

forschung

SPEZIAL
ENERGIE

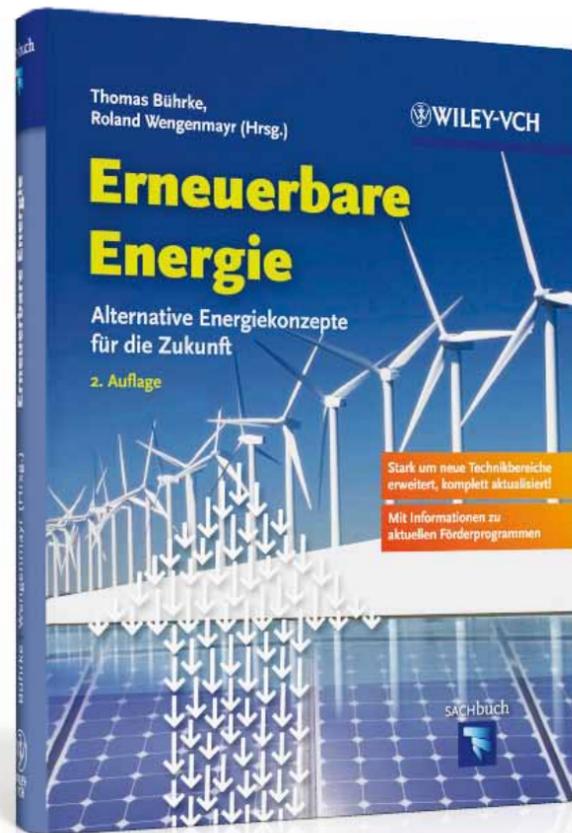
Das Magazin der Deutschen Forschungsgemeinschaft

Juni 2010



Energiewende: Herausforderung für die Menschheit | Klimawandel: Missachtete Gewissheit | Werkstoffe: Feuerfest und schadstoffarm | Elektroautos: Mit dem Akku auf die Überholspur | Fotovoltaik: Sonnige Aussichten | Energiespeicher: Die Gasometer von morgen | Stoffwechsel: Der selbstsüchtige Energiefresser im Kopf

Der BESTSELLER – jetzt in der 2. Auflage



THOMAS BÜHRKE und
ROLAND WENGENMAYR (Hrsg.)

Erneuerbare Energie

Alternative Energiekonzepte
für die Zukunft
2., aktualisierte und erg. Aufl.

ISBN 9783-527-40973-0
November 2009 ca. 144 S.
Gebunden
€ 34,00

Englische Ausgabe:

ISBN 9783-527-40804-7
2008 120 S. Gebunden
€ 29,90

Visionen im Visier

Energien der Zukunft

In diesem Buch erklären führende Wissenschaftler detailliert, wie Photovoltaik, Solarthermie, Windkraft, Wasserkraft, Geothermie, Brennstoffzellen und die Wasserstoffwirtschaft funktionieren. Nüchtern und ohne ideologische Scheuklappen diskutieren sie, welche Erwartungen alternative Techniken zur Erzeugung, Speicherung und zum Transport von Energie wirklich erfüllen können.

- behandelt Schlüsselthemen des 21. Jahrhunderts
- enthält Kapitel über aktuelle Förderprogramme des Bundes und der EU für regenerative Energien
- durchgehend vierfarbig gestaltet

Das Buch wendet sich an alle, die es genau wissen wollen, und wer es gelesen hat, kann kompetent mitreden!



Titelbild: imago

Eine Mauer aus 13.000 Ölfässern errichteten Christo und Jeanne-Claude 1999 im Oberhausener Gasometer – eine Allegorie auf die Endlichkeit und Vergänglichkeit unserer Energiereserven



Editorial	_____	
Ferdi Schüth		
Eine Herausforderung für die ganze Menschheit		2
Klimawandel	_____	
Stefan Rahmstorf		
Chronik einer missachteten Gewissheit		4
Klimafreundliche Werkstoffe	_____	
Christos G. Aneziris und Anja Geigenmüller		
Feuerfest und schadstoffarm		10
Kraftwerksenergie	_____	
Christina Berger		
Wirkungsvoll bis ins hohe Alter		16
Fotovoltaik	_____	
Moritz Riede, Annette Polte und Karl Leo		
Sonnige Aussichten mit organischen Solarzellen		22
Bioenergie	_____	
Rembert Unterstell		
Auf der Suche nach „Miss World Energiemais“		28
Bioengineering	_____	
Stefan Pischinger und Martin Müther		
Der Bio-Sprit der nächsten Generation		34
Elektromobilität	_____	
Margret Wohlfahrt-Mehrens		
Mit dem Akku auf die Überholspur		38
Energienetze	_____	
Christian Rehtanz		
Auf intelligenten Wegen in die Steckdose		44
Energiespeicher	_____	
Ferdi Schüth		
Die Gasometer von morgen		50
Energiedebatte	_____	
Ortwin Renn		
Überzeugungsarbeit für den Wandel		56
Energiestoffwechsel	_____	
Achim Peters		
Der selbstsüchtige Energiefresser im Kopf		60

Ferdinand Schüth

Eine Herausforderung für die ganze Menschheit

Unser Energiesystem muss auf eine neue Grundlage gestellt werden – sicher, nachhaltig und bezahlbar. Wissenschaft und Forschung können dazu entscheidende Impulse leisten.

Ein Wall aus 13.000 Ölfässern, 26 Meter hoch, 68 Meter breit, aufgestellt in einem ehemaligen Gasspeicher – das ist „The Wall“, die Mauer, die auf dem Titelbild dieser forschung SPEZIAL zu sehen ist. Die Installation von Christo und Jeanne-Claude im Oberhausener Gasometer ist ein hochsymbolisches Titelmotiv für diese Sonderausgabe des Magazins der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), die zum „Jahr der Energie 2010“ erscheint. Denn diese Mauer führt uns gleich zwei Epochen unserer Energiegeschichte vor Augen – und die Endlichkeit und Vergänglichkeit unserer Energiereserven: Einst wurde im Gasometer Gicht- und Koksgas für die Kokereien und Stahlwerke des Ruhrgebiets gespeichert. Heute wird die verbliebene Industrie längst mit Öl und Erdgas befeuert – und der Gasometer für Kulturveranstaltungen genutzt. Doch nicht nur der Gasspeicher auf unserem Titelbild ist nurmehr leere Hülle. Auch die 13.000 Ölfässer sind leer.

Installiert wurde The Wall schon 1999. Ein gutes Jahrzehnt später hat die Menschheit Millionen weiterer Ölfässer verbraucht, und „Peak Oil“, der Zeitpunkt des Fördermaximums, ist ein gutes Stück näher gerückt. Und so wie das absehbare Ende des Ölzeitalters zwingt uns auch der größtenteils vom Menschen verursachte Klimawandel, unser Energiesystem auf eine neue Grundlage zu stellen. Diesen Systemwechsel sicher, nachhaltig und bezahlbar zu gestalten, ist eine der größten Herausforderungen, welche die ganze Welt in den kommenden Jahrzehnten zu meistern hat. Wissenschaft kann und will hierzu ihren Beitrag leisten.

Die energie- und forschungspolitischen Weichenstellungen hierzulande sollen in diesem „Jahr der

Energie“ erfolgen. Die Bundesregierung will zunächst ein Grundkonzept für die künftige Energieversorgung in Deutschland vorlegen. Darauf aufbauend soll ein Energieforschungsprogramm entstehen, in dem die Forschungserfordernisse und -programme für die nächsten Jahre festgelegt werden.

Geforscht wird schon lange, zum einen programmorientiert und hauptsächlich vorangetrieben durch die Förderinitiativen des Bundesministeriums für Bildung und Forschung und anderer Ministerien. Zudem werden erhebliche Mittel über die Großforschung und die Ressortforschung bereitgestellt. Angesichts der so verausgabten Summen und auch weil die Förderung in festgelegten Programmen ihrer Philosophie eher fremd ist, könnte man den Beitrag der DFG zur Energieforschung für gering halten. Doch dies trifft ganz und gar nicht zu, wie auch dieses Heft der forschung SPEZIAL zeigt.

Aus der Wissenschaft heraus werden zahlreiche Ideen an die DFG herangetragen und von der DFG gefördert, die zwar grundlagenorientiert sind, aber dennoch hohe Relevanz für die Energieforschung haben. Zusätzlich nimmt die DFG in einer Projektgruppe „Effiziente Energie-Wandlung, -Speicherung und -Nutzung“ Strömungen aus der Scientific Community auf und organisiert etwa Rundgespräche zu aktuellen Themen der Energieforschung. Dabei ist es uns besonders wichtig, Wissenschaftler aus unterschiedlichen Disziplinen zusammenzubringen, da Energieforschung fast immer interdisziplinär ist, die Kontakte zwischen den Disziplinen aber oft nicht sehr ausgeprägt sind.



Die Energieforschung im Rahmen des Förderhandels der DFG erfüllt in besonderem Maße auch zwei Ansprüche, die die drei Wissenschaftsakademien Leopoldina, acatech und BBAW kürzlich in einem Energieforschungskonzept formuliert haben – zum einen eine sehr breit aufgestellte Energieforschung, zum anderen sehr grundlegende Forschungsarbeiten. Garantiert wird beides durch die Breite der DFG-Forschungsförderung über alle Disziplinen hinweg und weil wissenschaftlich exzellente Projekte von der DFG unabhängig von ihrem Gebiet unterstützt werden.

Einen Überblick über die Vielfalt dieser Ansätze und Aktivitäten gibt die vorliegende forschung SPEZIAL, in der DFG-geförderte Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler über ihre Energieforschungsprojekte berichten: Am Anfang zeigt Stefan Rahmstorf, wie lange wir schon vom Klimawandel wissen, wie wenig wirklich dagegen getan wurde und was sich tun ließe. Christos Aneziris/Anja Geigenmüller und Christina Berger lenken den Blick auf neue Werkstoffe, die den Energieverbrauch verringern oder Energiewandlungsprozesse effizienter machen, nicht zuletzt in konventionellen Kraftwerken, die noch lange eine große Rolle spielen werden.

Gleich drei Beiträge befassen sich mit regenerativer Energieerzeugung. Hier sind die organische Fotovoltaik, (siehe den Beitrag von Moritz Riede, Annette Polte und Karl Leo), die Ertragssteigerung von Energiemaiss durch die moderne Züchtungsforschung (Rembert Unterstell) und die Umwandlung von in Pflanzen gespeicherter Energie in Kraftstoff (Stefan Pischinger und Martin Mütter) vielversprechende Ansätze.

Gleiches gilt für die Elektromobilität. Zwar wird das Mobilitätsbedürfnis unserer Gesellschaft noch lange wesentlich durch flüssige Kraftstoffe befriedigt werden – langfristig aber sind batteriebetriebene Elektrofahrzeuge eine ausgezeichnete Option. Ihre großflächige Einführung setzt aber noch echte Durchbrüche in der Batterieforschung voraus, wie Margret Wohlfahrt-Mehrens zeigt. Zunehmende Elektromobilität, mehr noch aber die steigenden Anteile fluktuierender Energie in unseren Stromnetzen, erfordern wiederum neue Ansätze für die Verteilung von elektrischer Energie in „intelligenten Netzen“, die Christian Rehtanz beschreibt. Doch selbst die besten Netze werden nicht alle Lastschwankungen ausgleichen können. Schon deshalb werden Energiespeicher auf allen Zeit- und Größenskalen künftig größere Bedeutung als heute gewinnen.

Die beiden abschließenden Beiträge werfen den Blick auf das große Ganze. Ortwin Renn präsentiert einen systemischen Ansatz, mit dem die Energieforschung sowohl die Natur- und Technik-, als auch die Geistes- und Gesellschaftswissenschaften einbezieht. Und Achim Peters ruft uns in Erinnerung, dass der Energiebegriff nicht nur für Gesellschaftssysteme relevant ist. Alle Organismen, auch wir Menschen, sind darauf angewiesen, dass der Energiestoffwechsel funktioniert. Krankhafte Prozesse, die bis zum Tode führen können, sind sonst die Folge.

Ein facettenreicher Überblick also, wenn er auch nicht Anspruch auf Vollständigkeit erheben kann. Dies ist bei mehreren Hundert DFG-Projekten im weiten Bereich der Energieforschung nicht möglich. Wir hoffen aber, dass diese Schlaglichter dazu anregen, weiter über das Thema Energie nachzudenken und vielleicht hier und dort in die Tiefe zu gehen – nicht nur im „Jahr der Energie“, sondern auch darüber hinaus.

Prof. Dr. Ferdi Schüth ist Vizepräsident der Deutschen Forschungsgemeinschaft.

Stefan Rahmstorf

Chronik einer missachteten Gewissheit

Schon seit 150 Jahren kennen Wissenschaftler den Treibhauseffekt. Ausmaß und Folgen der Erderwärmung werden seitdem immer genauer beschrieben. Doch Politik, Wirtschaft und Gesellschaft haben alle Warnungen nicht ernst genug genommen. Heute sind die Optionen für eine klimafreundlichere Gewinnung und Nutzung von Energie klarer denn je – aber die Zeit für ihre Umsetzung läuft davon.

Es war der 10. Juni 1859, ein halbes Jahr, bevor Charles Darwin seinen „Ursprung der Arten“ veröffentlichte. In den holzgetäfelten Räumen der Royal Society in London demonstrierte der britische Physiker John Tyndall eine Reihe bemerkenswerter Experimente. Die denkwürdige Versammlung wurde von Prinz Albert geleitet. Aber weder er noch Tyndall dürften geahnt haben, wie sehr die Ergebnisse dieser Experimente die Welt 150 Jahre später in Atem halten würden.

Im Dezember 2009 trafen sich über 40.000 Menschen aus aller Welt, darunter rund 120 Staatschefs, in Kopenhagen – und scheideten vorerst bei dem Versuch, die entscheidende Konsequenz aus Tyndalls Messungen zu ziehen und den Ausstoß klimaschädlicher Gase wirksam zu begrenzen.

Doch die Geschichte beginnt bereits vor Tyndall, mit dem französischen Genie Joseph Fourier. Als Waise, der von Mönchen erzogen wurde, hatte Fourier bereits im Alter von 18 Jahren den Professorentitel inne. Er wurde Napoleons Gouverneur in Ägypten, widmete sich später aber wieder ganz der

Wissenschaft. Im Jahr 1824 entdeckte er, weshalb unsere Welt so warm ist – Dutzende Grade wärmer, als eine einfache Berechnung der Energiebilanz nahelegt. Die Sonne bringt die Wärme, und die Erde strahlt sie, unsichtbar für unser Auge, in alle Richtungen ins All hinein. Aber die Zahlen summierten sich nicht zu Null, denn sonst hätte sich die Erde dramatisch abkühlen müssen. Fourier verstand, weshalb das nicht geschieht: Gase in unserer Atmosphäre fangen die abgestrahlte Wärme ab. Er nannte diese Entdeckung „l'effet de serre“: den Treibhauseffekt. Ohne ihn wäre unser Planet kalt und unbelebt.

Es war Tyndall, der diese Ideen dann durch Laborversuche untermauerte. Er bewies, dass einige Gase Strahlungswärme absorbieren – just die Wellenlängen, die die Erde abstrahlt. Eines davon war Kohlendioxid. Tyndall beschrieb 1859 den Treibhauseffekt in unübertroffener Klarheit: „The atmosphere admits of the entrance of solar heat, but checks its exit; and the result is a tendency to accumulate heat at the surface of the planet.“ Die Atmo-

sphäre lässt Sonnenwärme hinein, aber behindert ihren Abfluss; das Ergebnis ist die Tendenz, Wärme an der Oberfläche des Planeten anzusammeln.

Im Jahr 1896 rechnete Svante Arrhenius, der einige Jahre später den Nobelpreis erhielt, zum ersten Mal aus, welche globale Erwärmung eine Verdoppelung der CO₂-Menge in der Luft verursachen würde. Er kam auf 4 bis 6°C – etwas mehr also als die 2 bis 4°C, die zahlreiche moderne Studien übereinstimmend ergeben. Für eine ganz korrekte Berechnung fehlten Arrhenius damals noch einige Zutaten.

Arrhenius war nicht besorgt über eine Erwärmung, im Gegenteil. Er schlug sogar vor, Kohleflöze anzuzünden, damit es möglichst bald wärmer werde. Er stellte sich ein wärmeres Klima angenehm vor – vielleicht, weil er Schwede war. Aber all das blieb akademische Spekulation und nackte Theorie. Niemand verfügte über die nötigen Messungen, um einen CO₂-Anstieg in der Luft überhaupt nachzuweisen.

Das änderte sich erst in den späten 1950er Jahren, als Charles Keeling mit bis dahin unerreichter

Die Sommereisfläche auf dem Arktischen Ozean ist in den letzten Jahrzehnten um 40 Prozent geschrumpft.





Präzision CO₂-Messreihen in der Antarktis und auf dem Mauna Loa auf Hawaii begann – weit weg von allen CO₂-Quellen. Schon 1960 gelang ihm der Nachweis, dass die CO₂-Konzentration in der freien Atmosphäre tatsächlich ansteigt.

Es dauerte dann nur bis 1965, bis der erste von vielen Expertenberichten den damaligen US-Präsidenten Lyndon B. Johnson vor der drohenden globalen Erwärmung warnte: „Bis zum Jahr 2000 wird die Zunahme der CO₂-Menge rund 25 Prozent betragen. Das könnte ausreichen, um messbare, vielleicht deutliche Klimaänderungen zu verursachen.“ Im Jahr 1972 wurde eine spezifischere

Prognose in der führenden Fachzeitschrift *Nature* veröffentlicht: bis im Jahr 2000 würden die Temperaturen um ein halbes Grad steigen. Diese Prognose ist umso bemerkenswerter, da sie zu einer Zeit gemacht wurde, als die Temperaturen seit Jahrzehnten stagnierten. Aber die physikalischen Zusammenhänge waren bekannt. 1979 läutete die US National Academy of Sciences in einem Bericht als erste große Wissenschaftsorganisation die Alarmglocken wegen der drohenden Erwärmung.

Mitte der 1980er Jahre begannen auch die Messdaten der weltweiten Wetterstationen, den

Der weltweite Rückgang der Gletscher (im Bild der Nigardsbreen in Norwegen) ist eines der Symptome der globalen Erwärmung.

Erwärmungstrend zu zeigen. Im Jahr 1988 wurde das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) gegründet, und im Jahr 1992 unterzeichneten die Staatsführer der Welt in Rio de Janeiro ein historisches Abkommen: die Klimarahmenkonvention. Ihr Ziel: „die Stabilisierung der Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre auf einem Niveau, das eine gefährliche menschliche Störung des Klimasystems verhindert“.

Anfang der 1990er Jahre waren die globalen Temperaturen im Vergleich zum Beginn des 20. Jahrhunderts bereits um 0,5°C gestiegen – seit dem Erdgipfel von Rio sind nochmals 0,3°C hinzugekommen. Und sie steigen weiter. Nach den globalen NASA-Daten war Mai 2009 bis April 2010 die wärmste 12-Monats-Periode seit Beginn der Datenreihe im Jahr 1880, Tendenz weiter steigend. Und das obwohl die Sonne schwächelt: Die Leuchtkraft unseres Sterns verharrt seit einigen Jahren auf dem tiefsten Stand seit Beginn der Satellitenmessungen in den 1970ern.

