entweder mit Pumpen oder speziellen Feststoffeintragsystemen in den Fermenter. Das bei der Vergärung gebildete Gas wird im Kopf des Fermenters oder in einem externen Gasspeicher aufgefangen, bevor es einer energetischen Nutzung zugeführt wird. Die Gärreste dienen als wertvoller Dünger.

Das Gas, das aus dem Fermenter kommt, ist mit Wasserdampf gesättigt und enthält je nach Zusammensetzung des Ausgangsmaterials noch Spuren an Schwefelwasserstoff. Da das zur Korrosion der Anlage beim Gasverbraucher und der Biogasanlage selbst führen kann, muss das Biogas grundsätzlich getrocknet und entschwefelt und je nach Verwertung noch anderweitig behandelt werden.



Schema der Erzeugung und Nutzung von Biogas. (Bild: EnviTec Biogas)

Die industrielle Nutzung von Mikroorganismen ist nichts Neues. Bei der Herstellung von Bier, Brot und Käse leisten die Kleinstlebewesen schon lange ihre Dienste. Nun sollen sie der Chemieindustrie den Weg aus der Rohstoffkrise weisen.



Der Schimmelpilz *Aspergillus niger* produziert Enzyme, die der Industrie als Biokatalysatoren dienen. Mit gentechnischen Methoden wurde der Pilz darauf getrimmt, dass er – quasi als lebende Fabrik – große Mengen der Enzyme herstellt. Auf dem Bild sind Zellfäden von *Aspergillus niger* zu sehen. Die Fäden haben einen Durchmesser von rund zwei bis fünf Mikrometern.

(Bild: BASF)

## Mikroben in der Chemieindustrie

Es ist unumstritten, dass unser gesamtes heutiges Wirtschaftssystem auf den Rohstoff Erdöl angewiesen ist. Nach weitläufiger Meinung versiegt diese Ressource in absehbarer Zeit. Dabei ist unerheblich, ob dieser Zeitpunkt in 40 oder 100 Jahren erreicht wird. Fakt ist, dass er eines Tages kommen wird – und je eher Alternativen für die Stoffproduktion und die Energiegewinnung zur Verfügung stehen, desto gelassener kann man diesem Tag entgegensehen.

Laut Internationaler Energie-Agentur dämpft eine Erhöhung des Rohölpreises um nur zehn Dollar je Barrel das Wirtschaftswachstum in der Euro-Zone momentan um 0,5 Prozent.

Jährlich werden weltweit 3700 Millionen Tonnen Rohöl verbraucht, davon etwa zehn Prozent für chemische Synthesen in der Industrie. Der Rest wird zur Energiegewinnung und für den Transport benötigt. Es liegt nahe, dass man vor allem Alternativen für die Energieversorgung sucht. Aber auch in der chemischen Industrie gewinnen nachwachsende Rohstoffe an Bedeutung. Neben der chemischen und physikalischen Umwandlung von Biomasse in Biosprit oder in Ausgangsstoffe für die Chemieindustrie spielt die biotechnische Umsetzung von Stärke, Zucker und Cellulose durch Enzyme und Mikroorganismen eine immer größere Rolle. Diesen Bereich der Forschung und Entwicklung bezeichnet man in Europa als „weiße Biotechnologie“, weltweit

eher als „industrial biotechnology“. Zur industriellen Biotechnologie zählt die Gewinnung von Biogas, Biodiesel und anderen alternativen Energieträgern ebenso wie die Herstellung von Grund- und Feinchemikalien aus nachwachsenden Rohstoffen.

### Ölraffinerie versus Stoffwechsel

Die Prozesse in einer klassischen Ölraffinerie lassen sich mit dem Stoffwechsel einer Mikrobenzelle vergleichen. Beide Systeme produzieren viele Substanzen, die als Ausgangsstoffe für weitere Synthesen dienen. In einer Raffinerie werden aus dem Rohstoff Erdöl diverse Kohlenstoffverbindungen hergestellt, die in weitere Prozesse der chemischen Industrie oder in den

Energiesektor fließen. Die Zelle macht es ähnlich: Sie wandelt einen Rohstoff, meist Zucker, in verschiedenste Kohlenstoffverbindungen um, die im Stoffwechsel zu weiteren Produkten oder zu Energie umgesetzt werden.

Will man die mikrobiellen Prozesse großtechnisch nutzen, braucht man ausreichend Rohstoffe, etwa fermentierbare Kohlenhydrate aus Zuckerrohr, Zuckerrüben, Getreide, Holz und anderen nachwachsenden Rohstoffen. Bakterien, Hefen oder Pilze, die für ihren industriellen Einsatz meist gentechnisch modifiziert werden, wandeln die Kohlenhydrate und andere Ausgangsstoffe in die gewünschten Verbindungen um. Manche Produkte, beispielsweise Antibiotika, Aminosäuren und Bioethanol, werden bereits im großen Maßstab über solche biotechnischen Verfahren hergestellt. Auch in der Produktion von Bausteinen für Medikamente und für Kunststoffe gewinnen biotechnische Prozesse immer mehr an Bedeutung.

### Enzyme sparen Energie

Dabei setzt die Chemie- und Pharmaindustrie nicht immer ganze Zellen ein, sondern oft auch nur isolierte Enzyme. Enzyme sind natürliche Katalysatoren, die es in großer Zahl gibt, denn fast jede Stoffwechselreaktion wird von einem zugehörigen, spezifischen Enzym gesteuert. Der Vorteil von Enzymen verglichen mit klassisch-chemischen Katalysatoren ist, dass Enzyme ihre katalytische Wirkung unter milden Bedingungen, in wässriger Umgebung und bei moderaten Temperaturen entfalten. Das spart organische Lösungsmittel und Energie. Diese Eigenschaften machen Enzyme für den industriellen Einsatz hochinteressant – und tatsächlich gibt es bereits viele technische Anwendungen von Biokatalysatoren in der Lebens- und Futtermittelindustrie, der Papier- und Textilindustrie, der Diagnostik und der

Chemieindustrie. So werden jährlich etwa 20 Millionen Tonnen Stärke mit Hilfe verschiedener Enzyme in Flüssigzucker umgewandelt und mehrere Millionen Tonnen Papier enzymatisch gebleicht.

### Zucker aus Holz

Das Marktvolumen für Enzyme hat sich in den vergangenen zehn Jahren nahezu verdoppelt und wird auf mehr als 1,5 Milliarden US-Dollar geschätzt. Einer der weltweiten Forschungsschwerpunkte liegt momentan auf der Suche nach Enzymen, die Holz – genauer: dessen Hauptbestandteile Cellulose und Hemicellulose – in mikrobiell verwertbare Zucker umwandeln, die der weißen Biotechnologie als Rohstoff dienen. Solche Holz abbauenden Enzyme sind zwar schon lange bekannt. In der Natur zersetzen sie abgestorbenes Pflanzenmaterial und sorgen dafür, dass es in den natürlichen Stoffkreislauf zurückkehrt. Bakterien und Pilzen, die diese Enzyme enthalten, werden in

Kompostieranlagen bereits eingesetzt. Allerdings ist es noch nicht gelungen, ihre Enzyme effizient und preiswert zu isolieren, um sie in biotechnischen Verfahren zu nutzen.

Neben der Suche nach Enzymen spielt auch die Pflanzenzüchtung eine immer wichtigere Rolle in der chemischen Industrie. Pflanzen sollen Rohstoffe liefern, die möglichst energiearm gewonnen und leicht von Mikroorganismen und Enzymen in die gewünschten Endprodukte umgewandelt werden können. Noch besser wäre es, wenn Pflanzen bereits eine bestimmte industrierelevante Substanz, beispielsweise einen Pharmawirkstoff, selbst produzieren. Dieser Stoff könnte dann direkt aus der Pflanze isoliert werden, bevor die Reste der Pflanze mit energiesparenden Verfahren aufgearbeitet werden. Aus den chemisch nicht nutzbaren Pflanzenteilen könnte man anschließend in einer Biogasanlage noch Energie gewinnen.



Biotechnik in der Chemieindustrie: Ein Biotechniker kontrolliert eine laufende Fermentation in einem 5000-Liter-Bioreaktor.

(Bild: BASF)

Die Züchtung solcher Pflanzen gelingt mit herkömmlichen Methoden nur schwer oder gar nicht, es müssten daher gentechnische Verfahren eingesetzt werden. Die in der Öffentlichkeit umstrittene grüne Gentechnik könnte also entscheidend dazu beitragen, dass die – politisch geförderte – weiße Biotechnologie breiteren Einsatz in der Chemieindustrie findet, denn auf herkömmlichem Weg gezüchtete Pflanzen werden schon in naher Zukunft den

stetig steigenden Bedarf an Rohstoffen sowie die immer höheren Ansprüche an die Produkte nicht mehr decken können. Eine effiziente Rohstoffversorgung und -nutzung wird nur gelingen, wenn grüne und weiße Biotechnologie eng verzahnt weiterentwickelt werden.

**Roland Ulber**

*Der Autor ist Professor für Bioverfahrenstechnik an der Technischen Universität Kaiserslautern.*



Mikroben auf einem Nährmedium: In diese Bakterien wurde ein neues Gen eingeschleust. Auf dem speziellen Nährmedium haben sich nur die Zellen vermehrt, bei denen der Gentransfer erfolgreich war. Einzelne Bakterienkolonien werden jetzt für weitere Experimente isoliert.

(Bild: BASF)

Bioraffinerien verbinden die stoffliche und energetische Umsetzung von nachwachsenden Rohstoffen. Sie sollen zukünftig Chemikalien und Biokraftstoffe produzieren. Und aus den Resten noch Biogas gewinnen.



Rohstoff Gras.  
(Bild: Petra Blauensteiner)

## Chemiefabrik und Kraftwerk nach dem Vorbild der Natur

Die Natur hat den Umgang mit Energie und Stoffen hoch optimiert. Bei der Photosynthese wird Wasser gespalten und der entstehende Wasserstoff an Kohlenstoff, der aus dem Kohlendioxid der Luft stammt, gebunden. Die so gebildeten energiereichen Kohlenstoffverbindungen sind der Energiespeicher, der Bioreaktionen antreibt. Am Ende der Energienutzung bilden sich wieder Kohlendioxid und Wasser, womit sich der Kreislauf der Photosynthese bezüglich Kohlenstoff, Sauerstoff und Wasser schließt.

Über die Photosynthese, also über die Energiegewinnung aus Sonnenlicht, produziert die Natur eine Vielfalt an nachwachsenden Rohstoffen, die

der Mensch sowohl stofflich als auch energetisch nutzen kann. Mehr als 90 Prozent der nachwachsenden Rohstoffe sind Kohlenhydrate. Vor allem Lignocellulose, welche die Zellwand holziger Pflanzen bildet, ist reichlich vorhanden.

### Schon zehn Prozent der Chemierohstoffe vom Acker

Zucker, Stärke, Cellulose, Öle und andere nachwachsende Rohstoffe haben eine lange Tradition in der stofflichen Nutzung und in der Energiegewinnung, wurden aber im Industriezeitalter von Kohle, Erdöl und Erdgas verdrängt. Besonders Holz diente bis zur industriellen Nutzung von Kohle als Rohstoff-

und Energiequelle. In Deutschland werden heute jährlich über zwölf Millionen Tonnen nachwachsende Rohstoffe, darunter auch Holz, zur Gewinnung von Energie und 1,4 Millionen Tonnen zur Produktion von Biokraftstoffen eingesetzt. Und nochmals zwei Millionen Tonnen biogene Ausgangsmaterialien wandelt die deutsche chemische Industrie in Kunststoffe, Tenside und andere biobasierte Produkte um. Das entspricht zehn Prozent ihres gesamten Rohstoffeinsatzes.

Die Ausgangssituation bei der Nutzung nachwachsender Rohstoffe ist in Deutschland und auch in Europa schon sehr gut. In Europa sollen bis zum Jahr 2020 ein Fünftel aller Kraft-

stoffe und mehr als ein Viertel der Energieträger für die Strom-, Wärme- und Kälteerzeugung aus regenerativen Quellen stammen. Für die Herstellung biobasierter Produkte wie Kunststoffe, Tenside oder Klebstoffe gibt es in Europa keine Vorgaben.

Anders in den USA: Dort hat man sich das nationale Ziel gesetzt, bis zum Jahre 2030 ein Viertel der chemischen Produkte, bezogen auf Basiswerte aus dem Jahr 1994, aus nachwachsenden Rohstoffen herzustellen, außerdem zehn Prozent der Kraftstoffe sowie fünf Prozent der Energieträger, die zum Heizen, Kühlen und für die Stromerzeugung gebraucht werden.

### Erste Bi Raffinerien in frühestens zehn Jahren

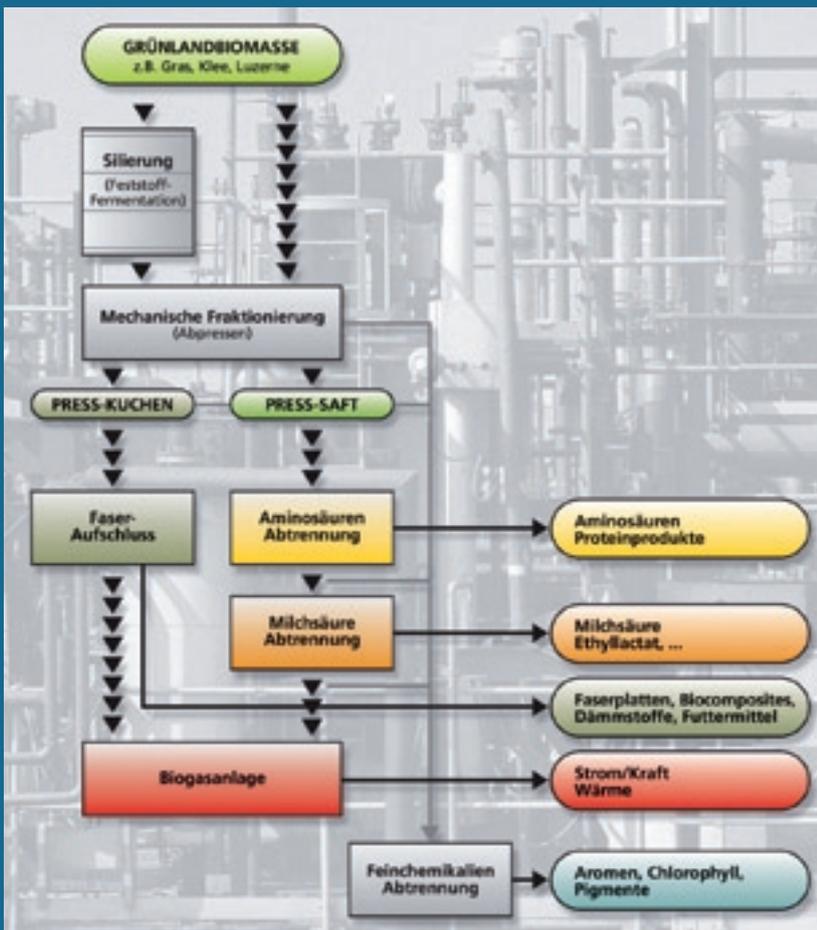
Gelingen soll die Umstellung auf eine biobasierte Wirtschaft vor allem durch die Entwicklung von so genannten Bi Raffinerien, die Biomasse sowohl stofflich als auch energetisch nutzen. Nach oder neben der Gewinnung von Kraftstoffen und Chemikalien soll eine Bi Raffinerie aus der Restbiomasse kohlendioxidneutral Energie gewinnen, indem die Bioabfälle verbrannt oder biotechnisch zu Biogas umgesetzt werden. Die Biovergasung im Fermenter bietet sich vor allem bei sehr feuchten Rückständen an, sowohl aus energetischer Sicht als auch

im Sinne des Klimaschutzes, denn diese Variante birgt das größte Potenzial zur Reduktion von Kohlendioxid. Die Erzeugung von Biogas lässt sich außerdem optimal mit neuen chemischen Verfahren verbinden, die genauso wie die Biovergasung in wässriger Phase und bei niedrigen Temperaturen ablaufen. Biogas kann zum Heizen oder Kühlen genutzt sowie zu Methanol als Kraftstoff oder Basischemikalie umgesetzt werden.

Konzepte für Bi Raffinerien werden weltweit diskutiert, allerdings existieren bisher nur singuläre Lösungen wie Zellstoff-, Stärke- und Ölfabriken oder Bioethanol-Anlagen. Die ersten größeren Bi Raffinerien wird es vermutlich erst in zehn bis zwanzig Jahren geben.

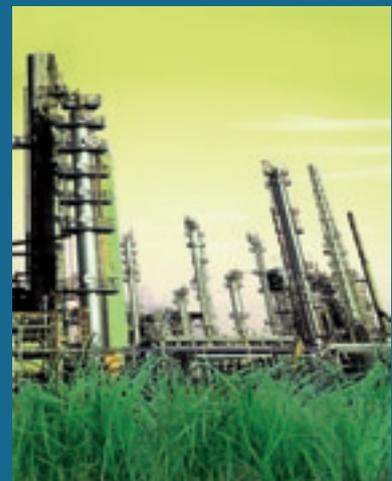
### Thomas Hirth, Walter Trösch und Steffen Rupp

Thomas Hirth leitet das Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik in Stuttgart, an dem auch Walter Trösch und Steffen Rupp forschen. Walter Trösch ist zuständig für Umweltbiotechnologie und Bioverfahrenstechnik. Steffen Rupp's Arbeitsgebiet ist die molekulare Biotechnologie.



Das Prinzip einer Bi Raffinerie: Der Rohstoff Biomasse wird in biotechnischen und chemischen Prozessen sowohl in Strom und Wärme als auch in Chemikalien, Kraftstoffe und andere Produkte umgewandelt.

(Bild: Projektfabrik Waldhör)



Zukunftsvision: So könnte eine Bi Raffinerie aussehen, die Biomasse in Energie und Chemikalien umwandelt.

(Bild: Projektfabrik Waldhör)

Wasserstoff gilt als Alternative zu fossilen Energieträgern. Doch Wasserstoff ist ein Energiespeicher, keine Energiequelle – und damit noch kein Garant für Umweltfreundlichkeit.



Künftig Wasserstoff tanken und sauber fahren: Welche Rolle Wasserstoff in der Energiewirtschaft der Zukunft spielt, hängt von seiner Erzeugung ab.