Wer vom Weltall aus auf die Erde blickt, kann es deutlich sehen: Die Eisdecke auf dem arktischen Ozean schrumpft. In den letzten Jahren

ging sie im Sommer auf rund fünf Millionen Quadratkilometer zurück – kaum mehr als halb so groß wie noch in den 1970ern. Im Jahr 2007 war erstmals seit Menschengedenken die Nordwestpassage eisfrei; 2008 dann sogar die Nordwest- und die Nordostpassage. Letztere wurde von Frachtschiffen der Bremer Reederei Beluga Shipping erstmalig im Sommer 2009 durchfahren.

Der globale Meeresspiegel steigt immer schneller an. Um 17 cm im 20. Jahrhundert, und seit Beginn der Satellitenmessungen im Jahr 1993 schon mit der doppelten Rate, nämlich um 3,4 cm pro Jahrzehnt. Die beiden großen Kontinentaleismassen in Grönland und der Antarktis tragen dazu beide nicht unerheblich bei: im Zeitraum 2003 bis

2008 waren ihre zunehmenden Zerfallerscheinungen für 40 Prozent des gemessenen Meeresspiegelanstiegs verantwortlich.

Die Klimageschichte warnt uns. Auf Veränderungen seiner Strahlungsbilanz hat der Planet stets sehr empfindlich reagiert, man denke nur an die großen Eiszeiten. Wir nutzen solche erdgeschichtlichen Daten in der Forschung, um die „Klimasensitivität“ zu bestimmen, das zentrale Maß für die Empfindlichkeit des Klimas gegenüber Störungen. Alles spricht dafür, dass

In einem wärmeren Klima steigt die Gefahr von Überschwemmungen, da wärmere Luft mehr Wasserdampf aufnehmen und abregnen kann.



der Planet auch dieses Mal heftig reagieren wird, wo der Mensch den wärmenden Treibhauseffekt verstärkt.

Und auch die Folgen von scheinbar moderaten Temperaturänderungen waren massiv und tiefgreifend. Der Höhepunkt der letzten Eiszeit vor 20.000 Jahren war im globalen Mittel nur 4 bis 7°C kälter als das jetzige Klima, aber der Planet war ein anderer. Die Ökosysteme auf den Kontinenten waren völlig andere, der Meeresspiegel 120 Meter niedriger. Am Ende dieser Eiszeit verlor die Erde durch die Erwärmung den größten Teil der damaligen Eismassen. Als die große Schmelze vor rund 5.000 Jahren zu Ende ging, war noch ein Drittel des Eises übrig. Wie viel davon wird wohl abschmel-

zen, wenn wir die Erde um weitere drei, vier oder gar sieben Grad aufheizen? Der neue Schmelzprozess hat bereits begonnen.

In den 18 Jahren seit dem Erdgipfel in Rio sind kaum konkrete Erfolge erreicht worden. 2008 lag der Ausstoß von Treibhausgasen 40 Prozent höher als im Jahr 1990. Warum ist es so schwer, diesen Trend zu brechen? Kohle, Erdöl und Erdgas mit ihrer fantastischen Energiedichte haben in den vergangenen Jahrhunderten die industrielle Revolution befeuert und Teilen der Welt einen unglaublichen materiellen Wohlstand ermöglicht. Autos, Flugzeuge, Computer, Handys – Joseph Fourier oder John Tyndall würden aus dem Staunen nicht herauskom-

men, könnten sie unsere Gegenwart besuchen. Wir waren clever und extrem erfolgreich.

Nun müssen wir noch cleverer sein. Wir haben keine andere Wahl, wenn wir unseren Kindern und Enkeln nicht versinkende Küstenstädte, versauernde Ozeane, brennende Wälder und verdorrte Erde hinterlassen wollen.

Eine offensichtliche Lösung ist die unerschöpfliche Energiequelle, die auch unser Klimasystem antreibt: die Sonne. Sie badet uns ständig in einem mehr als reichlichen Photonenstrom. Eine Stunde Sonneneinstrahlung reicht aus, um

Die Windenergie hat in Deutschland inzwischen einen Anteil von acht Prozent am Stromverbrauch erreicht.



Alle Fotos: Rahmstorf

(also ohne weiteren Anstieg) hätten wir dieses Kontingent in weniger als 20 Jahren verbraucht. Diese Zahlen machen deutlich, dass wir uns in einem Wettlauf gegen die Zeit befinden. Mit jedem Jahr, in dem die Emissionen weiter steigen, schwinden die Chancen, die Erwärmung noch unterhalb von 2°C zu stoppen.

Vor 150 Jahren haben Tyndalls Messungen gezeigt, dass CO₂ Wärmestrahlung einfängt und so das Klima aufheizt. Seit 50 Jahren wissen wir, dass wir die CO₂-Menge in der Luft nach oben treiben. Seit Jahrzehnten schreitet die Erwärmung wie vorhergesagt voran. Wie lange werden wir noch zaudern?

Klimaschutz ist eine globale Herausforderung: Die berechtigten Bedürfnisse der Menschen nach Entwicklung und Mobilität müssen künftig mit geringeren Treibhausgasemissionen erfüllt werden.

die ganze Menschheit mehr als ein Jahr lang mit Energie zu versorgen. In der Sonne haben wir bereits den perfekt zuverlässig funktionierenden Fusionsreaktor, in einem beruhigenden Sicherheitsabstand von rund 150 Millionen Kilometern.

Wir müssen ihren Energiestrom nur entschlossener und effektiver nutzen. Technologien dafür haben wir bereits: Windräder, Fotovoltaik und solarthermische Kraftwerke, um nur einige zu nennen. Vieles muss und wird zweifellos noch verbessert werden: intelligente Netze, Speichertechniken, Elektrofahrzeuge. Angesichts der erfreulichen technologischen Fortschritte könnte man ganz entspannt und optimistisch in die Zukunft blicken. Wenn nur ein Problem nicht wäre: Die Zeit läuft uns inzwischen davon.

Seit Rio sind so viele Jahre mit stetig steigenden Emissionen vergangen, dass die in Kopenhagen immerhin beschlossene Begrenzung der Erderwärmung auf höchstens zwei Grad nur noch mit einer sofortigen und entschlossenen Kehrtwende zu erreichen ist. Wegen der langen Lebensdauer von CO₂ in der Atmosphäre (ein großer Teil wird auch in tausend Jahren noch in der Luft sein) bedeutet die Begrenzung der Erwärmung automatisch eine Begrenzung der Menge an CO₂, die noch ausgestoßen werden kann. Und zwar nicht pro Jahr, sondern insgesamt.

Wollen wir die Erwärmung mit einer Wahrscheinlichkeit von 75 Prozent unter 2°C halten, können bis 2050 noch rund 700 Milliarden Tonnen CO₂ freigesetzt werden. Schon bei den heutigen Emissionen



Prof. Dr. Stefan Rahmstorf

ist Professor für „Physik der Ozeane“ an der Universität Potsdam und Leiter der Abteilung „Erdsystemanalyse“ am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung.

Adresse:
Abteilung Erdsystemanalyse
Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung
Telegraphenberg A62, 14473 Potsdam
E-Mail: stefan.rahmstorf@pik-potsdam.de

DFG-Förderung im Rahmen
des Sonderforschungsbereichs SFB 555

► „Komplexe nichtlineare Prozesse: Analyse
– Simulation – Steuerung – Optimierung“

<http://sfb555.physik.hu-berlin.de/>
www.pik-potsdam.de/~stefan

Christos G. Aneziris und Anja Geigenmüller

Feuerfest und schadstoffarm

Ob bei der Stahlherstellung oder Stromerzeugung: Hochleistungskeramiken sind in Industrieanlagen unverzichtbar. Materialforscher arbeiten schon an der nächsten Generation der Werkstoffe. Sie soll nicht nur effizienter sein, sondern auch noch umweltschonender. Weniger Kohlendioxid-Ausstoß und bessere Energienutzung lautet das ehrgeizige Doppelziel.



Eine neue Generation feuerfester Werkstoffe trotz hohen Temperaturen und aggressiven chemischen Verbindungen. Man sieht sie häufig nicht und doch sind sie allgegenwärtig: Oberflächen und Bauteile, die – im wörtlichen Sinne – „feuerfest“ sind.

Bei allen Hochtemperaturprozessen von etwa 600 bis 2.000°C ist der Einsatz von Feuerfestkeramik-Materialien unumgänglich. Ihre Widerstandsfähigkeit gegen extreme äußere Einflüsse garantiert die Funktionsfähigkeit von Hochtemperaturkreisläufen, etwa bei der großtechnischen Erschmelzung von

Metallen und Glas, der Herstellung von Eisen und Stahl, Zement und Keramik oder bei der Energieerzeugung. Mehr noch: Das Design feuerfester Werkstoffe und Bauteile entscheidet über Energieeffizienz und Schadstoffemissionen solcher Prozesse. Der Weg zu höheren Wirkungsgraden bei klimafreundlichen Technologien führt daher unmittelbar über die Entwicklung einer neuen Generation feuerfester Werkstoffe. Bei einem Pkw mit einem Gewicht von 1,3 Tonnen werden beispielsweise circa zehn Kilogramm Feuerfestmaterial für die Herstellung von Stahl-, Aluminium-,

Glas-, und Keramikbauteilen verbraucht, beim Airbus 380 sind es etwa 1.100 Kilogramm.

Grundsätzlich bestehen feuerfeste Werkstoffe und Bauteile aus keramischen Materialien mit sehr hohen Schmelzpunkten, wie zum Beispiel Aluminiumoxid (2.050°C), Zirkoniumoxid (2.700°C) oder Magnesiumoxid (2.800°C), beziehungsweise sehr hohen Zersetzungspunkten, wie Siliziumcarbid (2.300°C) oder Graphit (3.600°C). Ihre technologisch relevanten Eigenschaften (vor allem Beständigkeit gegen Korrosion, Erosion, Kriechen und Thermoschock) erhalten sie durch die gezielte Beeinflussung der Ausgangsmaterialien, von Verfahren zur Formgebung und Parametern des Sinterprozesses. Auf diese Weise entstehen individuelle Werkstofflösungen für ganz unterschiedliche Anwendungsfelder.

Es lassen sich sowohl geformte Steine als auch ungeformte Massen bis hin zu kompletten Bauteilen erzeugen. Sie finden Verwendung für die Auskleidung von Stahlkonvertern, von Drehrohröfen in Zementwerken oder werden zur Wärmedämmung eingesetzt. Keramische Beschichtungen von Schaufeln und Brennkammern in Gasturbinen helfen beispielsweise, Ummantelungen und Oberflächen vor hohen Temperaturen zu schützen. Und sie können noch mehr: Der Einsatz hochbeanspruchbarer Feuerfestkeramiken in Gasturbinen erlaubt höhere Temperaturen und damit höhere Wirkungsgrade – bei gleichbleibendem Brennstoffbedarf

Ähnlich wie „Blutgefäße“ sichern feuerfeste Werkstoffe die Funktionsfähigkeit von Hochtemperaturprozessen, wie hier bei der Stahlherstellung.

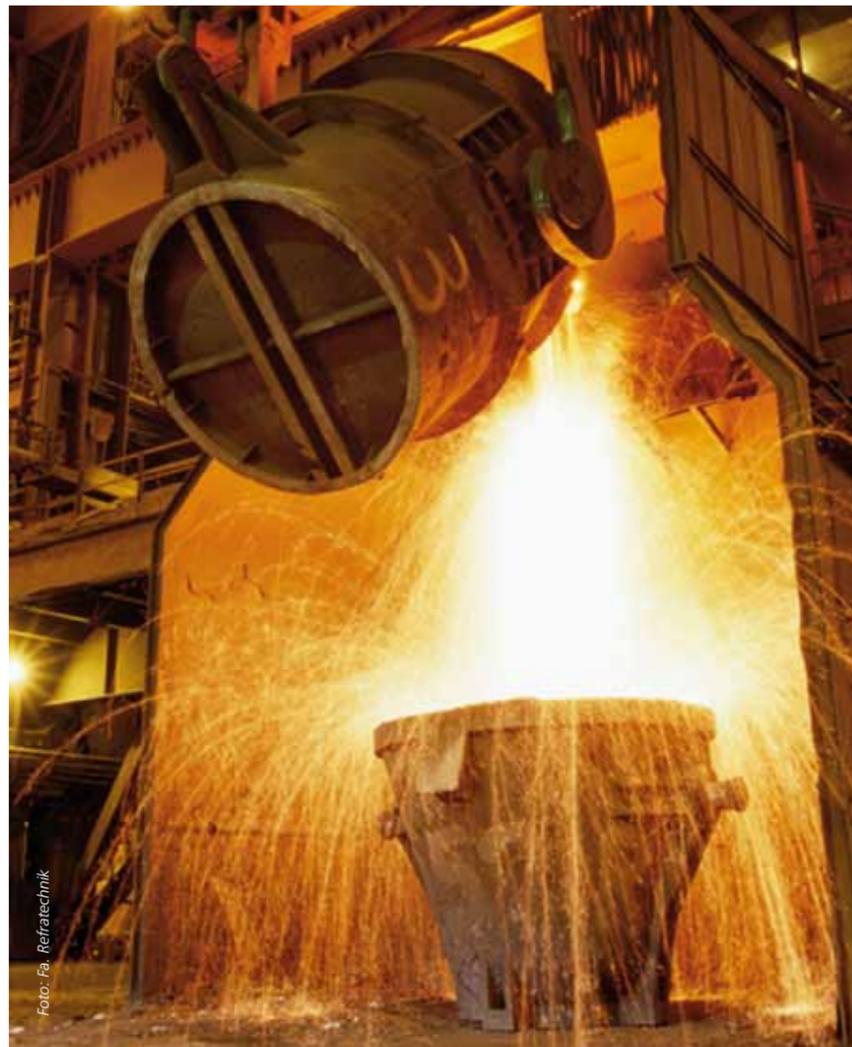


Foto: Fa. Refratechnik

und einem geringeren Ausstoß an Stickoxiden und Kohlendioxid.

Diese Vielfalt an Anwendungsgebieten erfordert eine umfassende materialwissenschaftliche Forschung auf allen Längenskalen vom Nanometer- bis zum Millimeterbereich. Dabei geht es nicht allein um erwünschte thermomechanische und chemische Eigenschaften. Eine ganz zentrale Frage für Wissenschaftler weltweit ist die Reduzierung schädlicher Emissionen durch neuartige, optimierte Feuerfestwerkstoffe. Besonderes Gewicht wird vor allem der Einsparung von CO₂-Emissionen beigemessen, wie die folgenden zwei Beispiele zeigen.

In der Stahlindustrie haben in den letzten 30 Jahren moderne Herstellungsverfahren Einzug gehalten, die abrupte Temperaturwechsel mit sich bringen. Daher sind Materialien mit einer hohen Thermoschockbeständigkeit geradezu unverzichtbar geworden. Die Mehrzahl herkömmlicher Feuerfestprodukte verdankt diese Eigenschaft einem hohen Anteil an Kohlenstoff. Doch ein hoher Kohlenstoffanteil bedeutet einen hohen Kohlendioxid-Ausstoß. Gelingt es, kohlenstoffarme oder gar -freie und dennoch thermoschockbeständige Werkstoffe zu erzeugen, könnte allein im Stahlbereich der CO₂-Ausstoß um mehr als 50 Millionen Tonnen pro Jahr gesenkt werden. Und nicht nur aus ökologischen Gründen wären solche Werkstoffe hochinteressant. Weniger Kohlenstoff bedeutet weniger unerwünschte Verunreinigungen im Stahl und damit die Verwirklichung sogenannter „Clean-Steel-Technologien“.

Auch in der Zementindustrie könnten neue Werkstoffe helfen, Kohlendioxidbelastungen deutlich



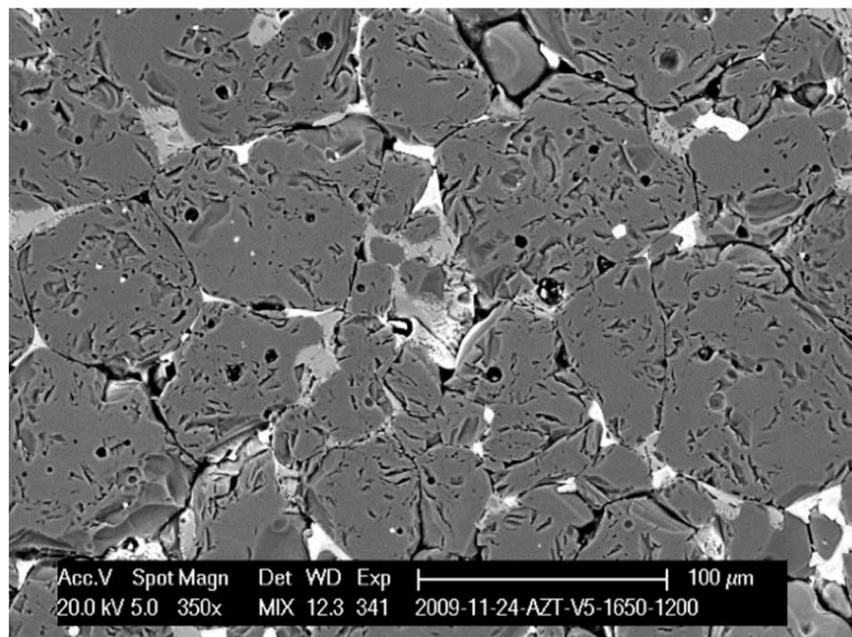
Blick in Strömungsrichtung in die Ringbrennkammer einer Gasturbine mit vollkeramischer Brennkammerauskleidung zur Isolation der Brennraumwand

einzu-schränken. Zunehmend wird der Energiebedarf bei der Zementherstellung durch Sekundärbrennstoffe aus Abfallprodukten gedeckt. Zwar werden dadurch konventionelle Brennstoffe wie Kohle oder Öl eingespart, jedoch geschieht das zu einem hohen Preis: Sekundärrohstoffe enthalten korrosive Alkaliverbindungen, die Feuerfestaussmauerungen und Stahlkonstruktionen angreifen.

Eine längere Lebensdauer von Feuerfestbauteilen ist nur möglich, wenn der Bildung von Alkalikondensaten vorgebeugt wird. Dies gelingt häufig nur bei einer Temperatur der Ofenbauteile jenseits des Taupunkts solcher Verbindungen. Die unzureichende Korrosionsbe-

ständigkeit keramischer und metallischer Komponenten wird also durch einen extrem hohen Energieaufwand und entsprechend hohe CO₂-Belastungen kompensiert. Auswege aus diesem Dilemma erfordern neue, alkaliresistente Feuerfestwerkstoffe, die im Übrigen nicht nur in der Zementindustrie dringend gebraucht werden. Ähnliche Szenarien ergeben sich für Anlagen zur Müllverbrennung oder bei der Erzeugung von Synthesegas auf der Basis von Kohle-Vergasung.