(Bild: Fotomontage, Markus Fischer/PSI)

## Noch viele offene Fragen

Wasserstoff wird schon lange genutzt, vor allem als wichtiger Grundstoff für Raffinerien und in der chemischen Industrie. Von den jährlich produzierten mehr als 50 Millionen Tonnen Wasserstoff fließen jeweils knapp die Hälfte in die Produktion von Dünger und die Veredelung von Rohöl. Vier Prozent kommen in den Handel und ein Prozent dient als Kraftstoff für Antriebe, etwa für die europäische Trägerrakete Ariane V oder das Space Shuttle. Zukünftig könnte Wasserstoff auch in der allgemeinen Versorgung mit Kraftstoffen und Energie eine wichtige Rolle übernehmen. In Brennstoffzellen beispielsweise könnte aus Wasserstoff Strom gewonnen werden. Der große Vorteil ist, dass dabei nur Wasserdampf als Abgas entsteht. Noch offen ist die Frage, wie Wasserstoff transpor-

tiert werden soll (siehe Beitrag auf Seite 31). Unter Druck, als tiefgekühlte Flüssigkeit oder gebunden in Chemikalien, beispielsweise als Methanol? An Vorschlägen mangelt es nicht, aber ihre Tauglichkeit ist noch zu überprüfen.

Außerdem ist Wasserstoff keine Energiequelle, sondern ein Energiespeicher. Er liefert daher maximal so viel Energie, wie vorher für seine Erzeugung aufgewendet wurde – und in der Realität nur einen Teil davon. Um Wasserstoff als Energieträger attraktiv zu machen, gilt es daher, diese Verluste und auch die Kosten so gering wie möglich zu halten, damit es einen wirtschaftlichen Anreiz gibt, von Kohlenstoff basierten Energieträgern auf Wasserstoff umzusteigen.

Es gibt eine Reihe von Möglichkeiten, Wasserstoff zu erzeugen. Die notwendige Energie dazu kann entweder aus Kernkraft stammen, aus direkter Sonnenstrahlung – über Solarthermie, Photovoltaik oder Windenergie – oder gespeicherter Sonnenenergie in Form von Wasserkraft, Biomasse oder fossilen Energieträgern.

Wie die Produktion von Wasserstoff bewertet werden sollte, wird hier kurz am Beispiel Biomasse gezeigt: Bei der Gewinnung von Wasserstoff aus Biomasse muss man zwei energetisch ungünstige Schritte in Kauf nehmen. Zum einen wandeln Pflanzen Kohlendioxid und Sonnenlicht mit sehr schlechten Wirkungsgraden in organisches Material um, zum anderen muss man nochmals Energie aufwenden, um aus die-

sem Pflanzenmaterial Wasserstoff zu gewinnen. Daher wären riesige Flächen für den Anbau von Energiepflanzen notwendig und das führt – wie die aktuelle Debatte um Biosprit zeigt – zu einer Konkurrenz zwischen der Produktion von Nahrung und Energieträgern.

Außerdem entsteht bei der Wasserstoffgewinnung aus Biomasse klimaschädliches Kohlendioxid, das nicht unmittelbar wieder in Biomasse umgewandelt wird. Das mag als Kritikpunkt seltsam erscheinen, gilt doch Biomasse als klimaneutraler Energieträger – doch für das Klima macht es keinen Unterschied, ob das emittierte Kohlendioxid vor Jahresfrist oder in erdgeschichtlich früheren Zeiten gebunden wurde. Entscheidend ist der Vergleich der Alternativen: Was verursacht die geringsten Gesamtemissionen? Hinzu kommt, dass auch Biomasse ein immer knapperes Gut wird.

## Wasserstoff aus Erdgas

Der heute produzierte Wasserstoff stammt fast ausschließlich aus fossilen Energieträgern wie Erdgas und Kohle. Nur fünf Prozent werden durch die

elektrochemische Spaltung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff, also durch Elektrolyse, gewonnen.

Der wichtigste Prozess für die Wasserstoffherzeugung ist heute die Dampfreformierung von Methan. Dabei wird Erdgas mit Wasserdampf bei Temperaturen von 750 bis 850 Grad Celsius unter Druck in Wasserstoff und Kohlenmonoxid umgewandelt. Die dafür notwendige Energie liefert die Verbrennung von Erdgas, wobei allerdings Kohlendioxid entsteht, dessen Ausstoß es zu vermindern gilt. Man könnte die Kohlendioxid-Emissionen der ausgezeichnet funktionierenden Dampfreformierung reduzieren und das Verfahren für den Einstieg in die Wasserstoffwirtschaft nutzen, wenn man die Wärme nicht über die Verbrennung fossiler Rohstoffe zuführen würde, sondern durch hoch gebündeltes Sonnenlicht – allerdings ist dies nur in den sonnenreichen Gebieten der Erde wirtschaftlich. Hochtemperaturspeicher sollen das Verfahren unabhängig von der aktuellen Sonnenstrahlung machen, denn die Sonne scheint selbst in Wüsten nicht immer, der chemische Prozess benötigt aber konstante Bedingungen.

Die Technologie wird seit den 1980er-Jahren entwickelt und steht wegen der günstigen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen kurz vor der industriellen Umsetzung. Die Kosten von konventioneller und solarer Dampfreformierung befinden sich schon heute auf gleichem Niveau.

Eine Alternative ist die Nutzung von Kernenergie. So entwickeln Frankreich, Japan und andere auf Atomkraft setzende Länder Reformer, die mit der Abwärme aus Hochtemperaturkernreaktoren betrieben werden sollen. Nur dieser Kernreakortyp erzeugt Temperaturen von über 850 Grad Celsius, die für die Wasserstoffproduktion notwendig sind. Aufgrund ihrer Bauart gelten Hochtemperaturkernreaktoren, die Helium als Kühlmittel und Graphit als Moderator nutzen, als sicherer und effizienter als herkömmliche Reaktoren. Die Idee ist nicht neu und wurde bereits in den 1980er-Jahren an dem Kugelhaufenreaktor im Forschungszentrum Jülich demonstriert. Noch aber gibt es keine kommerziellen Hochtemperaturkernreaktoren, die ersten sollen jetzt in Südafrika und China gebaut werden.



Im spanischen Almería testen Forscher vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt und vom spanischen Energieforschungszentrum Ciemat solarthermische Verfahren zur Erzeugung von Wasserstoff. Das linke Foto zeigt Spiegelapparate, die das Sonnenlicht unabhängig von der Position der Sonne am Himmel immer auf einen Punkt fixieren. Die so konzentrierte Sonnenenergie betreibt einen Reaktor, in dem Wasser in Sauerstoff und Wasserstoff zerlegt wird. Das rechte Foto zeigt Parabolspiegel zur Bündelung von Sonnenlicht.

(Bild: DLR)

## Langfristig aus Wasser und Sonne

Das eigentliche Ziel einer zukünftigen Wasserstoffwirtschaft lautet, den Kohlenstoff zu ersetzen und so klimaschädliche Emissionen zu vermeiden. Dabei darf die Erzeugung von Wasserstoff aber weder das Weltklima noch die Gesundheit der Bevölkerung potenziell gefährden. Deshalb basieren die langfristig angestrebten Verfahren zur Wasserstoffgewinnung auf Wasser als Rohstoff und auf der Sonne als Energiequelle. Der Haken: In Regionen mit hoher Sonneneinstrahlung ist Wasser meist knapp. Für die Erzeugung der heute benötigten 50 Millionen Tonnen Wasserstoff bräuchte man 450 Millionen Tonnen Wasser, in der Realität dürfte der Bedarf weit höher sein. In gemäßigten Breiten mit genügend Frischwasser kann erneuerbarer Strom genutzt werden, um den Wasserstoff durch Elektrolyse zu erzeugen; in sonnenreichen Gegenden bieten sich eher solarthermische Verfahren in Verbindung mit Meerwasserentsalzung an.

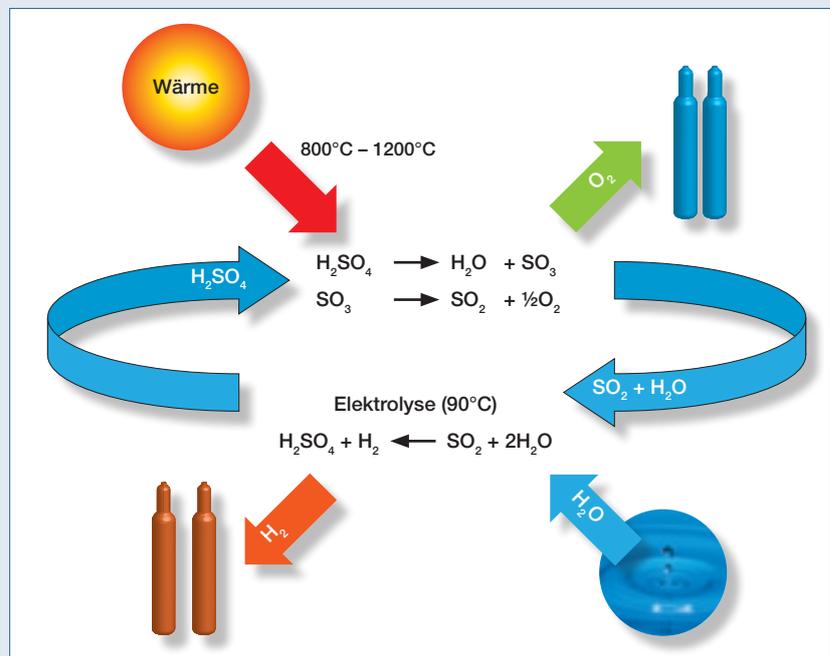
Bei der Entwicklung photochemischer Verfahren zur Wasserspaltung werden sowohl biochemische als auch katalytische Wege verfolgt. Geforscht wird hauptsächlich an Mikroorganismen und Algen, die Wasserstoff produzieren, sowie an Photokatalysatoren wie Titandioxid. Vielversprechend sind außerdem photoelektrochemische Verfahren, die allerdings zusätzlich zu den Katalysatoren Strom benötigen, und biomimetische Verfahren. Letztere wollen künstlich hergestellte Biokatalysatoren nutzen, die man beispielsweise von der Photosynthese kennt. Diese Verfahren stecken aber alle noch in den Kinderschuhen.

Die einzige verfügbare und ausgereifte Technik für die Wasserspaltung ist die Elektrolyse. Doch auch sie konnte sich bislang nicht durchsetzen, denn

## So funktioniert die Wasserspaltung durch Hitze

Die direkte thermische Wasserspaltung funktioniert erst oberhalb von 2500 Grad Celsius und ist daher technisch eigentlich nicht nutzbar: Der Wirkungsgrad ist gering, es gibt für den Anlagenbau keine geeigneten Materialien und außerdem ist die entstehende Mischung aus Sauerstoff und Wasserstoff, Knallgas genannt, explosiv. Ein entscheidender Trick umgeht diese Probleme, in dem er die Bildung von Wasserstoff und Sauerstoff räumlich oder zeitlich voneinander trennt und so die Entstehung von Knallgas verhindert. Seit den 1970er-Jahren werden Kreisprozesse untersucht, bei denen die Wasserspaltung in mehrere Schritte aufgeteilt ist. So bildet sich zum einen kein Knallgas

und zum anderen wird die Temperatur so weit gesenkt, dass sie technisch handhabbar ist. Die wichtigsten dieser Kreisprozesse sind zwei Verfahren, die nach den Firmen benannt wurden, die sie entwickelt haben: der General-Atomics-Prozess und der Westinghouse-Prozess. Der energierelevante Schritt ist bei beiden Prozessen die Spaltung von Schwefelsäure ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) an Katalysatoren bei Temperaturen über 800 Grad Celsius. Beide Kreisprozesse können eine thermische Effizienz von über 40 Prozent erreichen. Vor dem Bau größerer Anlagen muss aber noch das Problem der Korrosion gelöst werden, zu dem unter anderem die Schwefelsäure beiträgt.



Der Westinghouse-Prozess: Schwefelsäure ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) wird katalytisch gespalten in Wasser ( $\text{H}_2\text{O}$ ), Sauerstoff ( $\text{O}_2$ ) und Schwefeldioxid ( $\text{SO}_2$ ). Der Sauerstoff wird dem System entzogen. Wasser und Schwefeldioxid werden anschließend elektrolytisch zu Schwefelsäure und Wasserstoff umgesetzt. Wasserstoff wird entnommen, Schwefelsäure bleibt im Kreislauf.

die Dampfreformierung von Erdgas ist kostengünstiger und der Elektrolyse zudem energetisch überlegen. In Zeiten von Klimawandel und der Verteuerung fossiler Ressourcen könnte die Wasserspaltung durch elektrischen Strom aus erneuerbaren Quellen aber an Bedeutung gewinnen.

### Ausgereifte Wasserstoffwirtschaft im Jahr 2050?

Ob sich Wasserstoff als Energieträger je durchsetzen wird, hängt von den politischen, ökologischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen ab. Öl wird zwar immer teurer und knapp, die Klimaproblematik drängt und der Energiebedarf steigt. Doch bis die verschiedenen neuen Verfahren zur regenerativen Gewinnung von Wasserstoff technisch ausgereift sind, werden einige Jahrzehnte vergehen. Die EU hat das Ziel vorgegeben, die Wasserstoffwirtschaft bis zum Jahr 2050 vollständig umzusetzen – angesichts der vielen offenen Fragen und Kritikpunkte ein hochgestecktes, vermutlich sogar sehr hochgestecktes Ziel.

Wahrscheinlich wird Elektrolysewasserstoff in Regionen mit nutzbarer Erdwärme oder Wasserkraft, beispielsweise auf Island oder in Norwegen, für eine lokale Wasserstoffwirtschaft eingesetzt, aus der andere Regionen ihre Lehren ziehen können. Norwegen ist heute schon weltweit führend in der elektrolytischen Wasserspaltung mit Wasserkraft als Energiequelle und Island dient als Modellland für eine auf Geothermie basierte Wasserstoffwirtschaft.

Erdgas könnte eine Brückenfunktion übernehmen, bis Verfahren der regenerativen Erzeugung von Wasserstoff marktreif sind. Ernst zu nehmen: Kritiker bezweifeln allerdings, dass regenerativer Wasserstoff jemals zu einer Säule unseres Energiesystems

werden wird. Die Gewinnung, Lagerung und Verteilung von Wasserstoff benötigt zu viel Energie und verursacht zu hohe Kosten, geben sie zu bedenken. Ihr Postulat: Ein ineffizientes und zudem teures Energiesystem wird sich nicht durchsetzen. Diese Argumente sind nicht von der Hand zu weisen. Gelingt es nicht, die Tauglichkeit der Produktionsverfahren zu demonstrieren, effiziente Wasserstoffspeicher zu entwickeln und Brennstoffzellen technisch und wirtschaftlich für den Einsatz in Fahrzeugen bereitzustellen, wird es trotz der politischen Vorgaben keine Wasserstoffwirtschaft geben.

Den Kritikern stehen klare politische Vorgaben aus Brüssel und eine gut vernetzte Wasserstofflobby gegenüber. Der Deutsche Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband, der mit allen europäischen und außereuropäischen Wasserstoffinitiativen verlinkt ist, argumentiert unter anderem mit der historischen Entwicklung der Energiesysteme: Die Energieträger des Industriealters haben ihren Aggregatzustand von fester Kohle über flüssiges Erdöl zu gasförmigem Erdgas verändert. Gleichzeitig stieg das Atomverhältnis von Wasserstoff zu Kohlenstoff von etwa 0,5 in Kohle auf vier in Erdgas. Mit Wasserstoff als Energieträger würde sich dieser Trend fortsetzen, denn in einer reinen Wasserstoffwirtschaft wäre überhaupt kein Kohlenstoff mehr im Energieträger enthalten. Die Konsequenz wäre ein völlig kohlendioxidfreies Energiesystem. Zudem würde der Heizwert des zukünftigen Energieträgers noch einmal kräftig zulegen: Für Wasserstoff beträgt er 120 Megajoule pro Kilogramm – das ist fast dreimal so viel wie für Benzin.

Und welches Szenario ist am wahrscheinlichsten? Dass sich die Wasserstoffwirtschaft auf Grund der Rahmenbedingungen massiv ändern wird, steht außer Frage. Wasserstoff wird aller-

dings nicht den Stellenwert erlangen, den Erdöl heute hat. Es wird aber Teilbereiche geben, in denen Wasserstoff sinnvoll eingesetzt werden kann, wenn die technischen Voraussetzungen geschaffen sind. Die mangelnde Effizienz von Erzeugung und Logistik könnten Vorteile in der Anwendung teils aufwiegen. Dafür muss aber noch intensiv geforscht werden.

### Christian Sattler Hermann Pütter

*Christian Sattler ist Fachgebietsleiter für Solare Stoffumwandlung beim Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt sowie Vorstand für Wasserstoffproduktion und -speicherung von N.ERGHY, einer europäischen Forschungsvereinigung zur Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnik.*

*Hermann Pütter war bis zu seinem Ruhestand Anfang 2006 langjähriger Mitarbeiter des Chemieunternehmens BASF, zuletzt als wissenschaftlicher Direktor und Leiter der Forschungsgruppe Elektrochemische Prozesse. Seit 2007 ist er Energiekoordinator der Gesellschaft Deutscher Chemiker. Hermann Pütter hat auch die Beiträge auf Seite 17 und 60 verfasst.*

Katalysatoren sorgen dafür, dass chemische Reaktionen unter milden Bedingungen ablaufen und zu weniger unerwünschten Nebenprodukten führen. Das spart Energie, Lösungsmittel und Kosten. Auch in Brennstoffzellen spielen sie eine Schlüsselrolle.



Katalysatoren in der Chemieindustrie: Eine Chemielaborantin befüllt einen Versuchsreaktor mit einem Katalysator in Granulatform. Über 80 Prozent aller Chemieprodukte werden mit Hilfe von Katalysatoren hergestellt.

(Bild: BASF)

## Sparsame Reaktionsbeschleuniger

Beim Stichwort Katalysator denken die meisten zunächst an den Abgaskatalysator im Auto. Doch Katalysatoren vernichten nicht in erster Linie Schadstoffe, sondern helfen vor allem beim Energiesparen. Auch im Haushalt: Sie stecken beispielsweise in Waschmitteln und lassen Flecken schon bei 30 Grad Celsius verschwinden statt erst im Kochwaschgang. Und die Behauptung, dass es ohne Katalyse die meisten Gegenstände unseres täglichen Lebens gar nicht gäbe, ist nicht übertrieben: Denn über 80 Prozent aller Chemieprodukte – von Kunststoffen über Medikamente bis zur Körperlotion – durchlaufen während ihrer Herstellung einen katalytischen Prozess. Selbst Leben wäre ohne Katalyse undenkbar. In jeder lebenden Zelle sorgen Enzyme

als natürliche Katalysatoren dafür, dass Stoffwechselreaktionen schon bei milden Temperaturen und unter normalem Druck ablaufen.