Gefährliche Emissionen spielen schließlich bei der Herstellung feuerfester Erzeugnisse eine erhebliche Rolle. Um aus keramischen Pulvern Massen und Formkörper zu erzeugen, werden dem Pulver



Mikrostruktur einer kohlenstofffreien Aluminiumoxid-Feuerfestkeramik. Nach Thermoschockbeanspruchung steigt die Festigkeit um 100 Prozent.

unter anderem Bindemittel zugeben. Als organische Bindemittel für kohlenstoffhaltige MgO- und Al₂O₃-Erzeugnisse kommen maß-

geblich Steinkohlenteer und Steinkohlenteer zum Einsatz. Diese Bindemittel enthalten krebserregende Aromaten, vor allem das als um-



Nanoplättchen auf Aluminiumoxid-Basis erhöhen die Thermoschockbeständigkeit in kohlenstoffgebundenen Feuerfesterzeugnissen – weniger Kohlenstoff wird gebraucht.

weltgefährlich geltende Benzo[a]pyren. Dieser aromatische Kohlenwasserstoff liegt nicht selten in einer Konzentration vor, die die Grenzwerte für eine Kennzeichnungspflicht um das 200- bis 300-fache überschreitet. Zwar werden auch alternative Bindemittel mit geringeren Gehalten an Benzo[a]pyren eingesetzt. Doch diese basieren oft auf einer Kombination mit härtbaren Kunstharzen, vor allem Formaldehyd- und Furanharze, die während des Brennprozesses wiederum den Ausstoß von CO₂ erhöhen.

Die Beispiele zeigen eindringlich den Forschungsbedarf für völlig neue, kohlenstoffarme beziehungsweise -freie Werkstoffe und Bauteile. Dieser Herausforderung widmet sich ein eigenes Schwerpunktprogramm der Deutschen Forschungsgemeinschaft. Wissenschaftler von zehn deutschen Universitäten arbeiten gemeinsam an einer neuen Generation „intelligenter“ Feuerfestmaterialien. Sie wollen in den kommenden Jahren Werkstoffe und Bauteile entwickeln, die nicht nur hervorragende technologische Eigenschaften besitzen, sondern auch den Energieverbrauch und die Emission direkter und indirekter Treibhausgase spürbar senken.

Ein erster Meilenstein auf diesem Weg wurde bereits erreicht: Den Wissenschaftlern des Schwerpunktprogramms ist es gelungen, einen keramischen kohlenstofffreien Werkstoff zu erzeugen, der sich einem Temperaturwechsel anpassen kann. Dies ist nicht selbstverständlich, da Keramiken normalerweise begrenzt „duktil“, das heißt kaum verformbar, sind. Wirken nun unterschiedliche Temperaturen auf eine Keramik ein, entstehen thermische Spannungen. Sobald diese Spannungen einen kri-

tischen Wert überschreiten, bilden sich Risse und die Keramik versagt. Die Werkstoffe aus dem Schwerpunktprogramm sind jedoch mit sogenannten „Federelementen“ ausgestattet. Eine Aluminiumoxidkeramik erhält Zusätze von Zirkon- und Titanoxid. Wird die so dotierte Masse unter bestimmten Bedingungen gebrannt, bilden sich an den Aluminiumoxid-Korngrenzen neue Phasen. Bei einem plötzlichen Temperaturwechsel zersetzen sich diese neugebildeten Phasen. Es kommt zu einer Volumenänderung im Werkstoff, die dessen Matrix unter Druck setzt. Diese Verspannung erhöht die Festigkeit und ermöglicht es, einen solchen Thermoschock unbeschadet zu überstehen.

Und auch die Reduzierung des Kohlenstoffanteils in kohlenstoffgebundenen Systemen rückt in greifbare Nähe. Kohlenstoffgebundenen Werkstoffen werden nanoskalige Zusätze in Form von Nanoröhrchen beziehungsweise Nanoplättchen zugegeben, die die Thermoschockbeständigkeit positiv beeinflussen. Solche Werkstoffe könnten zukünftig herkömmliche kohlenstoffhaltige Erzeugnisse wie etwa Tauchausgüsse zur Führung von Stahlschmelzen ersetzen.

Die Forschungsarbeiten zum Werkstoffdesign finden ihre Fortsetzung in innovativen Herstellungsverfahren. Beispielsweise eröffnen Mehrschichttechnologien auf Papier- oder Folienbasis völlig neue Perspektiven, thermoschockbeständige kohlenstofffreie Einzelkomponenten bis hin zu Bauteilsystemen herzustellen. So lassen sich Papiere mit hochtemperaturbeständigen Keramikfasern versetzen beziehungsweise keramische Folien aus Schichten mit unterschiedlichen



Wärmeausdehnungskoeffizienten kombinieren, um schroffen Temperaturwechseln standzuhalten. Mittels „3D-Drucker“ können lagenweise Variationen keramischer Pulver aufgetragen werden, die thermoschockbeständige Oberflächen genau an den Stellen erzeugen, an denen die thermischen Belastungen am höchsten sind. Umfangreiche Prüfverfahren sowie Modellierungen und Simulationen helfen den Wissenschaftlern, die Tragfähigkeit ihrer Konzepte zu überprüfen und weiterzuentwickeln.

Das vordringliche Ziel beim Klimaschutz ist die Verringerung des Ausstoßes schädlicher Treibhausgase. Ein großer Teil dieser Emissionen entsteht in der Grundstoffindustrie und der Energiewirtschaft. Neue Werkstoffentwicklungen und innovative Herstellungsverfahren von feuerfesten Materialien sind somit ein entscheidender Schritt, um Hochtemperatursysteme ökonomisch und ökologisch sinnvoll zu gestalten.

Neu gelieferter Boden eines Elektrolichtbogenofens



Prof. Dr.-Ing. Christos G. Aneziris

ist Professor für Keramik an der TU Bergakademie Freiberg und Koordinator des DFG-Schwerpunktprogramms 1418.

Dr. Anja Geigenmüller

ist wissenschaftliche Assistentin am Lehrstuhl für Marketing und internationalen Handel an der TU Bergakademie Freiberg.

Adresse:
Institut für Keramik, Glas- und Baustofftechnik
TU Bergakademie Freiberg
Agricolastraße 17, 09596 Freiberg
E-Mail: aneziris@ikgb.tu-freiberg.de

DFG-Förderung im Rahmen des Schwerpunktprogramms SPP 1418

► „Feuerfest – Initiative zur Reduzierung von Emissionen“

www: tu-freiberg.de/ze/fire/

Christina Berger

Wirkungsvoll bis ins hohe Alter

Fossil betriebene Kraftwerke bleiben wichtige Bausteine moderner Energieversorgung. Auch die neuesten Anlagen sind auf mindestens 30 Jahre ausgelegt. Sie sollen die Wärme noch besser und sauberer in Energie umwandeln. Wissenschaft und Wirtschaft entwickeln dafür innovative Bauteile. Ihre Vision: Kraftwerke mit „Nahe-Null-Emission“

Kraftwerksenergie ist in elektrische Energie umgewandelte Wärmeenergie. Die Umwandlung erfolgt in Wärmekraftmaschinen, in Dampf- oder Gasturbinen und im davon angetriebenen Generator. Die Wärme wird aus der Verbrennung der fossilen Brennstoffe Kohle, Öl oder Gas gewonnen. Bei der Verbrennung von Kohle wird in Kesselanlagen Dampf mit hoher Temperatur und Druck erzeugt, der in der Dampfturbine entspannt wird. In Gaskraftwerken wird Öl oder Gas in einer Brennkammer bei hohem Druck verbrannt und ebenfalls in einer Turbine entspannt.

Der Wirkungsgrad der Energieumwandlung ist umso höher, je besser die Wärme ausgenutzt wird, und ist vor allem von den Prozessparametern Druck und Temperatur abhängig. Je höher der Druck und die Dampf- oder Gaseintrittstemperatur sind, umso mehr Wärmeenergie setzen die Schaufeln einer Turbine in mechanische Energie um, mit der der Generator angetrieben wird. Damit sinkt der Verbrauch an Kohle, Öl oder Gas und gleichzeitig auch die Menge an Abgasemission, wie etwa der Ausstoß an Kohlendioxid (CO₂). So sinkt auch der Aufwand

für die Abgasnachbehandlung, beispielsweise für die Rauchgasentschwefelung, sodass sich eine Wirkungsgradsteigerung überproportional auf den Primärenergiebedarf auswirkt. Die Steigerung des Wirkungsgrades stellt foglich den Schlüssel für umweltfreundliche Kraftwerke dar.

In den letzten 20 Jahren konnte der Wirkungsgrad von fossil betriebenen Dampf- und Gaskraftwerken um circa 20 Prozent gesteigert werden, was im Wesentlichen durch die Erhöhung der Prozesstemperaturen und -drücke erreicht wurde. Hierfür waren Werkstoffe erforderlich, die den deutlich höheren Beanspruchungen standhalten. Mit neuen Hochtemperaturwerkstoffen konnten die Dampfeintrittstemperaturen in die Dampfturbine von 565°C auf heute 620°C, die Gaseintrittstemperaturen in die Gasturbine von 1.100°C auf 1.450°C gesteigert werden.

Fossile Kraftwerke müssen für den Langzeitbetrieb von bis zu 30 Jahren ausgelegt werden. Die Hochtemperaturbauteile wie Turbinenwellen und Gehäuse, Turbinenschaufeln, heißgasbeaufschlagte Brennkammerbauteile oder Dampf-

erzeugerrohre des Kessels sind daher lange Zeit höchsten mechanischen, thermischen und oxidativen Beanspruchungen ausgesetzt. Weil mit steigender Temperatur die Beweglichkeit der Atome zunimmt und sich die Struktur im Inneren ändert, bewirkt die Hochtemperaturbeanspruchung im Gefüge des Werkstoffs zeitabhängige Prozesse, die mit plastischer Verformung und Schädigung verbunden sind. An der Oberfläche finden zudem Reaktionen mit der Umgebungsluft statt, die Oxidation oder Korrosion verursachen. Die Veränderungen im Werkstoff oder an der Oberfläche laufen umso schneller ab, je höher die Temperatur ist. Die für den technischen Einsatz wichtigen Werkstoffeigenschaften wie die Festigkeit und das Verformungsverhalten ändern sich je nach Temperatur und Beanspruchung, wobei die Werkstofffestigkeit mit zunehmenden Temperaturen und fortschreitender Beanspruchungszeit abnimmt.

Diese Eigenschaftsänderungen werden mit komplexen metallischen Legierungen, die einen speziellen inneren Aufbau aufweisen, verringert. Dabei kommt neben dem Ausbalancieren der chemischen Ele-

Einfache Gleichung der Energieumwandlung: Je höher Temperatur und Druck, desto geringer der Ausstoß an Kohlendioxid



mente dem Herstellungsprozess mit besonderen Formgebungsverfahren und der Wärmebehandlung eine entscheidende Rolle bei der Werkstoffentwicklung zu.

Für Wellen und Gehäuse von Dampfturbinen und Kesselrohren werden bis Temperaturen von etwa 540°C niedrig legierte Stähle, das heißt Eisenbasislegierungen mit Chromgehalten bis zu zwei Prozent und geringen Kohlenstoff-, Molybdän- und Vanadiumgehalten, verwendet, die vor circa 50 Jahren entwickelt wurden. In einer durch die chemische Zusammensetzung und den Herstellprozess der Bauteile bestimmten Matrixstruktur befinden sich feinste Karbide in Größen von einem tausendstel bis einem millionstel Millimeter. Diese stabilen

Phasen im Gefüge begrenzen bei den hohen Temperaturen und den vorgesehenen Beanspruchungszeiten den unvermeidlichen Festigkeitsabfall. Mit weiteren Werkstoffentwicklungen konnten durch die Erhöhung der Chromgehalte auf zwölf Prozent die Dampfeintrittstemperaturen auf 565°C erhöht werden.

Durch eine Optimierung des Chromgehaltes auf neun bis elf Prozent und zusätzliche Legierungselemente wie Wolfram, Niob, Stickstoff und Bor, die thermisch stabilere komplexe Karbide und Nitride bilden, können solche Stähle langfristig bei Temperaturen bis zu 620°C betriebssicher eingesetzt werden. Mit diesem Typ von Stählen wurde ein Meilenstein in der Hochtemperatur-Werkstoffentwicklung erreicht, da die vorteilhaften

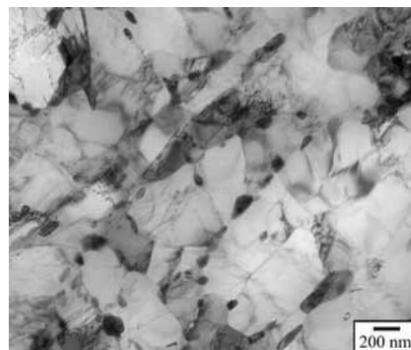
Langzeiteigenschaften auch für massive Turbinenbauteile mit Gewichten bis 80 Tonnen und mehr erreicht werden.

Die komplexen Veränderungen nach Hochtemperatur-Langzeitbeanspruchung verdeutlichen Gefügeuntersuchungen vom konventionellen 12-Prozent-Chrom-Molybdän-Vanadium-Stahl und von dem neu entwickelten 10-Prozent-Chrom-Molybdän-Vanadium-Stahl, der zusätzlich die Elemente Niob, Stickstoff und Bor enthält.

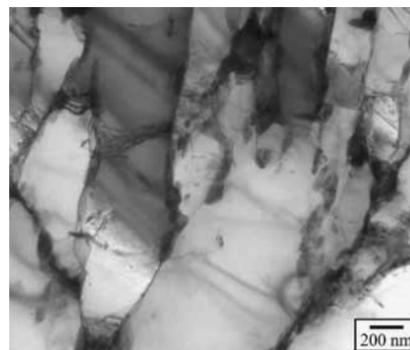
Auffallend sind bei dem modernen Stahl die kleine Kristallitgröße und die vielen feinen Ausscheidungen, die sich im Gegensatz zum konventionellen Stahl auch nach langer Betriebsbeanspruchung deutlich weniger verändern. Dieser Stabilisierung des komplexen Werkstoffgefüges sind die wesentlich besseren Langzeiteigenschaften des neuen Stahles zu verdanken. Die Entwicklung des modernen Werkstoffes wurde von europäischen Experten aus Industrie und Wissenschaft über einen Zeitraum von über zehn Jahren erfolgreich gestaltet.

In der Gasturbine werden die heißgasbeaufschlagten Bauteile wie Schaufeln, Rotor und Brennkammer mit Luft aus dem Verdichter gekühlt, um die Bauteiltemperaturen zu begrenzen. Geschmiedete ungekühlte Schaufeln wurden zunächst durch im Feingussverfahren hergestellte, innen gekühlte Schaufeln aus neu entwickelten Nickel- oder Kobaltbasislegierungen mit wesentlich höherer thermisch-mechanischer Belastbarkeit und ver-

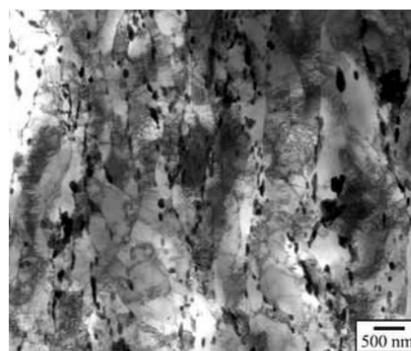
Gefügebilder eines konventionellen und eines modernen Turbinenstahls im Ausgangszustand und nach Hochtemperaturbeanspruchung



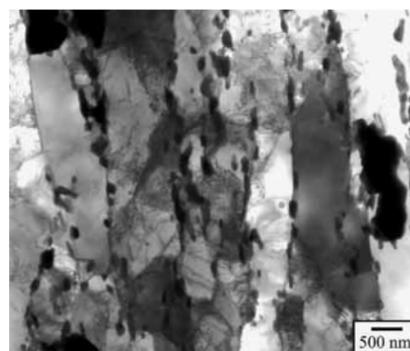
Konventioneller 12% CrMoV-Stahl im Ausgangszustand



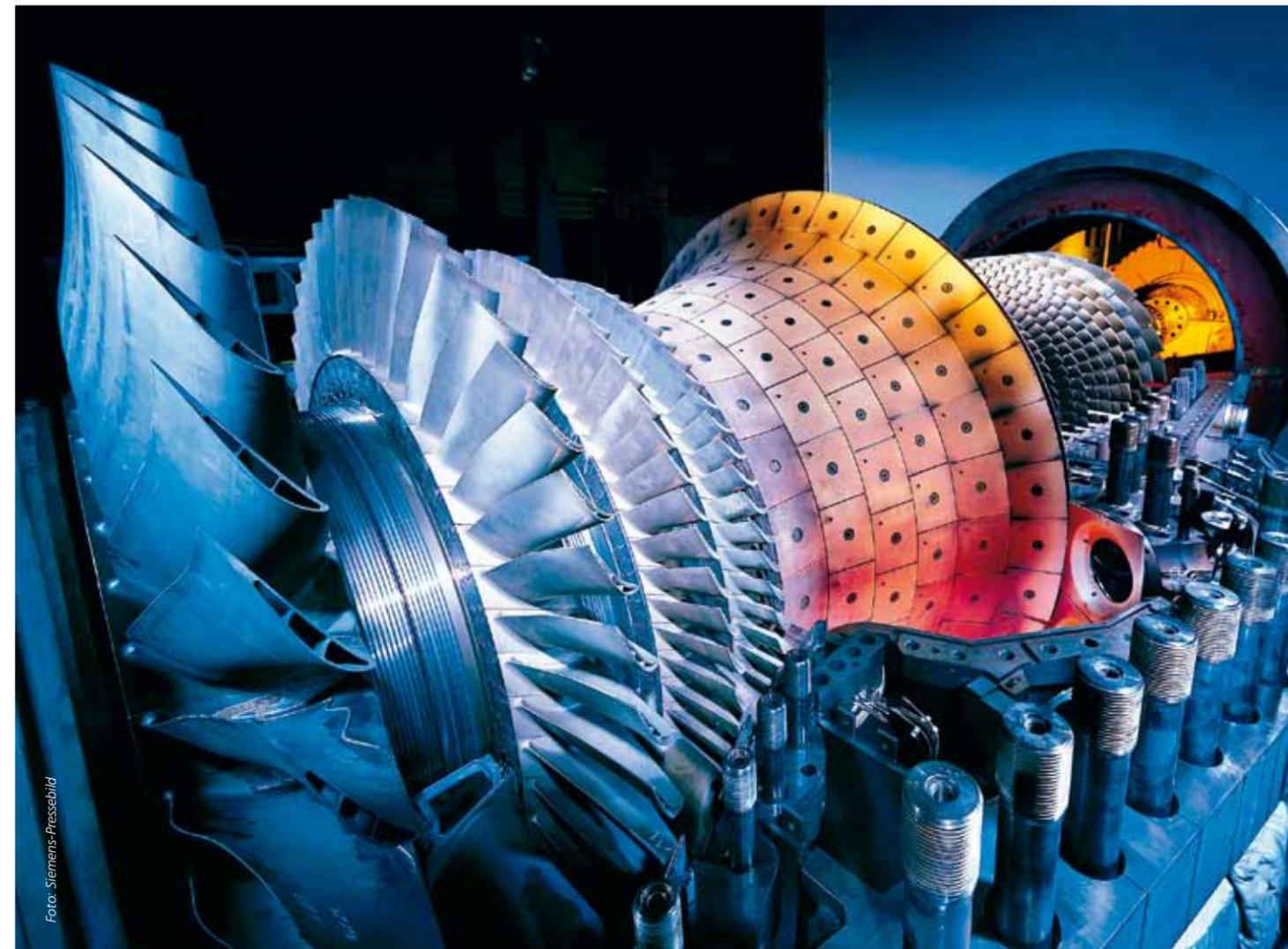
Konventioneller 12% CrMoV-Stahl nach Beanspruchung (550°C 4224 h)



Moderner 10% CrMoVNB-Stahl im Ausgangszustand



10% CrMoVNB-Stahl nach Beanspruchung (650°C 9569 h)



besserer Korrosionsbeständigkeit ersetzt. Damit verbunden sind Entwicklungen spezieller Fertigungstechnologien von Schaufeln mit komplizierter Kühlkonfiguration, Beschichtungstechnologien und schließlich auch die Herstellung von Bauteilen, die nicht mehr aus einem mehrkristallinen Werkstoff – wie dies normalerweise der Fall ist –, sondern trotz komplizierter Bauteilgeometrie aus nur einem einzigen metallischen Kristall (Einkristall) bestehen. Heute erlauben einkristalline Schaufelwerkstoffe je nach vorzusehender Lebensdauer

und mechanisch-thermischer Beanspruchungen Werkstofftemperaturen zwischen 900 und 1.000°C. Durch Wärmedämmschichtsysteme aus keramischen Oxiden mit geringerer Wärmeleitfähigkeit und mithilfe eines Kühlluftfilmes beträgt die Temperaturdifferenz zwischen Oberfläche und Metallgrenzfläche über 200°C, sodass die Gaseintrittstemperaturen hier bis zu 1.450°C betragen können.