### Katalysatoren ähneln Heiratsvermittlern

Katalysatoren sind keine einheitliche Verbindungsklasse. Ihre Palette reicht von Edelmetallen über einfache anorganische Moleküle bis zu Proteinen. Gemeinsam ist allen, dass sie chemische Reaktionen beschleunigen, sie in die richtige Richtung steuern oder die Umsetzung eines Stoffes A in ein Produkt B überhaupt erst möglich machen. Bei den meisten chemischen Umsetzungen muss auf dem Weg von Ausgangsstoff A zu Produkt B ein Berg

an Aktivierungsenergie überwunden werden. Je höher dieser Berg ist, umso mehr Energie muss man dem System zuführen, damit die Reaktion anläuft. Das ist der Grund, warum Chemiker ihre Reaktionskolben meist kräftig erhitzen, wenn sie eine Synthese durchführen.

Katalysatoren setzen diese Aktivierungsenergie herab. Wie ein Wanderer in den Alpen, der hohe Gipfel zu umgehen versucht, weisen sie den Ausgangsstoffen A einen leichteren, weniger steilen Weg zum Produkt B. Dabei sorgen sie wie ein Wegweiser außerdem dafür, dass weniger unerwünschte Nebenprodukte entstehen.

Katalysatoren verbrauchen sich bei einer chemischen Reaktion kaum und

stehen – wie Heiratsvermittler nach getaner Arbeit – für die nächste Umsetzung zur Verfügung. So kann ein Katalysatormolekül die Synthese von Millionen Produktmolekülen unterstützen. Das ist auch der Grund, warum ein Autokatalysator erst nach über 100 000 gefahrenen Kilometern ersetzt werden muss.

Der Prozess in einem Autokatalysator ist ein Beispiel für eine heterogene Katalyse, bei der der Katalysator in einem anderen Aggregatzustand vorliegt als die umzusetzenden Stoffe. Im Autokatalysator reagieren gasförmige Stickoxide und Kohlenmonoxid sowie andere unvollständig verbrannte Kohlenwasserstoffe an Platin, das auf einen Keramikeinsatz aufgebracht wurde, zu Kohlendioxid, Stickstoff und Wasser. Die heterogene Katalyse ist auch in der Chemieindustrie weit verbreitet, vor allem in der Kombination „fester Katalysator in flüssiger Reaktionslösung“. In unseren Körperzellen hingegen findet

eine homogene Katalyse statt, denn die Enzyme liegen ebenso wie die umzusetzenden Moleküle unseres Stoffwechsels gelöst in der Zellflüssigkeit vor.

## Schlüsselrolle in der Energieversorgung

Katalysatoren spielen auch in der Versorgung mit Energieträgern eine wichtige Rolle. Benzin etwa wird über einen katalytischen Prozess gewonnen. Beim Cracken von Rohöl werden Presslinge aus Aluminium-Silizium-Oxiden als Katalysatoren eingesetzt, die den Prozess bei Temperaturen von 350 bis 400 Grad Celsius unter Normaldruck ablaufen lassen – statt bei 500 bis 700 Grad Celsius und einem Druck von 20 bis 100 Bar.

Auch die Gewinnung alternativer Energieträger wird nur über Katalyse gelingen. Eine wichtige Rolle in der Energieversorgung der Zukunft könnte beispielsweise Wasserstoff spielen

(siehe Beiträge auf den Seiten 31 und 73), der energieeffizient durch die katalytische Spaltung von Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff erzeugt werden könnte – zum Beispiel mit Energie aus Sonnenlicht und Katalysatoren aus Titandioxid. Eine andere Variante der Wasserspaltung orientiert sich an der Photosynthese, bei der Wasserstoff aus Wasser gewonnen und dann mit dem Kohlendioxid der Luft weiter zu Zucker umgesetzt wird. Diese biochemische Wasserspaltung bewerkstelligt die Pflanzenzelle mit Hilfe von ausgefeilten Biokatalysatoren. Sie dienen als Vorbild für neue Katalysatoren in der technischen Wasserstofferzeugung.

Wasserstoff als Kraftstoff soll zukünftig Brennstoffzellen-Fahrzeuge antreiben. Das ist an sich kein Problem, denn die in einer Brennstoffzelle ablaufende Vereinigung von Wasserstoff mit Sauerstoff zu Wasser setzt enorm viel Energie frei. Doch das Problem der Speicherung des Wasserstoffs ist noch



Katalysatorforschung an der Technischen Universität Berlin (links) und in der Chemieindustrie (rechts): Neue Katalysatoren steigern die Energieeffizienz von chemischen Reaktionen.

(Bild: TU Berlin, Pressestelle, BASF)

nicht gelöst. In der Diskussion befinden sich neben speziellen Tanks für gasförmigen oder flüssigen Wasserstoff auch chemische Speicher, also Verbindungen, die viel Wasserstoff enthalten und ihn quasi beim Tritt aufs Gaspedal abgeben. Ein solcher Wasserstoffträger ist der Alkohol Methanol, den ein Brennstoffzellenfahrzeug von Daimler tankt. Wasserstoff entsteht hier erst an Bord des Fahrzeugs an einer wasserstoffdurchlässigen Membran mit einer Palladium-Silber-Legierung als Katalysator.

### Nachwachsende Katalysatoren in der Chemieindustrie

Auch in der Chemieindustrie spielen Katalysatoren eine Schlüsselrolle auf dem Weg zu energiesparenden Prozessen. Die Energiekosten haben einen erheblichen Anteil an den Betriebskosten der Chemieindustrie – in der Herstellung von Grundchemikalien können sie bis zu 40 Prozent ausmachen. Doch nicht nur deswegen interessieren sich Chemiker für Katalysatoren. Es ist vielmehr die faszinierende Fähigkeit vieler Katalysatoren, eine Reaktion in eine bestimmte Richtung zu lenken, gezielt zum Endprodukt zu führen und Nebenprodukte zu vermeiden.

Viele chemische Verbindungen liegen in zwei spiegelbildlichen Strukturen vor, die sich wie rechte und linke Hand zueinander verhalten und deutlich verschiedene Eigenschaften besitzen. Während beispielsweise die Substanz Limonen in der einen Form nach Zitrone riecht, verströmt ihr Spiegelbild Orangenduft. Und dieser Unterschied ist noch gering verglichen mit den Eigenschaften einiger pharmazeutischer Wirkstoffe, bei denen die eine Form hochwirksam, die andere gesundheitsschädlich ist. Katalysatoren, die dafür sorgen, dass nur die gewünschte Molekülsorte entsteht, sparen Lösungsmittel und Energie, da sie die aufwendige Trennung der spiegelbildlichen

Formen erübrigen. Zu den besten dieser so genannten stereoselektiven Katalysatoren zählen natürliche Enzyme, die von der Natur in Jahrtausenden Evolution optimiert wurden.

Auch für komplexe Biomoleküle – wie Vitamine, Arzneiwirkstoffe und Aromen – hat die Natur dank ausgefeilter Enzyme oft einen besseren Syntheseweg parat als die klassische Chemie. Ein Paradebeispiel dafür ist Vitamin B<sub>2</sub>, das großtechnisch früher über eine mehrstufige chemische Synthese hergestellt wurde – heute nutzt die Industrie dafür Mikroorganismen, die das Vitamin in einem Schritt produzieren. Das Chemieunternehmen BASF beispielsweise setzt dafür den Pilz *Ashbya gossypii* ein. Das biotechnische Verfahren erzeugt rund 30 Prozent weniger Kohlendioxid und spart 40 Prozent der Kosten verglichen mit dem klassisch-chemischen Prozess.

### Keine Magie mehr

Die Beispiele zeigen, dass Katalysatoren sowohl bei der Bereitstellung von Energieträgern als auch in der Entwicklung von energieeffizienteren industriellen Prozessen unverzichtbar sind. Die große Bedeutung der Katalyse für die Gesellschaft belegt auch die Verleihung des Nobelpreises für Chemie 2007 an den Berliner Katalyseforscher Gerhard Ertl, der wesentlich zum Verständnis von katalytischen Vorgängen an Oberflächen beigetragen hat. Ihm ist es gelungen, die Katalyse vom Ruf der Magie zu befreien und in eine exakte Wissenschaft zu überführen.

Um neue Katalysatoren zu entwickeln und bestehende zu optimieren, müssen Chemiker die katalytischen Prozesse im Detail verstehen. Mit spektroskopischen, elektronenmikroskopischen und anderen modernen Untersuchungsmethoden studieren sie daher die Katalyse auf molekularer

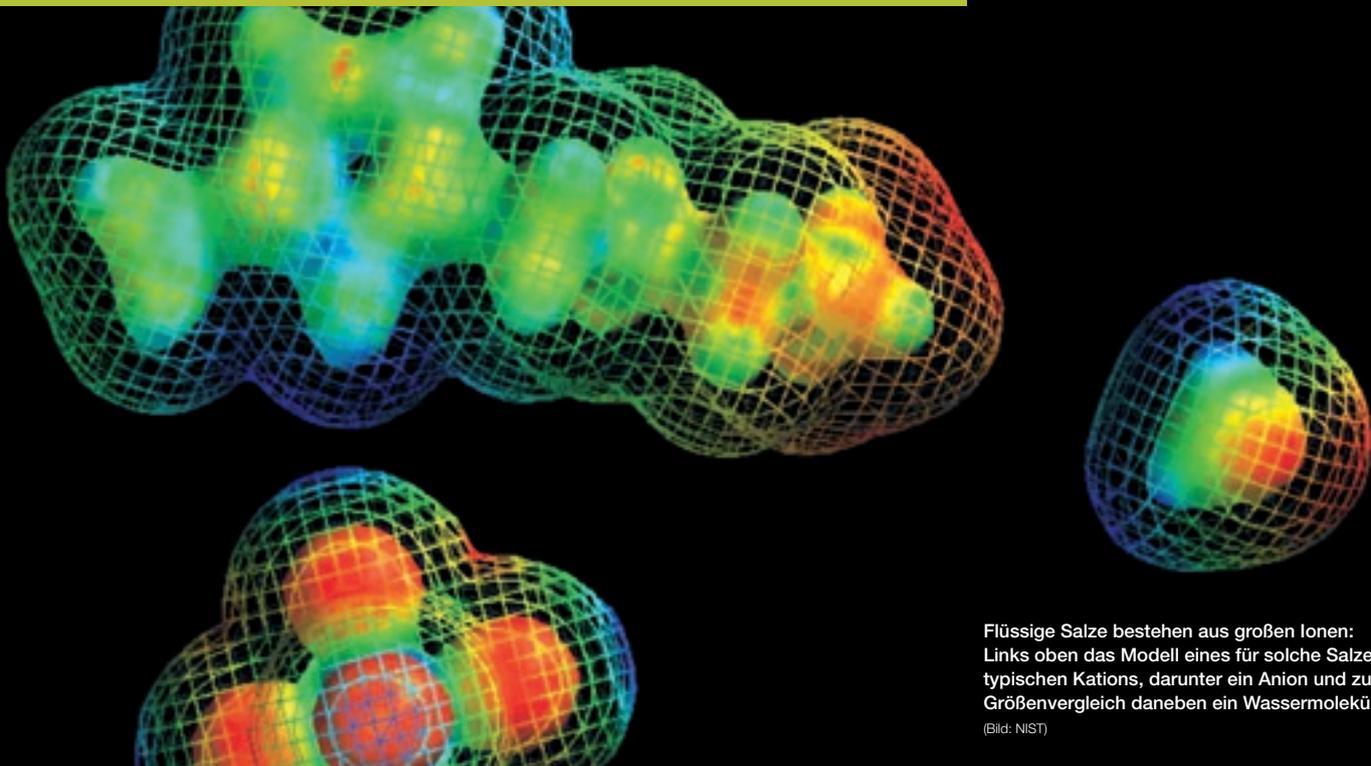
Ebene. Sie beobachten, wie sich Ausgangsmoleküle an den Katalysator anlagern, wie sich chemische Bindungen spalten, neue bilden und die Produkte den Katalysator wieder verlassen. Das ist kein leichtes Unterfangen, denn viele Katalysatoren sind poröse Materialien und die katalytischen Zentren verbergen sich in den Poren im Innern des Festkörpers. Die chemische Reaktion läuft dann quasi im Versteck ab, in das selbst hochauflösende Analysemethoden nicht einfach blicken können.

Gerhard Ertl hat für seine Studien Einkristalle, also äußerst geordnete und gut charakterisierte Systeme als einfache Modelle für Katalysatoren gewählt. Im Vakuum und bei tiefen Temperaturen, bei denen sich die Teilchen relativ langsam bewegen, konnte er sich so Einblick in die Oberflächenchemie verschaffen und grundlegende Phänomene der Katalyse erklären. Die Vorgänge an realen Katalysatoren sind aber viel komplexer und oft noch gar nicht entschlüsselt. Außerdem sind nicht nur die Vorgänge an der Oberfläche entscheidend, sondern auch der Transport der Ausgangsstoffe zum Katalysator hin und der Produkte von ihm weg. Die Verleihung des Nobelpreises markiert einen Meilenstein, abgehakt ist das Kapitel Katalyseforschung aber noch lange nicht.

### Hans-Joachim Freund

*Der Autor ist Direktor am Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft in Berlin, wo er die Abteilung Chemische Physik leitet.*

Salze, die schon bei Raumtemperatur schmelzen, sind chemische Alleskönner. Sie eignen sich als Lösungsmittel, Schmierstoff oder Wärmespeicher. In der modernen Energietechnik sind sie gefragt als Elektrolyt in Batterien, Kondensatoren und Brennstoffzellen.



Flüssige Salze bestehen aus großen Ionen: Links oben das Modell eines für solche Salze typischen Kations, darunter ein Anion und zum Größenvergleich daneben ein Wassermolekül. (Bild: NIST)

## Salzig, sicher und unglaublich vielfältig

Ionische Flüssigkeiten – oder anders ausgedrückt: bei Raumtemperatur flüssige Salze – bilden eine neue Substanzklasse mit faszinierenden Eigenschaften, die zwei Welten, die der Salze mit jener der Lösungsmittel, verbindet. Doch warum sind diese Salze eigentlich flüssig?

Salze bestehen aus positiv und negativ geladenen Ionen. Kochsalz, chemisch: Natriumchlorid, beispielsweise enthält positiv geladene Natrium-Ionen und negativ geladene Chlorid-Ionen. Diese entgegengesetzt geladenen Ionen ziehen sich an und bilden bei Raumtemperatur ein Gitter, also einen Kristall. Erst bei hohen Temperaturen – im Fall von Kochsalz über 800 Grad Celsius – zerbricht das Gitter, der Kris-

tall zerfällt und die Substanz schmilzt. Diese Schmelze besteht nur aus Ionen, ist also eine ionische Flüssigkeit.

Als ionische Flüssigkeiten im engeren Sinne bezeichnet man heute aber nur Salze, die bei sehr viel niedrigeren Temperaturen schmelzen als Kochsalz, oft weit unter Raumtemperatur. Die Anziehungskräfte zwischen den positiv und negativ geladenen Ionen sind hier so gering, dass das Kristallgitter bereits bei niedrigen Temperaturen zerfällt.

Ionische Flüssigkeiten gibt es in unglaublich vielen Varianten – einige Experten sprechen von  $10^{18}$  Möglichkeiten – mit extrem variablen Eigenschaften. Die flüssigen Salze sind hitzebeständig, nicht entflammbar und

verdampfen nicht. Sie eignen sich daher für verschiedenste Anwendungen. In der Verfahrenstechnik, der organischen Synthese und analytischen Chemie werden sie bereits eingesetzt, beispielsweise als Lösungsmittel. Außerdem dienen sie als Schmierstoff oder Hydraulikflüssigkeit, als Kühlmittel oder Wärmespeicher. Weil sie Strom leiten, sind sie gefragt als Elektrolyt in der modernen Energietechnik, etwa bei der Konstruktion von Sensoren, Batterien, Kondensatoren, Brennstoffzellen und organischen Solarzellen.

### Neue Energiespeicher für Hybridautos

Auch in Hybridautos könnten die flüssigen Salze zukünftig eine Rolle

spielen. Hybridantriebe, die Verbrennungs- und Elektromotor kombinieren, gibt es bereits. Marktforschungsinstitute erwarten, dass der Markt für Hybridfahrzeuge in den nächsten Jahren stark wachsen wird. Voraussetzung dafür sind moderne Energiespeicher in Form von Batterien, eventuell kombiniert mit Doppelschichtkondensatoren, die mehr Energie speichern als herkömmliche Kondensatoren und daher auch Superkondensatoren genannt werden. Während eine Batterie viel Energie langsam aufnimmt, speichert ein Superkondensator weniger Energie in sehr viel kürzerer Zeit. Das kommt beispielsweise der Energiegewinnung in Elektroautos entgegen, wenn etwa Bremsenergie in elektrische Energie umgewandelt wird. Denn das geschieht nur für wenige Sekunden mit meist hoher Leistung. Bei Batterien müssen dann Speicherverluste in Kauf genommen werden. Doppelschichtkondensatoren können Batterien in Elektroautos daher gut ergänzen.

Noch werden in allen kommerziellen Hybridfahrzeugen ausschließlich Nickelmetallhydrid-Batterien eingesetzt, doch die nächste Generation von Hybridfahrzeugen wird mit den leistungsstärkeren und leichteren Lithium-Ionen-Batterien ausgestattet werden, die bereits in Mobiltelefonen als Energiespeicher dienen. Allerdings sind noch erhebliche Hürden zu nehmen, nicht nur bezüglich der Kosten des Energiespeichers, sondern besonders im Hinblick auf Lebensdauer und Sicherheit. Die neuen Lithium-Ionen-Batterien sollen immerhin pro Kilogramm bis 1500 Watt elektrische Leistung liefern. Zum Vergleich: Eine herkömmliche Nickelmetallhydrid-Batterie liefert pro Kilogramm etwa 200 Watt.