Was bleibt zu tun und welche Herausforderungen ergeben sich daraus für zukünftige Kraft-

Moderne Gasturbinen lassen sich flexibel an unterschiedliche Brennstoffe anpassen.

werke? Mit der Erhöhung des Wirkungsgrades auf 50 Prozent sind fossil befeuerte Kraftwerke mit einer „Nahe-Null-Emission“ realisierbar, die wirtschaftlich und betriebssicher den Grundlastbedarf einer zukünftigen Energieversorgung bereitstellen. Hierzu müssen jedoch die Dampftemperaturen auf über 700°C bei gleichzeitiger Erhöhung des Dampfdrucks auf 350 bar steigen. Für Komponenten in diesem extrem hohen Temperatur-

und Beanspruchungsbereich sind nur noch Nickelbasislegierungen geeignet, die bereits in der Gasturbinentechnik eingesetzt werden. Für größere Bauteilvolumina und -querschnitte, wie für Wellendurchmesser bis 1.000 Millimeter, Gehäusewanddicken bis 300 Millimeter und Rohre, sind jedoch ge-

Drei Paare von Leitschaufeln und Lauf-schaufeln aus Nickelbasiswerkstoffen für Gasturbinen (Paar 1: konventionell vergossen, Paar 2: gerichtet erstarrt, Paar 3: aus einkristalliner Nickelbasislegierung)

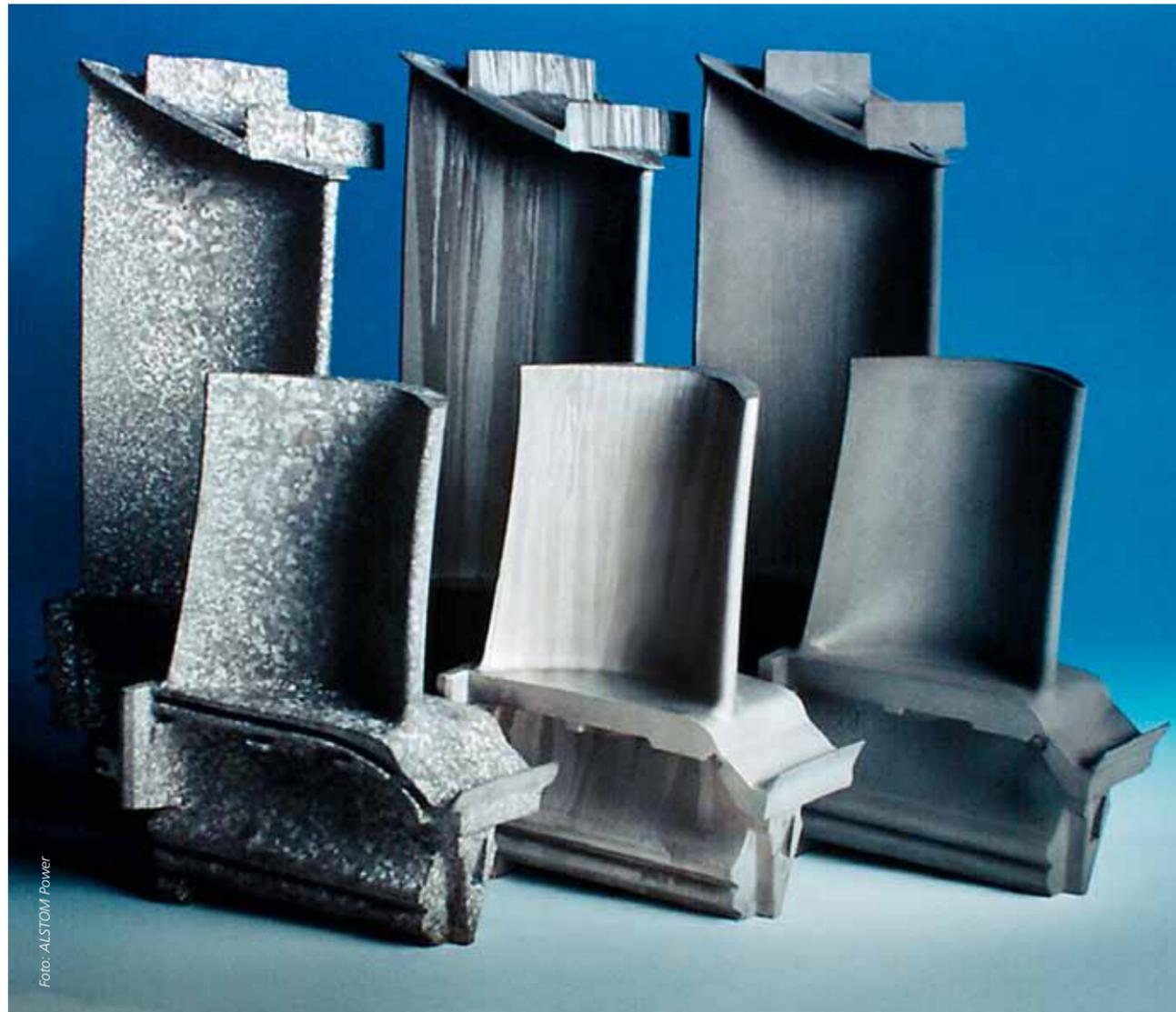


Foto: ALSTOM Power

eignete Herstellungstechnologien zu entwickeln und die geforderten Bauteileigenschaften nachzuweisen. In solchen Bauteilen müssen auch nickelbasierte Werkstoffe mit eisenbasierten Stahlwerkstoffen stoffschlüssig durch Schweißen verbunden werden. Die unterschiedlichen Werkstoffeigenschaften der Nickelbasislegierungen und Stähle stellen dabei große Herausforderungen dar. Diese Entwicklungen stehen derzeit im Mittelpunkt zahlreicher gemeinsamer Projekte von Forschungsinstituten und der Industrie.

Bei der Gasturbine sind zwei Ziele im Fokus, nämlich die weitere Erhöhung der Gaseintrittstemperatur auf 1.600°C und mehr sowie die Reduktion des für die Kühlung der Komponenten erforderlichen Verbrauchs an Verdichterluft. Für die Beschauelung ist das Potenzial der Nickelbasislegierungen mit dem erreichten technischen Stand weitestgehend ausgeschöpft. Eine weitere Anhebung der Werkstofftemperatur ist nur durch den Einsatz von Metalllegierungen mit höherer Schmelztemperatur, beispielsweise



Foto: Siemens-Pressbild

Beschaufelter Dampfturbinenrotor

durch Kobaltlegierungen, keramische Werkstoffe oder metallkeramische Verbundwerkstoffe, möglich. Deren Realisierung bedarf aber noch eines erheblichen Forschungsaufwandes.

Auch hybride Schaufeln, die aus Teilen unterschiedlicher Werkstoffe zusammengefügt sind, wären denkbar, sind aber aufgrund fehlender Füge-technologien noch nicht zu realisieren. Schließlich sind Wärmedämmschichten mit geringerer Wärmeleitfähigkeit und höherer Einsatztemperatur zu entwickeln, zum Beispiel als Duplexschichtsysteme aus den heute verwendeten Zirkonoxid-schichten und anderen Oxiden.

Kraftwerksbauteile müssen einen störungsfreien Betrieb von 30 Jahren versagensfrei garantieren. Deshalb müssen die Hochtemperatur-Werkstoffeigenschaften unter den beschriebenen extremen Beanspruchungen hinreichend bekannt sein, was ausreichend lange Versuchszeiten von bis zu zehn Jahren erfordert. Dies begründet die langen Entwicklungszeiten, um von der Idee einer Legierungszusammensetzung für solche Werkstoffe hin zu großen Bauteilen zu gelangen. Zur Optimierung der chemischen Zusammensetzung, der Herstellungsprozesse der Bauteile und der geforderten Eigenschaften sind Modellierungs- und Simulationsmethoden zu schaffen, mit denen

die Entwicklungszeiten wesentlich verkürzt werden können. Diese Entwicklungen erfolgen alle in Gemeinschaftsarbeit von Wissenschaft und Industrie, sowohl bei der Planung, Herstellung und Untersuchung von Versuchsschmelzen als auch von Demonstrationsbauteilen.

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass die Forderung nach Kraftwerksanlagen mit erhöhtem Wirkungsgrad und gesenktem Brennstoffbedarf eine stetige Herausforderung vor allem für die Entwicklung und Anwendung von Hochtemperaturwerkstoffen darstellt.



Prof. Dr.-Ing. Christina Berger leitet das Zentrum für Konstruktionswerkstoffe an der TU Darmstadt.

Adresse:
Zentrum für Konstruktionswerkstoffe
Fachgebiet und Institut für Werkstoffkunde
Staatliche Materialprüfungsanstalt Darmstadt
TU Darmstadt
Grafenstraße 2, 64283 Darmstadt
E-Mail: berger@mpa-ifw.tu-darmstadt.de

DFG-Förderung im Rahmen verschiedener Verfahren und Projekte

www.mpa-ifw.tu-darmstadt.de

Moritz Riede, Annette Polte und Karl Leo

Sonnige Aussichten mit organischen Solarzellen

Bei der Umwandlung des Sonnenlichts in elektrische Energie spielen Solarzellen eine Schlüsselrolle. Dabei bieten neuartige Konzepte auf der Grundlage organischer Halbleiter viele Vorteile gegenüber ihren anorganischen Verwandten auf Siliziumbasis, die auf Dächern und in Taschenrechnern verbreitet sind. Noch aber ist ihr Wirkungsgrad zu niedrig für den großflächigen Einsatz. Ein bundesweites Forschungsprogramm will dies ändern.

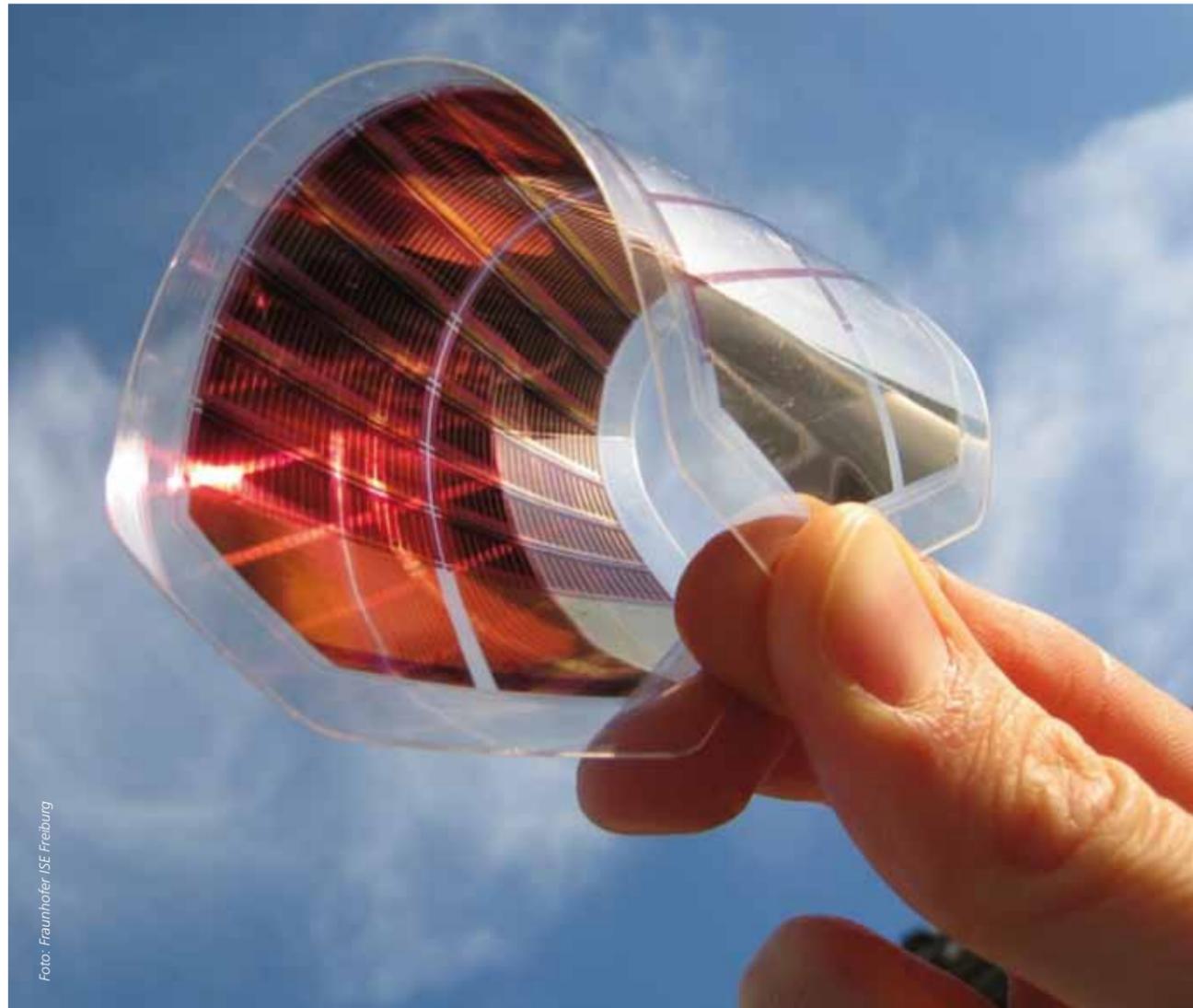


Foto: Fraunhofer ISE Freiburg

In den kommenden Jahren steht eine Revolution bei der Stromerzeugung ins Haus. Der steigende Energiehunger der Menschheit führt dazu, dass im Jahre 2050 weltweit durchschnittlich 4,5 bis 6 Milliarden Kilowatt elektrische Leistung erzeugt werden müssen. Das entspricht dem drei- bis vierfachen der heute benötigten Menge. Zum Vergleich: Ein üblicher Wasserkocher hat eine Leistung von circa einem Kilowatt. Dieser Energiebedarf soll zudem noch aus sauberen und erneuerbaren Quellen gedeckt werden, da die derzeitige Stromerzeugung auf der Basis fossiler Rohstoffe nicht nachhaltig und mit dem Ausstoß klimaschädlicher Treibhausgase verbunden ist. Die Kernenergie kann dabei höchstens als Übergangstechnologie dienen.

Hier kommt unsere Sonne ins Spiel, denn sie schießt kontinuierlich die gewaltige Leistung von etwa 120.000 Milliarden Kilowatt auf die Erde: Damit wird die Nutzung der Sonnenenergie neben dem Thema „Energiesparen“ zu einer der wichtigsten Herausforderungen für die Menschheit im 21. Jahrhundert.

Die Fotovoltaik, also die direkte Umwandlung von Sonnenlicht in elektrische Energie mit Hilfe von Solarzellen, ist aus vielerlei Gründen eine besonders attraktive Form der regenerativen Energieversorgung. Neben den klassischen anorganischen Solarzellen, die man zum Beispiel in Taschenrechnern oder inzwischen auch oft auf Hausdächern sehen kann, wurden in den letzten Jahren verstärkt neuartige Solarzelltechnologien erforscht. Dazu zählen insbesondere die organischen Solarzellen. Sie unterscheiden sich von ihren anorganischen Schwestern dadurch, dass sie nicht auf dem auch in Computer-Chips



Foto: SpengertTU Dresden

Wissenschaftler bei der Herstellung organischer Solarzellen an Vakuumkammern

verwendeten anorganischen Halbleiter Silizium basieren, sondern auf organischen Halbleitern. Das sind Moleküle, wie sie ähnlich in Plastiktüten oder als Farbstoffe in Autolacken zu finden sind.

Diese Entwicklung kommt zur richtigen Zeit, um im nächsten Jahrzehnt eine wichtige Rolle bei der Umstellung der Energieversorgung zu spielen. Organische Solarzellen könnten bei den Produktions- und Stromerzeugungskosten deutlich niedriger liegen als andere Solarzelltechnologien. Die Herstellungsverfahren für organische Solarzellen sind vergleichsweise einfach und für große Flächen geeignet, der Material- und Energiebedarf ist sehr gering. So können organi-

sche Solarzellen einfach gedruckt werden wie eine Zeitung oder bei Raumtemperatur im Vakuum aufgedampft werden. Außerdem verfügt man über nützliche Erfahrungen bezüglich der Herstellung aus der etwas weiter entwickelten Technologie zur Herstellung von organischen Leuchtdioden, die zum Teil bereits in Mobiltelefonen verwendet werden. Weiterhin zählt die organische Fotovoltaik zu den wenigen Technologien, bei denen keine Materialengpässe bei der Herstellung und keine Probleme bei der Entsorgung zu erwarten sind: Die Ausgangsstoffe lassen sich leicht aus einfachen Kohlenstoffverbindungen herstellen.

Momentan treten organische Solarzellen aber noch nicht in Kon-



Ausgangsstoffe für innovative Konstruktionen: Durch die Kombination verschiedenfarbiger Substanzen gelingt es, einen größeren Teil des Sonnenspektrums zu nutzen und die Effektivität zu erhöhen.

kurrenz zu ihren bereits etablierten anorganischen Verwandten, da sie derzeit noch nicht in der Lage sind, Sonnenlicht ähnlich effizient in Strom umzuwandeln wie zum Beispiel Siliziumsolarzellen, die etwa 90 Prozent des Weltmarkts ausmachen. Während Letztere einen Wirkungsgrad um die 18 Prozent in der Produktion schaffen, kommen organische Solarzellen im Labor erst seit Kurzem auf knapp acht Prozent. Ihre Stärken liegen daher neben dem Kostenpotenzial vorerst in anderen Eigenschaften:

Organische Solarzellen können wesentlich dünner als anorganische Solarzellen hergestellt werden, da für eine effektive Lichtabsorption schon sehr geringe Schichtdicken genügen. Dies ermöglicht die Fertigung auf flexiblen Substraten wie Plastikfolien und eröffnet völlig neue Anwendungsbereiche.