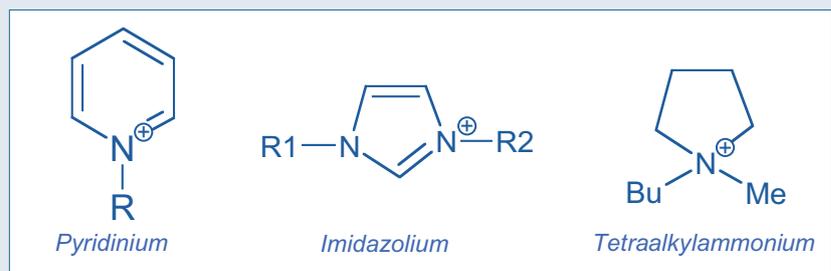
In den momentan auf dem Markt erhältlichen Lithium-Ionen-Batterien werden als Ionen leitende Flüssigkeiten organische Elektrolyte eingesetzt,

## Darum schmelzen bestimmte Salze schon in der Kälte

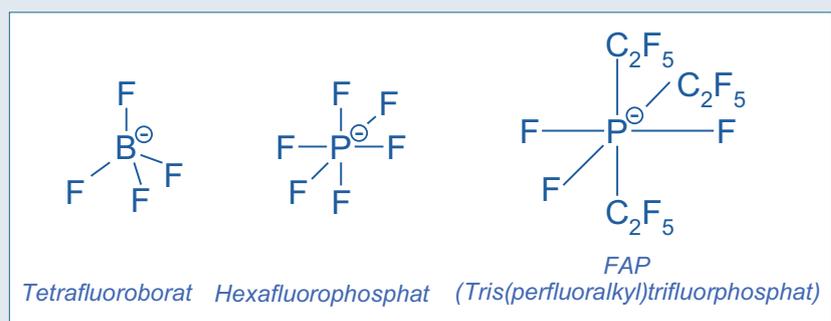
Ionische Flüssigkeiten sind Salze, deren Kristallgitter schon bei niedrigen Temperaturen zerfallen. Das Besondere dieser in der Kälte schmelzenden Salze ist, dass sich die Ladung der einzelnen Ionen auf ein relativ großes Ionenvolumen verteilt. Statt der Punktladung eines klassischen Ions liegt hier eine Ladungswolke vor. Die Anziehungskräfte zwischen den Ionen verringern sich dadurch und die Kristallgitter sind nicht so stabil. Chemisch erreicht man diese „Ladungsvermischung“, in dem man Elektronen ziehende Gruppen in die Struktur von negativ geladenen Ionen (Anionen) einbringt beziehungsweise Elektronen schiebende in die Struktur von positiv geladenen Ionen (Kationen). Als Kationen werden in ionischen Flüssigkeiten keine kleinen anorganischen Ionen (wie das Natrium-Ion im Kochsalz) eingesetzt, sondern deutlich größere organische Molekülkat-

ionen wie Tetraalkylammonium oder Pyridinium. Oft tragen diese großen Kationen zusätzlich stark Elektronen schiebende, lange Alkylketten, die die positive Ladung lokal weiter verringern.

Auch die Anionen von ionischen Flüssigkeiten sind weitaus komplexer als das einfache Chlorid-Ion im Kochsalz: Neben den bereits seit langem bekannten Tetrafluorborat ( $\text{BF}_4^-$ ) und Hexafluorophosphat ( $\text{PF}_6^-$ ) werden mehr und mehr kompliziertere Strukturen verwendet, vor allem Anionen von Supersäuren wie der Trifluoressigsäure oder der Trifluorsulfonsäure. Erst kürzlich entwickelt wurden die so genannten FAP-Anionen (Tris(perfluoralkyl)trifluorophosphate). Diese Anionen sind dank der stark Elektronen ziehenden Fluor- und Fluoralkylgruppen ideale Bausteine für neue ionische Flüssigkeiten.



Typische Kationen von ionischen Flüssigkeiten.



Typische Anionen von ionischen Flüssigkeiten.

die relativ leicht entzündlich und damit potenziell gefährlich sind. Ionische Flüssigkeiten könnten hier, da sie nicht brennbar sind, für mehr Sicherheit sorgen, in dem man sie als Elektrolyt einsetzt oder bekannten Elektrolyten beimischt.

### Dickflüssig wie Olivenöl

In Doppelschichtkondensatoren werden die flüssigen Salze als Elektrolyt oder als Komponente des Elektrolyten bereits eingesetzt, besonders in Asien.

Ihre Verwendung in Lithium-Ionen-Batterien hingegen steckt noch in den Kinderschuhen. Das liegt unter anderem daran, dass die heute verfügbaren ionischen Flüssigkeiten relativ zäh sind. Einige sind so viskos wie Kaffeesahne, die meisten dickflüssig wie Olivenöl, ein paar sogar zähflüssig wie Honig. In hochviskosen Elektrolyten aber ist das Lithium-Ion weniger beweglich. Das verlängert die Ladezeit der Batterie deutlich. Außerdem vertragen sich viele ionische Flüssigkeiten nicht mit den heute verwendeten Elektrodenma-

terialien. Doch mit neu entwickelten ionischen Flüssigkeiten, die beispielsweise das so genannte FAP-Anion (siehe Kasten) enthalten, und mit speziellen Mischungen aus flüssigen Salzen und organischen Lösungsmitteln lassen sich diese Hürden bewältigen.

### Michael Schmidt

*Der Autor ist Senior Manager und Projektleiter Mobile Energiespeicher beim Pharma- und Chemiekonzern Merck in Darmstadt.*

## ALLGEMEINE LITERATUR ZUM THEMA ENERGIE UND CHEMIE

- Sichere Energie im 21. Jahrhundert, J. Petermann (Hrsg.), Hoffmann und Campe (2006), ISBN 978-3-455-09554-8
- Leitstudie 2007 – Aktualisierung und Neubewertung der „Ausbaustrategie Erneuerbare Energien“ bis zu den Jahren 2020 und 2030 sowie Ausblick bis 2050. Dr. Joachim Nitsch, Stuttgart, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.) Februar 2007;  
[www.erneuerbare-energien.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/leitstudie2007\\_zusf.pdf](http://www.erneuerbare-energien.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/leitstudie2007_zusf.pdf)
- Kosten und Potenziale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Deutschland, McKinsey & Company (Hrsg.);  
[ww2.bdi.eu/initiativen/klimaschutz/initiative/Seiten/Klimastudie.aspx](http://ww2.bdi.eu/initiativen/klimaschutz/initiative/Seiten/Klimastudie.aspx)
- World Energy Outlook 2007, International Energy Agency; [www.worldenergyoutlook.org](http://www.worldenergyoutlook.org)
- Energieversorgung der Zukunft – der Beitrag der Chemie, (2007); [www.dechema.de/positionspapier\\_energie.html](http://www.dechema.de/positionspapier_energie.html)
- Nachrichten aus der GDCh-Energieinitiative – „Potenziale der Chemie für mehr Energieeffizienz“, April 2007;  
[www.gdch.de/oearbeit.htm](http://www.gdch.de/oearbeit.htm)
- HighChem hautnah – Aktuelles aus der Elektrochemie und zum Thema Energie, GDCh 2007, ISBN 3-936028-44-3

## ENERGIEVERBRAUCH IM ALLTAG

- Textile Verbundweisen und Fertigungstechnologien für Leichtbaustrukturen des Maschinen- und Fahrzeugbaus, Werner Hufenbach, Klaus Köhler (Hrsg.), Technische Universität Dresden, ISBN 978-3-00-022109-5
- Organic Light Emitting Devices; Edited by K. Müllen and U. Scherf; Wiley-VCH, Weinheim 2006, ISBN 3527312188
- Serie des Forums für Verantwortung, Fischer Taschenbuchverlag, Bände:  
Nutzen wir die Erde richtig?, F. Schmidt-Bleek, ISBN 978-3-596-17275-7  
„Was verträgt unsere Erde noch?“, J. Jäger, ISBN 978-3-596-17270-2