Das erste Produkt, eine Tasche mit einem integrierten, flexiblen organischen Solarmodul, ist seit Ende

2009 auf dem Markt. Damit kann man fernab von jeglicher Steckdose Handys und andere Kleingeräte aufladen. Der Kreativität bei möglichen Anwendungsgebieten sind hier kaum Grenzen gesetzt: Wie wäre es zum Beispiel mit einem Zelt oder Schiffssegel, das über eingebaute Solarzellen verfügt? Neben dem Einstieg in den mobilen Bereich sehen Experten auch in der Gebäudeintegration einen Zukunftsmarkt. Große Fensterflächen oder Jalousien könnten dann genutzt werden, um mit farbigen und halbtransparenten Solarzellen Strom aus der Sonne zu erzeugen. Die anspruchsvollste Anwendung wird jedoch der Einsatz in stationären Fotovoltaik-Anlagen zur Stromerzeugung sein, als Ergänzung oder Ersatz von anorganischen Solarzellen.

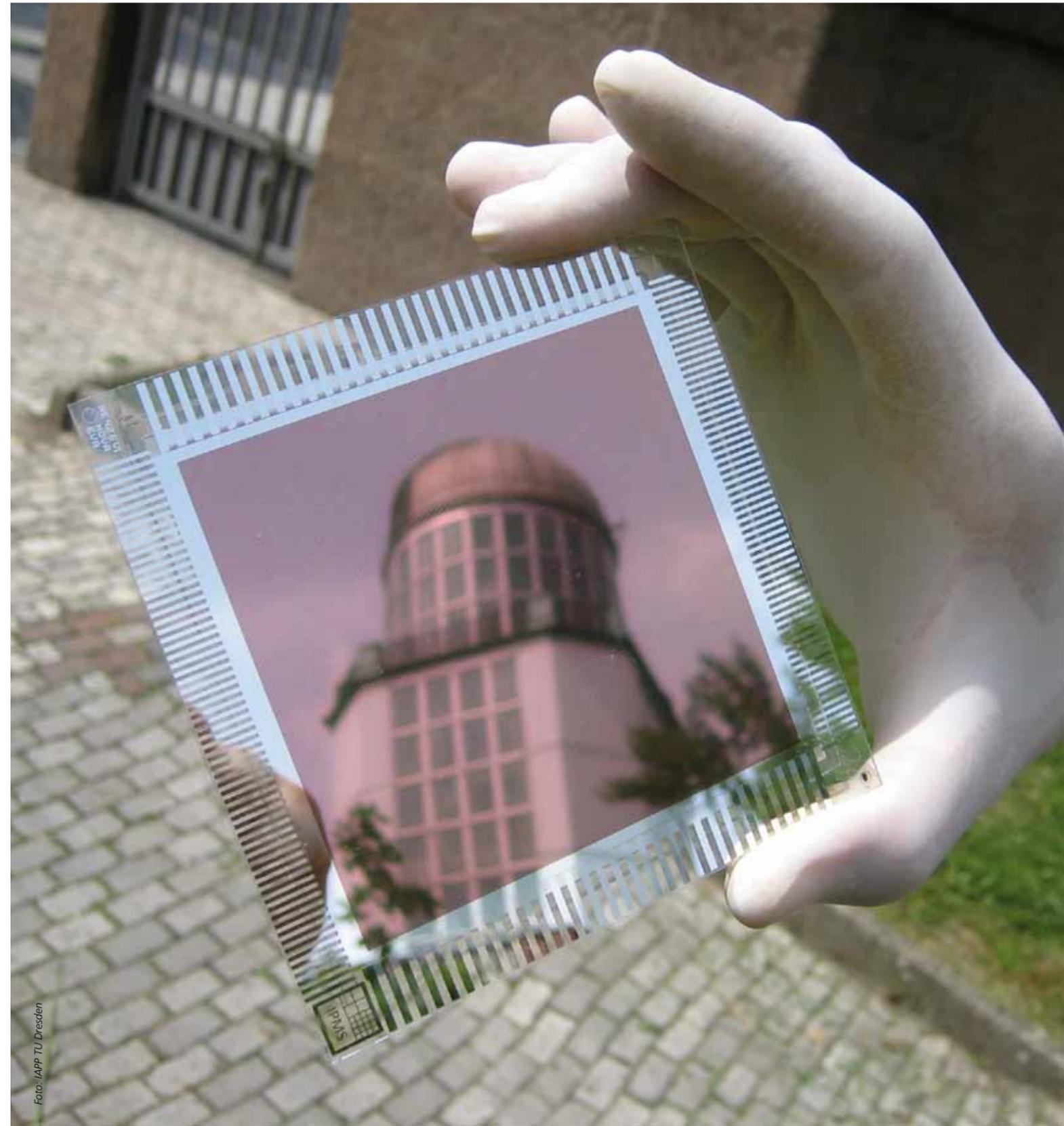
Doch bis die organische Fotovoltaik ihr Potenzial ausspielen kann, sind noch erhebliche Forschungsanstrengungen notwendig. Um Grundlagen für weitere gezielte

Entwicklungen zu schaffen, hat die Deutsche Forschungsgemeinschaft im Jahr 2007 ein interdisziplinäres Schwerpunktprogramm zum Thema „Elementarprozesse der Organischen Fotovoltaik“ aufgelegt, in dem Wissenschaftler aus knapp 40 Einrichtungen in ganz Deutschland gemeinsam forschen. Dieses Forschungsprogramm soll insbesondere dabei helfen, das in ungewöhnlichem Maße interdisziplinäre Forschungsgebiet über die Grenzen zahlreicher Fachgebiete wie der Chemie, der Physik, den Materialwissenschaften und der Elektrotechnik hinweg zu stärken und fundamentale Fragen zu klären. Ziel ist, die Entwicklung effektiver und langlebiger Solarzellen auf der Basis organischer Halbleiter zu beschleunigen.

Was passiert in einer organischen Solarzelle denn nun genau? Und wie wird aus Sonnenlicht Strom? Eigentlich dürften organische Solarzellen nicht wirklich gut funktionieren – zumindest aus physikalischer Sicht. Während die klassische Fotovoltaik mit anorganischen Halbleitern arbeitet, um aus Licht Strom zu gewinnen, wird diese Aufgabe im Falle der organischen Solarzellen von lichtabsorbierenden organischen Molekülen übernommen. Organische Solarzellen bestehen aus sehr dünnen Schichten dieser Moleküle.

Zwischen einer transparenten und einer meist nicht-transparenten Elektrode befindet sich die lichtabsorbierende Schicht, die je nach Konzept noch von Ladungsträgertransporterschichten umgeben ist. Die ganze Struktur inklusive der Elektroden misst deutlich weniger als ein tausendstel Millimeter und ist somit ungefähr 500-mal dünner als ein menschliches Haar.

Der große Vorteil organischer Solarzellen liegt in ihrer Flexibilität und in dem geringen Materialaufwand.



Fällt Licht auf ein photoaktives Molekül, werden negativ geladene Elektronen auf höhere Energieniveaus gehoben. Das aber ist erst die halbe Miete, denn das angeregte Elektron bleibt erst einmal an das gleichzeitig entstandene Loch gebunden und kann das Molekül nicht verlassen. Somit gibt es zunächst keinen Stromfluss. Hier findet sich der grundlegende Unterschied in der Funktionsweise von anorganischen und organischen Solarzellen: In anorganischen Solarzellen werden unter Bestrahlung mit Licht direkt freie Elektronen und Löcher erzeugt. In einer organischen Solarzelle hingegen müssen Elektronen und Löcher erst noch voneinander getrennt und in einen Zustand gebracht werden, in dem sie frei beweglich sind.

Dabei wird ein sogenannter Heteroübergang an der Grenzfläche zwischen zwei unterschiedlichen

Materialien genutzt. Sobald ein Elektron-Loch-Paar so eine Grenzfläche erreicht, wirkt diese als Trennfläche. Bei einer geeigneten Kombination zweier Materialien, wenn etwa das eine Material die Elektronen stärker anzieht als das andere, wechselt das Elektron die Seite und das Loch bleibt zurück. Der Strom kann fließen.

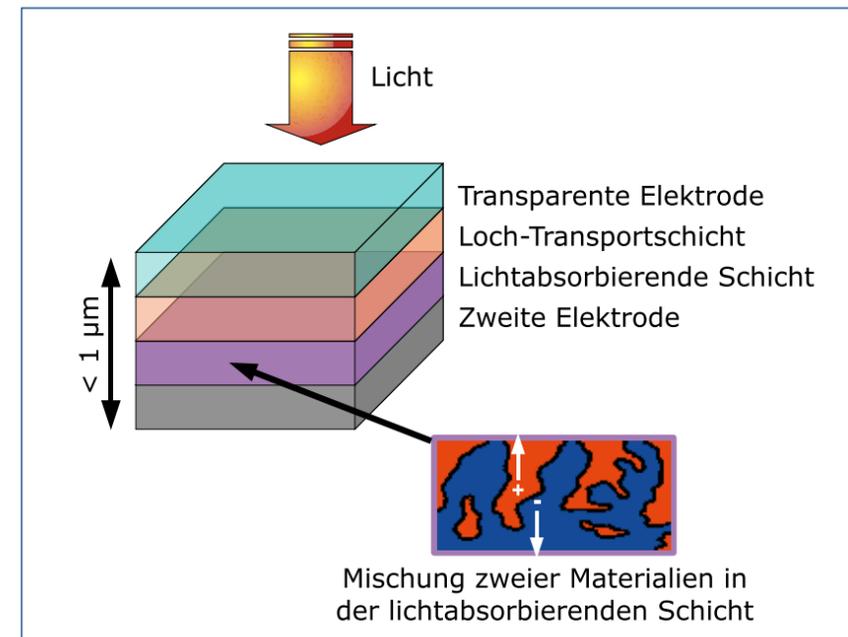
Auch wenn das einfach klingt, im Detail gibt es noch viele Fragen zu den grundlegenden Prozessen: Der Dreh- und Angelpunkt ist zunächst die chemische Synthese. Anders als bei Siliziumsolarzellen, bei denen man es im Prinzip mit einem einzigen Element zu tun hat, bietet die organische Chemie eine unglaublich große Vielfalt. Täglich synthetisieren die Chemiker in den Forschungslaboren neue Moleküle oder verändern sie gezielt in Ab-

sprache mit Physikern, die anschließend die physikalischen Prozesse untersuchen. Diese Substanzen und ihre Strukturen bieten oft einen sehr ästhetischen Anblick und erinnern dabei unter anderem an Fußbälle (Fullerene), lange Ketten (Polymere) oder Äste (Dendrimere).

Geeignete Moleküle zu finden und herzustellen, ist aber erst der Anfang. Die Materialien für die verschiedenen Schichten müssen in vielen Aspekten gut zusammenpassen, damit Elektronen und Löcher tatsächlich getrennt und abgeleitet werden können.

Erstens muss die photoaktive Schicht genügend Licht einfangen können, das heißt, es müssen möglichst viele Elektron-Loch-Paare gebildet werden. Dazu bedarf es

Schrittmacher: Eine organische Solarzelle setzt einen Propeller in Bewegung.



Schematischer Schichtaufbau einer organischen Solarzelle

sowohl sehr stark absorbierender Materialien als auch transparenter Materialien für die Transportschichten und für die Elektroden, damit diese kein Licht wegschlucken.

Zweitens müssen sich die Stoffe gut aufbringen lassen, das heißt verdampfbare oder lösliche. Die Schichten sollten dabei möglichst eben werden. Und es müssen Mittel und Wege gefunden werden, dass möglichst viele Grenzflächen für eine effektive Trennung des Elektronen-Loch-Paares in der photoaktiven Schicht entstehen. Entscheidend dabei ist, dass die Trennung nur dann stattfinden kann, wenn das Paar möglichst schnell eine nahe gelegene Grenzfläche findet.

Drittens müssen Elektronen und Löcher auch wirklich zu ihren jeweiligen Elektroden abgeleitet werden. Das ist eine große Herausforderung für den Herstellungsprozess. Um immer eine trennende Grenzfläche in der Nähe zu haben, werden die zwei Materialien in der

absorbierenden Schicht meist gemischt. Dennoch sind durchgängige Pfade notwendig: Die Phasen sollten keine „Sackgassen“, sondern eher lange „Tunnel“ bis zur jeweiligen Elektrode bilden. Sonst finden Elektron und Loch wieder zusammen und es entsteht Wärme statt Strom. Theoretische Betrachtungen sagen für eine einfache organische Solarzelle Effizienzen von über zehn Prozent voraus, wenn man zwei Solarzellen stapelt von über 15 Prozent. So können trotz der komplexen Prozesse recht gute Wirkungsgrade erwartet werden.

Und schließlich ist eine der für die praktische Anwendung wichtigsten Fragen die nach der Lebensdauer der Solarzelle. Die Kraft des Sonnenlichts ist nämlich nicht nur in der Lage, Elektronen anzuregen, sondern auch die Moleküle zu zerstören, ganz ähnlich einem Sonnenbrand. Die Folge ist eine abnehmende Leistungsfähigkeit der Solarzelle, wobei in letzter Zeit

von ermutigenden Ergebnissen mit Lebensdauern von über zehn Jahren berichtet wurde. Wenn nun alle Prozesse effektiv und stabil ablaufen, arbeitet die Solarzelle lange und mit einem hohen Wirkungsgrad.

Trotz aller noch zu meisternden Herausforderungen bieten organische Solarzellen also insgesamt sehr sonnige Aussichten!



Prof. Dr. Karl Leo (oben) ist Leiter des Instituts für Angewandte Photophysik (IAPP) an der TU Dresden und Koordinator des DFG-Schwerpunktprogramms 1355.

Dr. Annette Polte und **Dr. Moritz Riede** sind wissenschaftliche Mitarbeiter am IAPP.

Adresse:
Institut für Angewandte Photophysik
Technische Universität Dresden
01062 Dresden
E-Mail: karl.leo@iapp.de

DFG-Förderung im Rahmen des Schwerpunktprogramms SPP 1355

► „Elementarprozesse der Organischen Fotovoltaik“

www.spp1355.de



Rembert Unterstell

Auf der Suche nach „Miss World Energiemais“

Nachwachsende Ressourcen: Mais ist für die Erzeugung von Biogas bestens geeignet. Doch wie kann eine Sorte geschaffen werden, die möglichst viel Biomasse und hohe Methanausbeute verspricht? Die moderne Züchtungsforschung gibt Antworten.

Kommt ein wichtiger Teil des Energiemix der Zukunft vom Acker? Verfechter der Bioenergie, die zum Beispiel aus Raps, Mais, Zuckerrübe, Reis oder Holz gewonnen wird, werden das mit Blick auf Fortschritte in der Biomassen-Nutzung bejahen. Skeptiker, die der „grünen Energie“ distanziert oder abwartend gegenüberstehen, werden die Frage mit Hinweis auf die bisherige Kraftstoff-, Wärme- und Strom-Ausbeute verneinen. Auch harte Zahlen sprechen nicht für sich: Fünf Prozent des Primärenergiebedarfs in Deutschland werden nach aktuellen Angaben des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit von Biodiesel, Bioethanol und Biogas gedeckt, was, je nach Blickwinkel, als hoffnungsvolle oder desillusionierende Nachricht verstanden wird.

Sicher ist: Die Erzeugung von Bioenergie ist im Vormarsch. In den letzten Jahren sind in der Bundesrepublik etwa 4.000 kleine und mittelgroße Anlagen entstanden, die aus Mais, Getreide, Grasilage und Gülle Biogas erzeugen, bilanziert die Fördergemeinschaft Nachhaltige Landwirtschaft. 2010 sollen weitere 1.000 Anlagen hinzukommen. Beflügelt wird die Ent-

wicklung durch das 2000 von der Bundesregierung in Kraft gesetzte „Erneuerbare-Energie-Gesetz“, das den „Energiewirten“ die Vergütung und Abnahme des erzeugten Biogases über Jahre hinweg subventi-



Züchtungsforscher Albrecht E. Melchinger zeigt die reiche Biodiversität anhand von Maiskolben aus Landrassen (unten) sowie Inzuchtlinien und Hybriden (oben).

oniert und sicherstellt. Und auch in Europa sind die Weichen in Richtung erneuerbarer Ressourcen ge-

stellt: Bis 2020 sollen 20 Prozent der Endenergie aus Sonne, Wind- und Wasserkraft, Erdwärme und nicht zuletzt aus Biomasse stammen. Darauf verständigten sich die Staaten der Europäischen Union mit ihrer Richtlinie zu den erneuerbaren Energien vom April 2009.

So politisch erwünscht und öffentlich akzeptiert Bioenergie-Alternativen sind, so weit entfernt sind sie in der Praxis von einer wirtschaftlichen Nutzung im industriellen Maßstab. Tastende Pilotprojekte geben im „Innovations- und Forschungsfeld Biomasse“ den Ton an. Forscher und potenzielle Nutzer setzen dabei auf unterschiedliche Rohstoff-Substrate – von Holzpellets über Reis- bis zu Maispflanzen –, um das jeweilige (Energie-) Potenzial für Biogasanlagen auszutesten. Ein Beispiel dafür ist der Energiemais.

Was den Mais als Energiepflanze empfiehlt? Der Mais (wissenschaftlich *Zea mays*) ist eine der ältesten und wichtigsten Kulturpflanzen der Erde; nach Anbaufläche sogar die inzwischen am weitesten verbreitete Nutzpflanze. Er wirft hohe Hektarerträge ab und kann mit einer bewährten und effizienten Agrar-



Foto: Unterstell

*Links: Anzucht von Maispflanzen im Gewächshaus zur Gewinnung von Blattmaterial für die genomische Selektion
Mitte: Isolierung des weiblichen Blütenstands zur Durchführung von Kreuzungen
Unten: Durch wiederholte Selbstbestäubung erzeugte Filialgenerationen zur Entwicklung reinerbiger Inzuchtlinien*



technik geerntet werden. Weitere Vorteile sind die gute Konservierbarkeit und Lagerfähigkeit als Maissilage – auch deshalb wird Mais gerne als Substrat für Biogasanlagen eingesetzt. Unter den Nutzpflanzen ist der Mais zusammen mit dem Reis darüber hinaus am besten erforscht, „gewissermaßen ein Paraderpferd in der Nutzpflanzenforschung“, so Prof. Dr. Albrecht E. Melchinger vom Institut für Pflanzenzüchtung, Saatgutforschung und Populationsgenetik der Universität Hohenheim.

Auf rund 2,11 Millionen Hektar ist 2009 in Deutschland Mais angebaut worden. 20 Prozent der Maisanbaufläche entfallen nach aktuellen Zahlen des Deutschen Maiskomitees auf den Energiemais – mit stark steigender Tendenz. Dabei können, weiß Albrecht Melchinger, Professor für Angewandte Genetik und Pflanzenzüchtung, 150 bis 180 dt/Hektar Mais geerntet werden (1 Dezitonne = 100 kg). Doch wie kann der Ertrag so gesteigert werden, fragt der Züchtungsforscher, „dass 300 dt/Hektar erzielt werden?“

Wenn der Mais-Spezialist einen „Ertragssprung“ um fast das Doppelte mittelfristig für möglich hält, treten gleich drei anzuvisierende Ziele in seinen Forscherblick: erstens der Mehrertrag bei der Biomasse, zweitens das Mehr beim Trocken-



Fotos: Inst. für Pflanzenzüchtung/Uni-Hohenheim



Isoliertüte über dem männlichen Blütenstand zum Sammeln von Pollen

substanzgehalt und schließlich die Optimierung der Methanausbeute. Letztere ist das Entscheidende bei der Biogasgewinnung. Denn was Biogas zu einem Energieträger macht, ist sein Gehalt an Methan, das im sogenannten Fermenter einer Biogasanlage durch Vergärung gewonnen wird.

Die Schlüsselfrage: Wie kann eine Maissorte gezüchtet werden, die ein Maximum an Biomasse produziert und ein Optimum an Methanausbeute liefert? Melchinger versteht das Forschungsanliegen weitaus charmanter zu formulieren: „Wie sieht die Miss World beim Energiemais aus?“, fragt er. Mithilfe des 2007 gestarteten Großprojekts GABI-Energy sollten auf die virulente Frage neue, im

Wortsinn wegweisende Antworten gefunden werden. Arbeitsgruppen an den Universitäten Hohenheim, Düsseldorf und Potsdam sowie des Max-Planck-Instituts für Molekulare Pflanzenphysiologie, Potsdam-Golm, und des „Züchterhauses KWS Saat AG“ in Einbeck waren daran beteiligt.

GABI steht für „Genomanalyse im biologischen System Pflanze“ und ist verbunden mit Feldversuchen auf einer Fläche von mehr als 40.000 Quadratmetern und auf über 5.000 Parzellen pro Jahr. Dabei arbeiteten die Forscher mit Maismaterial aus der ganzen Welt und nahmen insgesamt 900 Genotypen detailliert unter die Lupe. Mit aufwendigen DNA-Analysen konnte schrittweise eingekreist werden, welcher Mais-Genotyp am meisten Biomasse produziert und welcher Genotyp aufgrund seiner analysierten Inhaltsstoffe den höchsten Methanertrag verspricht. Um sich möglichst schnell einer rohstoff-

und energieeffizienten Maissorte zu nähern, so resümiert Melchinger, sei eine „wissensbasierte Züchtung“ erforderlich. Damit spricht er einer Forschungsrichtung das Wort, die sich die Einsichten und Methoden der modernen Genomforschung für die angewandte Pflanzenzüchtung zunutze macht.

Das Mais-Genom ist bemerkenswert: Es enthält zehn Chromosomen und mehr als 32.000 Gene – das sind mehr als der Mensch (20.000 bis 25.000) besitzt. Erst im November 2009 gelang einem internationalen Forscherteam um Professor Richard Wilson von der Washington University in St. Louis, US-Staat Missouri, das vollständige Genom des Mais zu entziffern. Das Besondere, ja Aufsehenerregende ist, dass es zu 85 Prozent aus „springenden Genen“ besteht, was auch erklären könnte, warum die Maispflanze so enorm anpassungsfähig und vielseitig ist.

Ernte von Energiemais-Versuchspflanzen mit einem Parzellenhäcksler



Fotos: Inst. für Pflanzenzüchtung/Uni-Hohenheim



Oben: Die Mehrleistung der F_1 -Hybride (mittlere Kolben) gegenüber den elterlichen Inzuchtlinien basiert auf dem Phänomen der Heterosis.



Der Energiemais von morgen kann ohne Genomanalysen und ohne die Erkenntnisse der modernen Züchtungsforschung weder identifiziert noch produziert werden. Der Grundlagenforschung fällt eine wichtige Entwicklungsaufgabe zu – auch beim tieferen Verständnis von Zuchtphänomenen. Von einem „faszinierenden Phänomen“ spricht Melchinger, als er das vor ihm auf dem Tisch stehende Modell beschreibt: Vier senkrecht nebeneinander stehende Maiskolben; die beiden Mittleren übertreffen nach Höhe und Umfang die anderen – sie sind erstaunlicherweise die Nachkommen der beiden äußeren Kolben und werden von Pflanzenzüchtern als Hybride oder Bastarde bezeichnet. „Das faszinierende Phänomen, dem die Wüchsigkeit zu verdanken ist, heißt Heterosis“, erklärt Melchinger, „das ist, wissenschaftlich betrachtet, die Mehrleistung der Hybriden über das Mittel ihrer Eltern“.

Für Außenstehende ist es ein Bild, das staunen lässt: die besonders kräftigen und ertragreichen Hybriden, hervorgegangen aus der Mischehe der durch Inzucht degenerierte Eltern. Die Möglichkeiten der Hybridzüchtung sind seit 100 Jahren bekannt, sie werden in der Landwirtschaft gezielt und erfolgreich genutzt, etwa beim Mais, bei Zuckerrüben- und Tomaten-Pflanzen. Doch die dahinter stehenden Mechanismen und Ursachen waren unbekannt, ja rätselhaft.

Die genetischen und molekularen Grundlagen besser zu verstehen, war das Ziel des DFG-Schwerpunktprogramms „Heterosis bei Pflanzen“. Melchinger, Sprecher der zwischen

Probe aus dem gehäckselten Erntegut einer Versuchspartizelle



Mit Kleinfermentern wird die Biogasausbeute von Maisproben nach dem Hohenheimer Biogasttest (HBT) in einem Brutschrank erfasst.

2004 und 2009 durchgeführten Studien, bilanziert: „Nachdem sich schon länger die Suche nach einem einzelnen Heterosis-Gen als wissenschaftliche Sackgasse erwiesen hatte, konnten unsere Untersuchungen zeigen, dass die Gene als interagierendes System zu Heterosis führen, wobei das Gesamtsystem mehr ist als die Summe seiner Teile.“

Dank biomathematischer Modelle und neuer Computersoftware können solche komplexen Systeme teilweise am Bildschirm simuliert und zukünftig auch verlässlich vorhergesagt werden. In der Anwendung hält Melchinger „bei vielen Kulturpflanzen Ertragssteigerungen um 30 bis 50 Prozent für möglich – und das ohne Gentechnik“. Dabei wird auf die natürliche Genvariabilität gesetzt, zum Beispiel beim Mais. Für die Züchtung von Energiemais verspricht die wissenschaftliche Hybridzüchtung Mehrertrag – mehr Biomasse und

mehr Methanausbeute. Übrigens ist Heterosis bei dieser Nutzpflanze besonders ausgeprägt. Von den neuen Einsichten wird die Mais-Züchtung profitieren.

Das Zuchtziel „Ertrag“ ist beim Körner- und Energiemais-Anbau erwünscht. Doch könnte es längerfristig einen Interessenkonflikt zwischen der Bekämpfung des Welthungers und der Gewinnung nachwachsender Ressourcen geben? Schließlich sind die landwirtschaftlichen Nutzflächen deutschland- und weltweit begrenzt. Die ethische Debatte um „Tisch oder Tank“, die im Zusammenhang mit der Biodiesel-Produktion angestoßen wurde, wird fortgesetzt.

Die Frage im Sinne einer Entweder-Oder-Alternative stelle sich derzeit nicht, unterstreicht Züchtungsexperte Melchinger aus seiner Sicht, müsse aber dann neu aufgegriffen werden, „wenn sich der Flächenbedarf für Energiepflanzen dramatisch erhöhen sollte“. Hinzu kommt

das Problem, dass intensiv bewirtschaftete Monokulturen, wie sich in den USA und andernorts gezeigt hat, häufig mit unliebsamen, weil umweltbelastenden Auswirkungen für Landschaften und Lebensräume verbunden sind.

Absehbar ist: Der Anteil der klimafreundlich gewonnenen Energie aus Biomasse wird sich weiter erhöhen. Dabei wird schrittweise das Nutzungspotenzial konkurrierender Energiepflanzen sichtbar werden, wobei es noch breiter Forschungsanstrengungen und, was die Anwendung betrifft, überzeugender Rentabilitäts Erfahrungen bedarf. Gut möglich, dass der Mais im Energiemix der Zukunft eine wichtige Option bieten wird – jedenfalls dann, wenn es in absehbarer Zeit gelingt, eine energieeffiziente Maissorte zu züchten und die Maispflanzen auf den Feldern buchstäblich schnell Früchte tragen.



Dr. Rembert Unterstell ist Chef vom Dienst der forschung SPEZIAL.

Weitere Informationen zum beschriebenen Forschungsprojekt unter:

www.uni-hohenheim.de/1597.html?typo3state=allProjects&person=1279
www.maiskomitee.de/web/intranetNews.aspx

Stefan Pischinger und Martin Mütter

Der Bio-Sprit der nächsten Generation

Kraftstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen sind ökologisch attraktiv, haben aber einen geringen Wirkungsgrad und konkurrieren mit der Nahrungsmittelproduktion. Im Rahmen der Exzellenzinitiative arbeiten Aachener Forscher an neuen Gemischen, in denen das Pflanzenmaterial in maßgeschneiderte Kraftstoffkomponenten umgewandelt wird.

Die Energieversorgungssicherheit steht aufgrund der endlichen Reichweite der fossilen Energiereserven im Blickfeld des öffentlichen Interesses. Verstärkt wird dies durch den gleichzeitig steigenden Energiebedarf der sogenannten „Emerging Markets“, Ländern wie China und Indien. Der Exzellenzcluster „Maßgeschneiderte Kraftstoffe aus Biomasse“ (Tailor-Made Fuels from Biomass, TMFB) an der RWTH Aachen University wurde 2007 im Rahmen der Exzellenzinitiative eingerichtet, um neue, auf Biomasse basierende Kraftstoffe für den Einsatz in mobilen Anwendungen zu erforschen. Dazu haben sich 21 Institute der RWTH sowie zwei externe Einrichtungen (Fraunhofer-Institut für Molekularbiologie und Angewandte Ökologie, Aachen, und Max-Planck-Institut für Kohlenforschung, Mülheim/Ruhr) aus den Bereichen Biologie, Chemie, Verfahrenstechnik und Verbrennungstechnik im „Fuel Design Center“ zusammengeschlossen. Das langfristige Ziel dieses Exzellenzclusters ist die Bestimmung einer optimalen Kombination von Kraftstoffkomponenten, deren Eigenschaften sich von den Anforderungen zukünftiger Verbrennungsprozesse ableiten.

Die bislang industriell genutzten Verfahren zur Kraftstoffgewinnung aus Biomasse liefern die sogenannten Biokraftstoffe der ersten Generation. Um diese herzustellen, werden Pflanzenöle zu Biodiesel oder Stärke sowie Zucker zu Bioethanol verarbeitet. Der Anbau von Feldfrüchten zur Kraftstoffgewinnung steht jedoch in direkter Konkurrenz zur Herstellung von Nahrungs- und

Pflanzliches Material wie Gräser, Stängel oder Holz besteht aus Lignozellulose. Dabei handelt es sich um ein komplexes Kompositmaterial der drei Biopolymere Zellulose, Hemizellulose und Lignin. Zellulose ist ein Polymer aus einzelnen Glucoseeinheiten, das lange lineare Stränge bildet. Sie sind das Grundgerüst aller Pflanzenfasern. Hemizellulose ist ebenfalls ein Polymer

Die Entwicklung neuer Kraftstoffe bei gleichzeitiger nachhaltiger Nutzung von nachwachsenden Ressourcen erweist sich als ein Forschungsfeld mit hohem interdisziplinärem Forschungsbedarf an der Schnittstelle von Natur- und Ingenieurwissenschaften.

Futterpflanzen. Zudem werden nur die Früchte und Samen der Pflanzen verwertet. Zur Steigerung des Flächenertrages beinhalten zukünftige, nachhaltige Konzepte die vollständige Verwertung von Pflanzen, die nicht zur Nahrungsversorgung dienen.

aus Kohlenhydraten, wobei sowohl C5- als auch C6-Zucker eingebaut sind und Verzweigungen vorliegen. Lignin ist nicht aus Zuckern aufgebaut, sondern aus aromatischen Molekülen, die unregelmäßig miteinander auf verschiedenste Weise verknüpft sind. Aufgrund seiner



Foto: Winandy

komplexen Struktur und wegen seiner hohen Stabilität sind der Aufschluss und die chemische Verarbeitung des Lignins herausfordernd. Die Ligninpolymere erstrecken sich zwischen den Zellulosesträngen und sorgen so für die nötige Stabilität der Gerüstteile Zellulose und Hemizellulose.

Verfahren, die Lignozellulose nutzen, liefern die Biokraftstoffe der zweiten Generation und befinden sich derzeit noch im Stadium der technischen Erprobung. Im „Biomass-to-Liquid“-Verfahren werden die hochkomplexen Strukturen des Pflanzenmaterials bei sehr hohen Temperaturen in ein Gemisch aus Kohlenmonoxid und Wasserstoff (Synthesegas) zerlegt.

Das Synthesegas wird an Katalysatoren in längererkettige Kohlenwasserstoffe umgewandelt (Fischer-Tropsch-Synthese), die direkt als Kraftstoffe genutzt oder in Raffinerieprozessen weiter verarbeitet werden können.

Bislang kaum erforscht ist der Ansatz, die Syntheseleistung der Natur zu nutzen und die Biopolymere nur so weit umzuwandeln und zu modifizieren, wie es für die Nutzung als Kraftstoff notwendig ist. Die Lignozellulose muss zunächst in ihre Komponenten Zellulose, Hemizellulose und Lignin zerlegt werden. Da das pflanzliche Material, zum Beispiel Holz, jedoch durch seine Struktur gegen äußere Einflüsse geschützt ist, kann es zur Trennung der Komponenten nicht in Wasser oder sonsti-

Im Labor des Instituts für Technische und Makromolekulare Chemie an der RWTH Aachen: Natur- und Ingenieurwissenschaftlerinnen und -wissenschaftler arbeiten im Cluster „Maßgeschneiderte Kraftstoffe aus Biomasse“ eng zusammen.

gen geläufigen Lösungsmitteln gelöst werden. Für den Aufschluss können alternative Reaktionsmedien wie beispielsweise ionische Flüssigkeiten genutzt werden. Ionische Flüssigkeiten sind Verbindungen, die – wie unter anderem auch Kochsalz – aus positiv und negativ geladenen Ionen aufgebaut sind, jedoch aufgrund ihrer molekularen Struktur einen Schmelzpunkt unterhalb von 100°C aufweisen. In verschiedenen katalytischen Umwandlungsverfahren können die einzelnen Komponen-

ten anschließend in die gewünschten Kraftstoffmoleküle überführt werden.

Eng verbunden mit der Kraftstoffherstellung ist die Weiter- oder Neuentwicklung von Motorenkonzepten mit verbesserten Leistungs- und Emissionsmerkmalen. Biokraftstoffe der ersten und zweiten Generation bilden die Eigenschaften konventioneller Otto- und Dieselmotoren nach, sodass nur geringe Anpassungen am Motor notwendig sind. Zur Nutzung des gesamten Verbesserungspotenzials hinsichtlich der Emissionen und des Verbrauchs können die Eigenschaften der im Exzellenzcluster erforschten Kraftstoffe deutlich von denen herkömmlicher Kraftstoffe abweichen. Dies macht die Erforschung neuer Verbrennungskonzepte erforderlich. Die gleichzeitige Optimierung von Kraftstoffherstellung und Verbrennung im Motor ist daher Ziel des Exzellenzclusters.

Mit einer Hochdruckkammer untersuchen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler die unterschiedlichen Verbrennungseigenschaften von Kraftstoffen aus Biomasse.



Die Eigenschaften eines Kraftstoffes werden durch dessen Molekülstruktur bestimmt. Zu diesen Kraftstoffeigenschaften zählen die Cetanzahl als Maß für Zündwilligkeit, das Siedeverhalten, der Sauerstoffgehalt und die Dichte. Ziel der verbrennungstechnischen Untersuchungen ist es daher, die Eigenschaften eines Kraftstoffes auf seine Molekülstruktur zurückzuführen. Zur Bestimmung der idealen Kraftstoffeigenschaften wurden beispielsweise für die selbstzündende Verbrennung im Dieselmotor experimentelle Untersuchungen im Stoßwellenrohr (Bestimmung der Zündverzugszeiten), im Einzylinder-Diesel-Forschungsmotor (Bestimmung des Wirkungsgrades und des Emissionsverhaltens) sowie in einer eigens angeschafften Hochdruckverbrennungskammer (Bestimmung des Einspritzverhaltens) durchgeführt. Dabei wurde der Ein-

fluss unterschiedlicher Kraftstoffeigenschaften auf die Verbrennung im Motor untersucht. Nach einer Definition vorteilhafter Kraftstoffeigenschaften kann so die passende Molekülstruktur bestimmt werden.

Die Zündwilligkeit eines Kraftstoffes korreliert direkt mit dem Zündverzug eines Kraftstoffes im Motor. Dieser beschreibt die Zeit zwischen Kraftstoffeinspritzung und der Selbstzündung durch hohe Temperaturen und Drücke im Brennraum infolge der Kompression. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass im Hinblick auf möglichst geringe Ruß-Emissionen ein möglichst langer Zündverzug vorteilhaft ist. Ruß wird vor allem in unterstöchiometrischen Gemischzonen gebildet, also in Bereichen, in denen nicht ausreichend Sauerstoff für die Verbrennung zur Verfügung steht. Der längere Zündverzug führt zu einer besseren Vermischung von Luft und Kraftstoff, was durch eine homogenere Verbrennung schließlich zu einer Reduktion der Ruß-Emissionen führt. Im Dieselmotor sind also Kraftstoffe mit einer geringeren Zündwilligkeit (abgesenkte Cetanzahl) vorteilhaft. Probleme eines homogenen Dieselmotors sind die prinzipbedingten Geräusch-Emissionen und die Kontrolle des Verbrennungsprozesses.

Konventionelle Kraftstoffe sind praktisch sauerstofffrei. Ein Sauerstoffgehalt im Kraftstoff kann jedoch zu einer weiteren Reduktion der Ruß-Emissionen beitragen. Experimentelle Untersuchungen mit sauerstoffhaltigen Kraftstoffen wie Rapsmethylester (Biodiesel) und 1-Decanol (ein langkettiger Alkohol) zeigen verglichen mit Diesel ein Rußminderungspotenzial von bis zu 90 Prozent. Die meisten der heuti-



Nachhaltige Mobilität durch Biomasse: Kraftstoff aus Holz als Alternative zum Diesel

gen und zukünftigen Biokraftstoffe enthalten Sauerstoff, da Biomasse bereits über einen Sauerstoffgehalt von 40 bis 45 Prozent verfügt. Nachteilig wirkt sich bei sauerstoffhaltigen Kraftstoffen jedoch der geringere Heizwert (Energieinhalt pro Volumen) aus, welcher zu einem höheren volumetrischen Kraftstoffverbrauch führt. Die experimentellen Ergebnisse haben gezeigt, dass ein Sauerstoffgehalt von etwa 20 Prozent einen guten Kompromiss zwischen Energieinhalt und Rußminderungspotenzial darstellt.