## METHODEN ZUR ENERGIEVERSORGUNG

- Conjugated Polymer-Based Organic Solar Cells, Serap Guenes, Chemical Reviews (2007), 107(4), 1324-1338
- Organic solar cells. Long-term from niche to market, Heinz Eickenbusch, CLB Chemie in Labor und Biotechnik (2007), 58(1), 27-29,31
- Organic photovoltaic cells: strategies for increasing solar energy conversion efficiencies, Stephen R. Forrest, PMSE Preprints (2006), 95, 160
- Material challenge for flexible organic devices, Jay Lewis, Materials Today (2006), 9(4), 38-45
- Solar photovoltaics R&D at the tipping point: A 2005 technology overview, Lawrence L. Kazmerski, Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena (2006), 150(2-3), 105-135
- Semiconducting Polymers for Thin-Film Electronics, Michael Chabiny, Polymer Reviews (2006), 46(1), 1-5
- Organic-based photovoltaics: toward low-cost power generation, Sean E. Shaheen, MRS Bulletin (2005), 30(1), 10-19
- Organic solar cells: An overview, Harald Hoppe, Journal of Materials Research (2004), 19(7), 1924-1945
- „Strom von der Sonne“, M. C. Lux-Steiner und G. Willeke, Physikalische Blätter 57, S. 47 (2001)
- Photovoltaik: Solarstrahlung und Halbleitereigenschaften, Solarzellenkonzepte und Aufgaben, H.-G. Wagemann, H. Eschrich, (Hrsg.), Teubner 2007, ISBN 978-3-8351-0168-5
- Aspects of Thin-Film Superlattice Thermoelectric Materials, Devices, and Applications, H. Böttner, G. Chen, R. Venkatasubramanian (Hrsg.), MRS Bulletin, Vol. 31 March 2006, pp 211-217
- Thermoelektrische Multitalente, Jana Sommerlatte, Kornelius Nielsch, Harald Böttner, Physik Journal Heft 5, 2007, S. 35
- Thermoelektrika - Energiewandler mit großem Zukunftspotential, Sabine Schlecht, Harald Böttner, Nachrichten aus der Chemie, Februar 2008, S. 136
- „Erneuerbare Energie in Zahlen“, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.), Juni 2008,  
[www.bmu.de/erneuerbare\\_energien/downloads/doc/2720.php](http://www.bmu.de/erneuerbare_energien/downloads/doc/2720.php)
- „Resource savings and CO<sub>2</sub> reduction potentials in waste management in Europe and the possible contribution to the CO<sub>2</sub> reduction target in 2020“, Prognos AG, Berlin, May 2008, [www.prognos.com](http://www.prognos.com)
- „Beispielhafte Darstellung einer vollständigen, hochwertigen Verwertung in einer MVA unter besonderer Berücksichtigung der Klimarelevanz“, ifeu Institut für Energie- und Umweltforschung, Umweltbundesamt Texte 16/08, Oktober 2007,  
[www.umweltbundesamt.de/uba-info-medien/mysql\\_medien.php?anfrage=Kennnummer&Suchwort=3445](http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-medien/mysql_medien.php?anfrage=Kennnummer&Suchwort=3445)

„Energie aus Abfall“, K. J. Thomé-Kozmiensky, M. Beckmann (Hrsg.), TK Verlag, Band 4 Januar 2008, ISBN 978-3-935317-32-0

Brennstoffzellen im Unterricht: Grundlagen, Experimente, Arbeitsblätter; Stefan Höller, Uwe Küter und Cornelia Voigt (Hrsg.), Hydrogeit-Verlag, 2007, ISBN-10: 3937863095

Der Wasserstoff-Boom: Wunsch und Wirklichkeit beim Wettlauf um den Klimaschutz; Joseph J. Romm (Hrsg.), Wiley-VCH, 2006, ISBN 3527315705

Wasserstoff für alle: Wie wir der Öl-, Klima- und Kostenfalle entkommen; Karl-Heinz Tetzlaff (Hrsg.), Books on Demand GmbH, 2008, ISBN 978-3-8370-6116-1

## NACHWACHSENDE ROHSTOFFE

Herausforderung Zukunft, M. F. Jischa (Hrsg.), Elsevier, 2. Aufl., 2005 und Chem. Ing. Techn. 79, 2007, 29-41

Rohstoffwandel, H. Vogel, Chem. Ing. Techn. 79, 2007, 515f.

Die Rolle der Chemokatalyse bei der Etablierung der Technologieplattform Nachwachsende Rohstoffe, P. Claus, H. Vogel, Chem. Ing. Techn. 78, 2006, 991ff.

Technologien zur Herstellung von Designerkraftstoffen, H. Vogel, TU Darmstadt, thema forschung 3, 2007, 32f.

Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren, M. Kaltschmitt, H. Hartmann (Hrsg.), Springer Verlag, Heidelberg 2001, ISBN 3-540-64853-4

Ökobilanz von Energieprodukten, Ökologische Bewertung von Biotreibstoffen, EMPA (Schweiz), May 2007

Biogas Praxis, Eder, B., Schulz, H. (Hrsg.), ökobuch-Verlag, Staufen, 2006, ISBN-10: 3936896135

Handreichung Biogasgewinnung und -nutzung, FNR (Hrsg.), Gülzow, 2005, ISBN 978-3-00-014333-5

Biogasanlagen, Görisch, U., Helm, M. (Hrsg.), Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart, 2007, 3-8001-5573-7

Biogas from Waste and Renewable Resources, D. Deublein, A. Steinhauser (Hrsg.), Wiley-VCH, Weinheim, 2008, ISBN-10: 3-527-31841-0

Nutzung nachwachsender Rohstoffe in der industriellen Stoffproduktion; R. Busch, T. Hirth, A. Liese, S. Nordhoff, J. Puls, O. Pulz, D. Sell, C. Sylдатk, R. Ulber; Chem. Ing. Tech. 3 (2006) 219-228

The Utilization of Renewable Resources in Industrial Production; R. Busch, T. Hirth, A. Liese, S. Nordhoff, J. Puls, O. Pulz, D. Sell, C. Sylдатk, R. Ulber; Biotechnology Journal 1 (2006) 770 – 776

Weißer Biotechnologie – Energielösungen für die Zukunft?; D. Sell, J. Puls, R. Ulber; Chem. In unserer Zeit, 41 (2007) 108 – 116

Use of renewable raw materials for the chemical industry – beyond sugar and starch; K. Muffler, R. Ulber, Chem. Eng. Tech 31 (638-646) 2008

Wie aus Bio Chemie wird, R. Busch, B. Kamm, M. Kamm, Th. Hirth, J. Thoen; Nachrichten aus der Chemie 53, 130 (2005)

Über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR) kann eine Vielzahl von Schriftenreihen und Informationsmaterial bestellt werden ([www.fnr.de](http://www.fnr.de))

## WASSERSTOFF – EIN ENERGIETRÄGER DER ZUKUNFT?

Der Wasserstoffboom, Wunsch und Wirklichkeit beim Wettlauf um den Klimaschutz, J. J. Romm, (Hrsg.), Wiley-VCH, Weinheim 2006, ISBN 978-527-31570-3

Deutscher Wasserstoff und Brennstoffzellenverband: Wasserstoff, der neue Energieträger, Hydrogelt Verlag Kremmen, 2007, ISBN 978-3-937863-08-5 (download unter: [www.dww-info.de](http://www.dww-info.de))

Hydrogen as a future energy carrier, Andreas Züttel (Hrsg.), Wiley-VCH; Auflage: 1 (23. Januar 2008), ISBN-13 978-3527308170

Hydrogen Technology: Mobile and Portable Applications, Aline Léon (Hrsg.), Springer-Verlag GmbH; Auflage: 1 (Juli 2008), ISBN-13: 978-3540790273

Gasspeicherung in nanoporösen Materialien, R. E. Morris und P. S. Wheatley, Angewandte Chemie, 2008, 120, 5044-5059

Untersuchungen der Desorption von Wasserstoff in metall-organischen Gerüsten, B. Panella et al, Angewandte Chemie, 2008, 120, 2169-2173

## NEUE TECHNOLOGIEN FÜR MEHR ENERGIEEFFIZIENZ

Application of Ionic Liquids in the Chemical Industry, N. V. Plechkova, R. Seddon, Chem. Soc.Rev, 2008, 37, 123-150

What are Batteries, Supercapacitors and Fuel Cells?, M. Winter, R. Brodd, Chem. Rev. 2004, 104, 4245-4269

Nonaqueous Liquid Electrolytes for Lithium-Based Rechargeable Batteries, Kang Xu, Chem. Rev. 2004, 104, 4303-4417

Rahmenkonzept „Forschung für die Produktion von Morgen“; Bundesministerium für Bildung (Hrsg.); die kommende Zeit. [www.bmbf.de/pub/ffdpvm.pdf](http://www.bmbf.de/pub/ffdpvm.pdf);

Katalyse spielt eine Schlüsseltechnologie für nachhaltiges Wirtschaftswachstum – Roadmap der deutschen Katalysatorforschung, DECHEMA (Hrsg.), Februar 2006, [www.connecat.de](http://www.connecat.de)

**Herausgeber:**

Deutsche Bunsen-Gesellschaft für Physikalische Chemie

Dr. Andreas Förster  
Deutsche Bunsen-Gesellschaft  
für Physikalische Chemie  
Theodor-Heuss-Allee 25  
60486 Frankfurt/Main  
E-Mail: foerster@bunsen.de  
Homepage: www.bunsen.de

Prof. Dr. Katharina Kohse-Höinghaus  
Universität Bielefeld  
Fakultät für Chemie  
Physikalische Chemie I  
Universitätsstr. 25  
33615 Bielefeld  
E-Mail: kkh@pc1.uni-bielefeld.de

Diese Veröffentlichung wurde mit Mitteln der Deutschen Bunsen-Gesellschaft für Physikalische Chemie (DBG), der Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh), der DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie und des Fonds der Chemischen Industrie (FCI) gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Das vorliegende Werk wurde sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autoren, Herausgeber und Verlag für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler keine Haftung.

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet unter <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

© 2008 Deutsche Bunsen-Gesellschaft für Physikalische Chemie e.V., Frankfurt am Main

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieser Informationsschrift darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Photokopie, Mikroverfilmung oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden. Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie nicht eigens als solche markiert sind.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Herstellung:  
Printed in Germany

ISBN 978-3-9809691-2-3



**Herausgeber:**

Deutsche Bunsen-Gesellschaft  
für Physikalische Chemie  
Theodor-Heuss-Allee 25  
60486 Frankfurt am Main

unter Mitwirkung der Gesellschaft Deutscher Chemiker,  
der DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie  
und des Verbands der Chemischen Industrie