Mit Butyllävulinat, einer veresterten Lävulinsäure, wurde ein erster Kraftstoff identifiziert, der bereits heute zu großen Teilen aus Biomasse hergestellt werden kann und der grundlegende Anforderungen des Verbrennungsmotors

erfüllt. Wegen der hohen Siedetemperatur von 230°C eignet sich Butyllävulinat insbesondere für den Einsatz im Dieselmotor. Jedoch zeigt der reine Kraftstoff keine ausreichenden Selbstzündfähigkeiten, wie sie für den dieselmotorischen Verbrennungsprozess erforderlich sind. Daher wurde das Butyllävulinat mit dem sehr zündwilligen Alkan n-Tetradecan gemischt, um so die notwendige Zündwilligkeit zu erreichen. Sowohl Ruß- als auch die Stickoxid-Emissionen können in weiten Bereichen der Teillast nahezu vollständig vermieden werden. Ohne Einbußen im Wirkungsgrad in Kauf nehmen zu müssen, ist es damit gelungen, die Schadstoffemissionen des Dieselmotors signifikant zu senken.

Sowohl auf den Gebieten der Kraftstoffherstellung als auch der

Verbrennung besteht nach wie vor erheblicher Forschungsbedarf. So bereitet beispielsweise die Materialverträglichkeit mit den heute im Verbrennungsmotor eingesetzten Dichtungsmaterialien große Probleme. An dieser und weiteren Fragestellungen arbeiten die insgesamt über 60 Forscherinnen und Forscher des Exzellenzclusters „Maßgeschneiderte Kraftstoffe aus Biomasse“, um eines Tages einen wichtigen Beitrag zum Umwelt- und Klimaschutz sowie zur zukünftigen Energieversorgung leisten zu können.



Prof. Dr.-Ing. Stefan Pischinger

ist Lehrstuhlinhaber für Verbrennungskraftmaschinen und Sprecher des Exzellenzclusters „Maßgeschneiderte Kraftstoffe aus Biomasse“ an der RWTH Aachen.

Dipl.-Ing. Martin Mütter

ist Geschäftsführer des Exzellenzclusters „Maßgeschneiderte Kraftstoffe aus Biomasse“ an der RWTH Aachen.

Adresse:
Fuel Design Center
c/o Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen (VKA)
RWTH Aachen
Schinkelstraße 8, 52062 Aachen

E-Mail: office@vka.rwth-aachen.de
E-Mail: muether@vka.rwth-aachen.de

DFG-Förderung im Rahmen des Exzellenzclusters EXC 236

► „Maßgeschneiderte Kraftstoffe aus Biomasse“

www.fuelcenter.rwth-aachen.de

Margret Wohlfahrt-Mehrens

Mit dem Akku auf die Überholspur

Transportketten rund um den Globus, Fernreisen übers Wochenende, Berufspendler im Dauerstau: Ungebremste Mobilität trägt erheblich zu schrumpfenden Ölreserven und steigender Erderwärmung bei. Elektroantriebe könnten die Räder viel ressourcen- und umweltschonender rollen lassen – nur müssen dafür ihre eigenen Energiespeicher leistungsfähiger werden. Optimierte Lithium-Ionen-Batterien sind hier die Hoffnungsträger.



Der steigende Treibstoffbedarf für den Personen- und Güterverkehr hat einen wesentlichen Anteil am Verbrauch der knapper werdenden Rohölreserven und am Kohlendioxid-Ausstoß in die Atmosphäre. Zusätzlich bewirken die Fahrzeugabgase insbesondere in Ballungsräumen eine hohe lokale Belastung durch Luftschadstoffe. Dennoch wird der Mobilitätsbedarf in Wirtschaft und Gesellschaft weiter wachsen, und das weltweit und rasant.

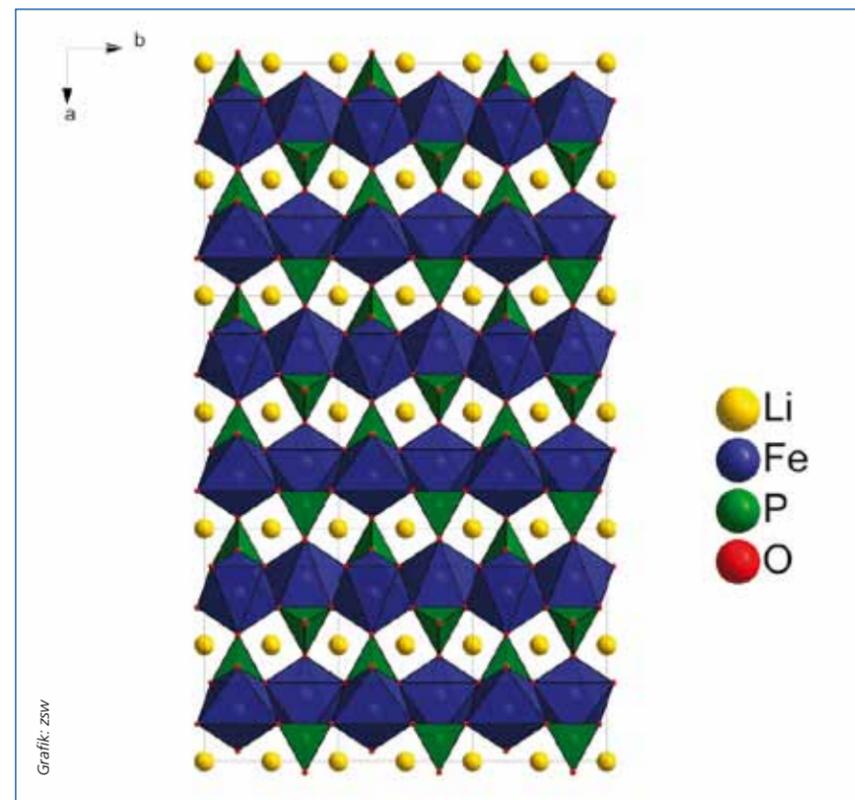
Vor diesem Hintergrund ist die Weiterentwicklung der Elektromobilität, das heißt die zunehmende Elektrifizierung des Antriebstrangs bis hin zum reinen Batteriefahrzeug, eine Schlüsseltechnologie für die Sicherstellung einer zukünftigen nachhaltigen Mobilität. Die

Vorteile liegen dabei auf der Hand: Elektroantriebe haben einen sehr hohen Wirkungsgrad, sind geräusch- und emissionsarm und ermöglichen die Rückgewinnung von Bremsenergie. Und: Ihr Energiebedarf kann aus erneuerbaren Energien gedeckt werden.

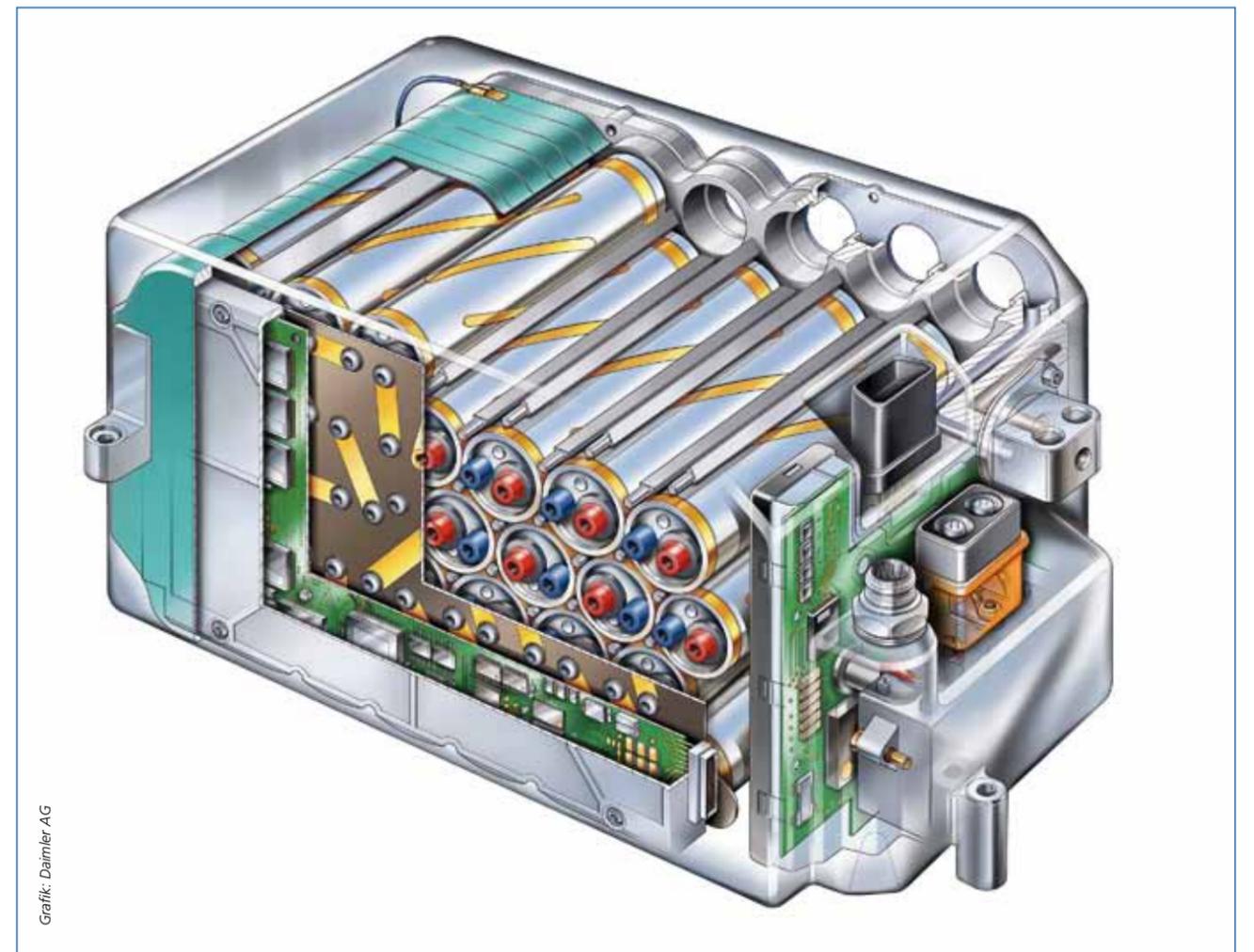
Schlüsselkomponente alternativer Fahrzeugkonzepte ist das elektrochemische Speichersystem. Lithium-Ionen-Batterien sind sehr attraktive Kandidaten für diese Anwendungen. Sie arbeiten in einem Spannungsbereich von vier Volt und weisen deutlich höhere Energie- und Leistungsdichten als andere heute verfügbare Technologien wie Blei- oder Nickel/Metallhydridakkumulatoren auf. Die Eigenschaften der Lithium-Ionen-Batterien lassen sich im

Gegensatz zu herkömmlichen Batterietechnologien durch Variation der eingesetzten Materialien sowohl für Hochleistungs- als auch für Hochenergieanwendungen optimieren. Stand der Technik sind große Lithium-Ionen-Zellen mit spezifischen Energieinhalten von 100 Wh/kg bis 150 Wh/kg bei einem Kilowattstunden-Preis von circa 1.000 Euro für das Gesamtsystem. Für reine Batteriefahrzeuge lassen sich damit nur Stadtfahrzeuge mit elektrischen Reichweiten von ungefähr 150 Kilometern realisieren. Eine Alternative sind Hybridantriebe, die die Vorteile von Verbrennungsmotoren – vor allem ihre hohe Reichweite – mit denen des Elektroantriebs – hoher Wirkungsgrad, emissionsfreies Fahren in der Stadt, Rückgewinnung von Bremsenergie – verknüpfen. Die Konzepte reichen von Mikro- und Mild-Hybriden mit reiner Start-Stop-Funktion bis hin zu Plug-in-Hybriden mit begrenzter elektrischer Reichweite für den Stadtverkehr.

Grundaufbau eines Lithium-Ionen-Batterie-Elektrodenmaterials: Die Lithium-Ionen (gelb) in den Kanälen sind frei beweglich und werden beim Laden und Entladen in die Wirtsgitter aus- beziehungsweise eingelagert. Lithium-Eisen-Phosphat-Verbindungen (LiFePO₄) haben eine recht hohe Energiedichte, preiswerte Rohstoffe und gute Stabilität.



Lithium-Ionen-Batterien funktionieren nach einem zunächst simpel anmutenden Grundprinzip. Dieses beruht auf der Verwendung zweier Elektroden – die Negative und die Positive –, die Lithium reversibel einlagern können. Das schnelle und reversible Einbringen von Lithium-Ionen in das Wirtsgitter von Metalloxiden und Kohlenstoffen ist der Schlüssel zu den herausragenden Eigenschaften dieser Batterie. Die Negative besteht in der Regel aus einem Kohlenstoffmaterial, die Positive aus einem Lithium-Übergangsmetalloxid (kommerziell LiCoO₂). Während des Ladens wandern die Lithiumionen aus dem Oxidgitter heraus und werden in den Kohlenstoff eingelagert. Beim Entladevorgang findet der umgekehrte Vorgang statt. Die beiden Elektroden werden elektrisch durch einen mit Elektrolyt gefüllten Separator voneinander getrennt.



Grafik: Daimler AG

Doch dieser elektrochemische Prozess ist nur auf den ersten Blick sehr einfach. Tatsächlich müssen Elektrodenmaterialien und Elektrolyt sehr sorgfältig aufeinander abgestimmt werden, da der Elektrolyt nur kinetisch stabil ist, was zu unerwünschten Zersetzungsreaktionen führen kann. Diese Nebenreaktionen führen sowohl zum Verlust an Aktivmaterial als auch zum Verbrauch von Elektrolyten und damit zu einer Reduzierung der Lebensdauer sowie aufgrund der Entstehung brennbarer gasförmiger Nebenprodukte auch zu einem Sicherheitsrisiko. Durch geeignete Anpassung des Elektrolyten lassen sich diese Zersetzungsreaktionen minimieren.

Energiedichte, Leistung, Lebensdauer und Sicherheit von Lithium-Ionen-Batterien werden wesentlich durch die Materialauswahl und die Materialkombination bestimmt. Um die Energiedichte heute verfügbarer Lithium-Ionen-Batterien weiter zu erhöhen, gibt es prinzipiell zwei Möglichkeiten: zum einen den Ersatz von Graphit beziehungsweise Lithiumkobaltoxid durch alternative, höherkapazitive und nach Möglichkeit preiswertere Elektrodenmaterialien – zum anderen die Erhöhung der Zellspannung von heute circa vier Volt auf etwa fünf Volt durch Entwicklung neuer positiver Aktivmaterialien und oxidationsstabilerer Elektrolytsysteme. Idealerweise werden beide Ansätze miteinander kombiniert.

Aufbau eines Batteriemoduls für Hybridfahrzeuge, die die Vorteile von Elektroantrieben und Verbrennungsmotoren verbinden

Bei den Negativen konzentriert sich die Materialforschung auf die Erschließung von Lithiumlegierungen auf der Basis von Zinn oder Silizium. Silizium kann bis zu 4,4 Lithium pro Silizium aufnehmen, was einer zehnfach höheren theoretischen Kapazität im Vergleich zu Kohlenstoff entspricht. Leider ist der Lade-/Entladevorgang mit sehr großen Volumenänderungen verbunden, was zu mechanischem Stress in der Elektrode und damit verbunden zu einer ungenügenden Zyklenstabilität

führt. Die Entwicklung nanostrukturierter oder mesoporöser Komposite ist ein vielversprechender Ansatz, um die Lebensdauer signifikant zu verbessern.

Für Hochleistungsanwendungen sind Negative auf der Basis von Titanoxiden attraktive Kandidaten. Die theoretische Kapazität und die Zellspannung sind zwar verglichen zu Graphit deutlich geringer, was zu einer niedrigeren theoretischen Energiedichte führt. Dafür zeichnen sich diese Materialien durch hohe thermische Stabilität und Sicherheit, sehr lange Lebensdauer und sehr gute Schnellladefähigkeit aus. Die elektrochemischen Eigenschaften hängen sensitiv von der Partikelmorphologie ab, weswegen sich die Forschung auf upscalebare Syntheseprozesse für die Herstellung nanostrukturierter oder nanopartikulärer Pulver konzentriert.

Bei den Positiven liegt der Fokus der Forschung aus Kosten- und Sicherheitsgründen auf dem Ersatz von Lithiumkobaltoxid durch Mangan- oder Eisen-basierte Aktivmaterialien. Neben manganreichen Oxiden gelten Materialien mit Olivinstruktur als interessante Materialklasse. Verbindungen wie Lithiumeisenphosphat (LiFePO_4) oder Lithiummanganphosphat (LiMnPO_4) zeichnen sich durch exzellente thermische und chemische Stabilität aus, was eine höhere Sicherheit bei Überladung gewährleistet. Zudem erfüllen diese Materialien die Anforderungen an Verfügbarkeit und Wirtschaftlichkeit der Rohstoffe. Ein Nachteil ist die geringe elektronische und ionische Leitfähigkeit, die in der Struktur des Materials begründet liegt. Neuere Entwicklungen

haben gezeigt, dass Nanostrukturierung und Beschichtung der Partikel mit leitfähigen Kohlenstoffen diesen Nachteil kompensieren können. Lithiumeisenphosphat wird bereits kommerziell in Hochleistungsbatterien eingesetzt.

Diese erfolgreichen Ansätze eröffnen neue Perspektiven für die Erschließung weiterer Verbindungsklassen wie zum Beispiel Silikate oder Borate, die bisher wegen ihrer schlechten elektronischen Leitfähigkeit nicht als potenzielle Batteriematerialien in Betracht gezogen wurden.

Neben der Verwendung neuer Elektrodenmaterialien ist die Entwicklung optimierter Elektrolytsysteme eine Grundvoraussetzung für die Weiterentwicklung von Hochleistungs-Lithium-

Im Labor: Für die Herstellung von Testzellen müssen äußerst empfindliche Materialien unter Argonschutzgas verarbeitet werden.



Foto: zsw



Foto: Tesla Motors

Der Tesla-Roadster ist das erste reine Batteriefahrzeug, das in Serie produziert wird. Sein Energiespeicher besteht aus mehr als 6.800 Lithium-Ionen-Akkus.

Batterien. Wesentliche Anforderungen sind die Steigerung der thermischen und elektrochemischen Stabilität und höhere Sicherheit. Sowohl die Langzeitstabilität als auch die Sicherheit der Zelle hängen kritisch von der Beschaffenheit der Grenzfläche Elektrode/Elektrolyt ab. Degradationsprozesse an den Grenzflächen beschränken die Zyklen- und Kalenderlebensdauer. Die Erforschung optimierter Elektrolytsysteme und die Entwicklung umfassender Analysemethoden zur Charakterisierung der Grenzfläche Elektrode/Elektrolyt sind daher wichtige Voraussetzungen für die effiziente Weiterentwicklung langlebiger Speichersysteme.

Die Vielfalt an in Entwicklung befindlicher Materialien und der zukünftige Einsatz optimal aufeinander abgestimmter Kombinationen von Elektroden-, Elektrolyt- und Zellmaterialien bieten noch erhebliche Potenziale sowohl für die Leistungssteigerung als auch in Bezug auf Lebensdauer und Sicherheit von Lithium-Ionen-Batterien. Die Umsetzung erfordert allerdings einen ganzheitlichen Ansatz in der For-

schung, um die Wechselwirkungen der Einzelkomponenten miteinander frühzeitig berücksichtigen zu können. Durch die kontinuierliche Weiterentwicklung von Lithium-Ionen-Batterien lässt sich die Energiedichte in den nächsten Jahren voraussichtlich um bis zu 50 Prozent steigern. Eine Kostenreduktion ist im Wesentlichen durch die Etablierung optimierter, automatisierter Fertigungsverfahren von der Materialsynthese bis hin zum Batteriesystem zu erreichen.

Weitere signifikante Steigerungen der Energiedichten erfordern völlig neue Material- und Batteriekonzepte. Insertionsreaktionen sind normalerweise auf einen Ladungstransfer von einem Elektron pro Übergangsmetall begrenzt, was die maximal erreichbare spezifische Energie der klassischen Lithium-Ionen-Batterie begrenzt. Die Entwicklung neuer Energiespeichersysteme mit deutlich höherer spezifischer Energie benötigt die Nutzbarmachung von Konversionsreaktionen, die den Umsatz von zwei und mehr Elektro-

nen pro Formeleinheit erlauben. Aus der Grundlagenforschung sind bereits eine Reihe potenzieller Kandidaten bekannt, die theoretisch spezifische Energien von mehr als 1.000 Wh/kg ermöglichen würden. Wiederaufladbare Metall/Luftsysteme (Zn/O_2 , Li/O_2) oder Lithium/Schwefel-Batterien gehören ebenfalls zu den potenziellen Hochenergiesystemen.

Es bedarf jedoch erheblicher weiterer und langfristiger Forschungsanstrengungen, um die noch bestehenden Probleme dieser Systeme zu lösen. Nur eine langfristig angelegte, interdisziplinär ausgerichtete Forschung bietet die Chance, innovative Konzepte für zukünftige Hochenergie-Batterie-Generationen zu entwickeln.



Dr. Margret Wohlfahrt-Mehrens ist Fachgebietsleiterin Materialien und Akkumulatoren-Materialentwicklung am Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (zsw).

Adresse:
Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg
Helmholtzstraße 8, 89081 Ulm
E-Mail: margret.wohlfahrt-mehrens@zsw-bw.de

DFG-Förderung im Rahmen der Forschergruppe PAK 177

► „Funktionsmaterialien und Materialanalytik zu Lithium-Hochleistungsbatterien“

und des Schwerpunktprogramms SPP 1181

► „Nanoskalige anorganische Materialien durch molekulares Design: Neue Werkstoffe für zukunftsweisende Technologie“

www.zsw-bw.de

Christian Rehtanz

Auf intelligenten Wegen in die Steckdose

Sie verbinden die Kraftwerke über den ganzen Kontinent, liefern den Strom an die Kunden, sind Marktplatz und Integrationsplattform für erneuerbare Energien: Elektrische Netze müssen immer komplexere Anforderungen erfüllen. Modernste Verfahren und Technologien sichern die Überwachung und Steuerung der Systeme.



Das europäische Stromnetz reicht von Polen bis Portugal und von Griechenland bis Skandinavien. Der größte Teil davon ist synchron verbunden, das heißt, die Turbinen und Generatoren aller angeschlossenen Kraftwerke drehen sich im

Gleichtakt. Daher finden wir an jeder Steckdose in Europa dieselbe Frequenz von 50 Hertz vor. In jeder Sekunde muss genau so viel Energie in das System eingespeist werden, wie die Kunden entnehmen. Jede Windböe auf eine Windkraftanlage

Eine Quelle von vielen: Windkraftanlagen im Binnenland

und jede zugeschaltete Herdplatte müssen sofort ausgeregelt werden. Die erzeugte elektrische Energie von 2.300 Terawattstunden pro



Jahr versorgt mehr als 450 Millionen Haushalte in Europa. Die elektrische Leistung des Gesamtsystems beträgt hierbei 350 Gigawatt. Dieser Wert entspricht der Antriebsleistung von circa 3.000 Großflugzeugen des Typs Airbus A380, die rund um die Uhr tagein tagaus betrieben werden. Alle Änderungen des Energieversorgungssystems können nur im laufenden Betrieb vorgenommen werden, denn schließlich soll der elektrische Strom niemals ausfallen.

Neben der Betriebssicherheit sind gleichermaßen Aspekte der Umweltfreundlichkeit und der Wirtschaftlichkeit zu beachten. Der Strom muss für uns alle bezahlbar bleiben, aber die Umwelt darf nicht über Gebühr strapaziert werden. Wenn wir Windenergie aus der Nordsee nutzen wollen, dann benötigen wir auch die Leitungen, die

diese Energie zu den Lastzentren in Mittel- und Süddeutschland transportieren. Darüber hinaus erfordert die schwankende Windeinspeisung eine hohe Flexibilität der Netze. Ausgefeilte Überwachungs- und Steuerungsmethoden müssen helfen, das dynamisch belastete Netz zu führen und eine maximale Übertragungskapazität bei möglichst geringem Netzausbau zu ermöglichen. Hierzu sind vielfältige Forschungsansätze zu verfolgen.

Ein Beispiel aus der Forschung zur Netzüberwachung sind sogenannte zeitsynchronisierte Zeigmessgeräte (engl. Phasor Measurement Units, PMU). An verteilten Orten im europäischen Stromnetz werden elektrische Spannungen und Ströme gemessen. Durch Signale von GPS-Satelliten syn-

Verlegung des ersten Hochspannungsgleichstromkabels zur Anbindung des Offshore-Windparks BorWin in der Nordsee an das Festlandnetz

chronisiert, erfolgen diese Messungen weitestgehend zeitgleich. Die Messungen werden durch eine schnelle Weitbereichskommunikation zu zentralen Datenkonzentratoren übermittelt. Hierdurch ist es erstmalig möglich, die Messwerte direkt zu vergleichen und dynamische Vorgänge im Stromnetz in Echtzeit zu beobachten. Schwankungen zwischen den Kraftwerken und Stabilitätsprobleme können frühzeitig erkannt werden.

Herausforderungen für die Forschung bestehen darin, die Messwerte robust und mit hoher Genauigkeit zu erheben sowie die Messwerte europaweit geeignet

weiterzuverarbeiten, um für den Netzbetrieb nutzbare Informationen zu gewinnen. Aufgrund dieser Informationen können die physikalischen Grenzen der Netze besser erfasst werden. Die gewonnenen Erkenntnisse bilden letztendlich die Basis für einen Systemschutz, der verhindert, dass sich Störungen einzelner Betriebsmittel, wie Fehler auf Leitungen, ausbreiten und zum Versorgungsausfall von großen Regionen führen.

Durch diese Forschung kann das elektrische Energieübertragungsnetz in Europa deutlich sicherer betrieben werden. Und die Wahrscheinlichkeit, dass Blackouts auftreten, wird verringert.

Bei der Netzüberwachung laufen europaweit in den Netzleitzentralen jeweils Hunderttausende von Messwerten ein, die elektronisch

verarbeitet werden müssen. Die sogenannte Leittechnik der Energienetze, die diese Verarbeitung vornimmt, ist eng mit der Informations- und Kommunikationstechnik verknüpft.

Die neuesten Trends aus diesen Bereichen müssen für die Energietechnik erschlossen werden. Hierbei ist insbesondere die gegenseitige Abhängigkeit der Systeme zu beachten. Eine sichere Stromversorgung ist eine Grundvoraussetzung für die heutigen Informations- und Kommunikationsnetze. Mobilfunknetze oder das Internet funktionieren nur bei einer gesicherten Stromversorgung. Möchte man diese Technologien für die Leittechnik von Stromnetzen nutzen, dann muss dafür gesorgt werden, dass auch bei Stromausfällen die Informations- und Kommunikationssysteme ausreichend lange funktionieren, bis die

Stromversorgung wieder hergestellt ist. Auch Sicherheitsfragestellungen sind von besonderer Wichtigkeit, da die elektrische Energieversorgung zu den wesentlichen kritischen Infrastrukturen der jeweiligen Länder zählt. Mit dieser interdisziplinären Forschung wird die Innovation aus den Bereichen Energietechnik und Informations- und Kommunikationstechnik verknüpft, sodass die Energieversorgung effizienter und sicherer betrieben werden kann.

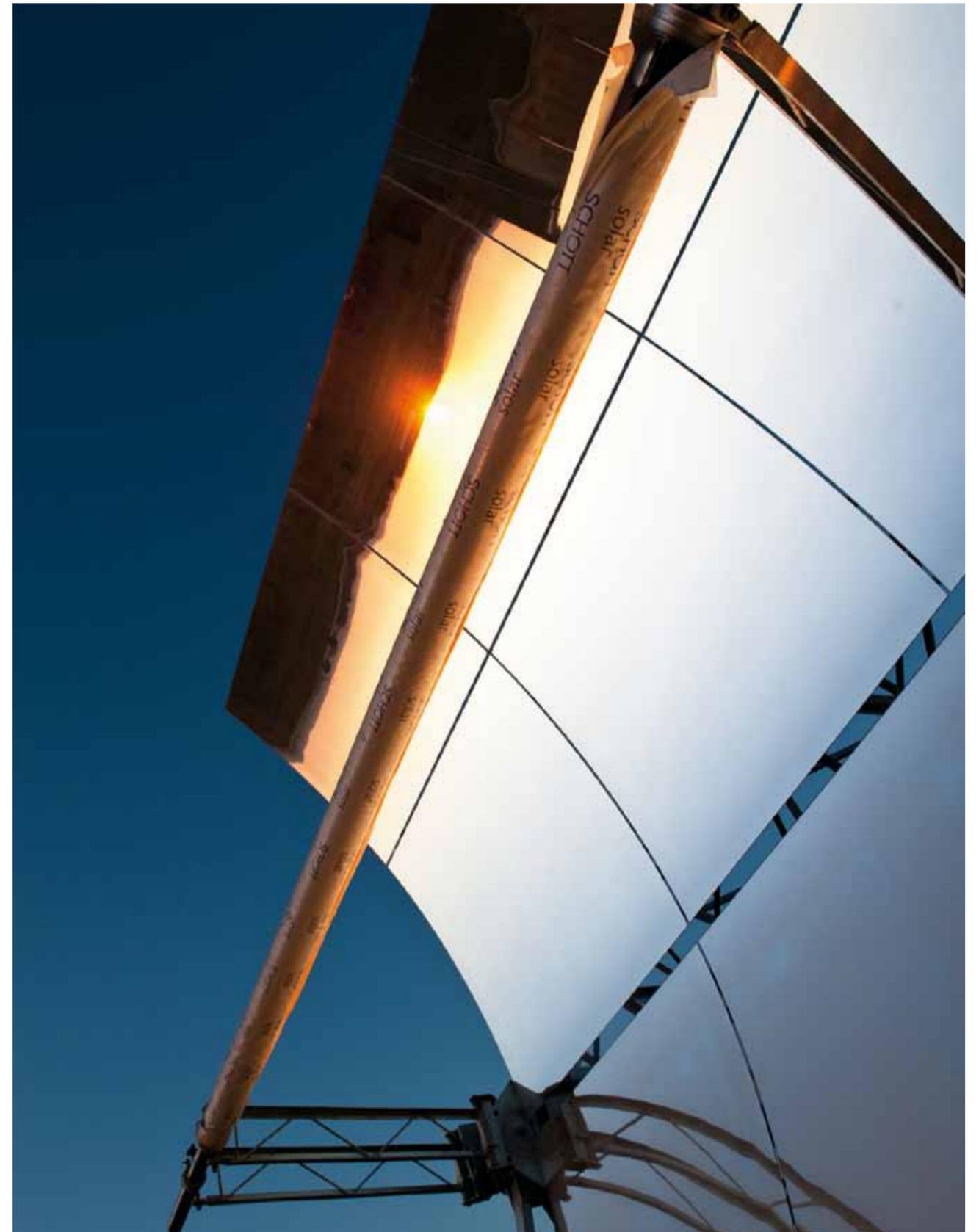
Neben der europaweiten Betrachtung im Großen spielt zunehmend auch die Energieversorgung im Kleinen eine Rolle. Kraft-Wärme-gekoppelte Anlagen, sprich: die stromerzeugenden Heizungen, sorgen zusammen mit Fotovoltaik-Anlagen für eine Stromerzeugung im Verteilnetzbereich. In ländlichen Regionen kommt noch eine Vielzahl von verteilten Windkraftanlagen hinzu. Um all diese Anlagen in das Netz einzubinden, ohne die Netze komplett neu zu bauen oder drastisch zu erweitern, bedarf es einer dezentralen Koordination zwischen Erzeugung und Verbrauch. Auch die Steuerung von Verbrauchern kann hierbei einen relevanten Beitrag liefern. Speziell neue Geräte wie Wärmepumpen oder insbesondere auch Elektrofahrzeuge sind in bestimmtem Maße steuerbar, das heißt, ihr Verbrauch ist zeitlich verschiebbar.

Möchte man nun diese vielfältigen Anlagen miteinander koordinieren, wird schnell klar, dass eine zentrale Lösung, die Tausende von Daten aus den Anlagen sammelt und hieraus optimale Betriebspunkte ermittelt, nicht zielführend ist. Vielmehr wird ein vollständig dezentraler Ansatz benötigt. Die neuesten Forschungen in diesem Bereich verwenden sogenannte

Netzleitwarte zur Steuerung und Überwachung eines Verteilnetzes



Parabolspiegel des solarthermischen Kraftwerks Solnova 1 im andalusischen Sanlúcar la Mayor nahe Sevilla





Multi-Agentensysteme. Ein Agent ist ein speziell entwickelter Algorithmus in der Steuerungssoftware der jeweiligen Anlage. Er sorgt dafür, dass die Anlage den zur Verfügung stehenden Strom möglichst wirtschaftlich nutzt. Primär wird der eigene Bedarf zum Beispiel eines Haushalts gedeckt und bei Überschuss wird versucht, naheliegenden Bedarf in der Nachbarschaft zu decken.

Die Agenten verhandeln dabei auf Grundlage wirtschaftlicher Mechanismen über die Kommunikationsnetze mit ihren jeweiligen Nachbarn im System. Die Angebots- und Nachfragepreise werden dynamisch angepasst, bis ein geeignetes Marktoptimum gefunden ist. Hierbei können unterschiedliche Anlagentypen wie Energiespeicher oder auch Elektrofahrzeuge berücksichtigt werden. Wenn es im Kontext sinnvoll erscheint, kann ein derartiges Fahrzeug mit lokal bereitgestelltem Ökostrom geladen werden. Erst wenn der Bedarf vor Ort nicht gedeckt wird, werden übergeordnete Netzebenen in Anspruch genommen.

Diese Forschungen machen es letztlich möglich, dass dezentrale Versorgungskonzepte effizient umgesetzt und erneuerbare Energien optimal in das Versorgungssystem eingebunden werden können.

Die Netze auf den unterschiedlichen Ebenen, von Verteilung bis Übertragung, bedürfen mit ihren Hunderttausenden von Komponenten einer steten Instandhaltung und

Teil eines Umrichters einer speziellen Hochspannungsgleichstromübertragung, wie sie zur Anbindung von Offshore-Windparks verwendet wird



Hochspannungsleistungsschalter bei der Hochspannungsprüfung

Erneuerung. Aufgrund der Lebenszeiten einzelner Betriebsmittel von 40 oder mehr Jahren müssen sehr lange Zeiträume überblickt werden. Eine Netzveränderung, die heute vorgenommen wird, muss auch in vielen Jahren noch der dann aktuellen Versorgungssituation gerecht werden. Die Instandhaltung und Erneuerung soll kostenoptimal erfolgen, aber keinesfalls zu einer Einschränkung der Betriebs- und Versorgungssicherheit sowie der Zuverlässigkeit führen. Die Aufgabe besteht somit darin, für einen bestimmten Zeitraum die Maßnahmen der Wartung, Instandhaltung und Erneuerung so zu planen und zeitlich zu staffeln, dass durch kosteneffiziente Aufwendungen, die nicht zu stark schwanken, ein optimiertes Netz für eine sich stetig verändernde Versorgungsaufgabe entsteht.

Die aktuelle Forschung in diesem Bereich hat zum Ziel, ein ganz-

heitliches Optimierungsverfahren zur Planung von Erhaltungs- und Investitionsmaßnahmen für elektrische Energieversorgungsnetze zu entwerfen. Dabei werden erstmalig die sich ständig wandelnden Rahmenbedingungen derart berücksichtigt, dass die Ergebnisse für die langfristige Planung robust gegenüber Planungsunsicherheiten und Risiken, wie etwa der Änderung der Versorgungsaufgabe, sind.

Grundsätzliche Methoden werden entwickelt, die eine Modellierung der technischen, wirtschaftlichen und regulatorischen Einflussgrößen geeignet miteinander verknüpfen. Dieses ist die Basis für eine Optimierung, die die mit Unsicherheit behafteten Risiken berücksichtigt und eine effiziente Zuordnung von Instandhaltungs-, Erneuerungs- und Erweiterungsmaßnahmen für einen langfristigen Planungshorizont realisiert. Insbesondere vor dem Hintergrund

der zunehmenden erneuerbaren Energien und der Verschiebung der Energieverwendung hin zum Stromsektor ist es wichtig, dass die Forschung dazu beiträgt, Netze frühzeitig zukunftsfähig zu planen und umzusetzen.

Die vorgestellten Beispiele der Energiesystemforschung führen zu flexiblen Verteilnetzen und zu einer verbesserten Koordination zwischen Erzeugern, Lasten und Speichern sowie zur Entwicklung von Übertragungsnetzen, die erneuerbare Energien unter anderem aus der Nordsee in die Lastzentren übermitteln. Dies trägt zum Ziel bei, eine umweltfreundliche, sichere und bezahlbare Energieversorgung zu erreichen.



Prof. Dr.-Ing. Christian Rehtanz
ist Lehrstuhlinhaber für Energiesysteme und Energiewirtschaft an der TU Dortmund.

Adresse:
Fakultät für Elektrotechnik
und Informationstechnik
TU Dortmund
Emil-Figge-Straße 70, 44227 Dortmund
E-Mail: christian.rehtanz@tu-dortmund.de

DFG-Förderung im Rahmen
der Einzelförderung

► „Risikooptimierte Instandhaltungs- und Ausbauplanung von elektrischen Energieversorgungssystemen unter Berücksichtigung von Planungsunsicherheiten (ROAM)“

www.esw.e-technik.tu-dortmund.de

Ferdinand Schüth

Die Gasometer von morgen

Regenerative Energie steht weder ständig noch gleichmäßig zur Verfügung – sie zu speichern, wird deshalb immer wichtiger. Solarthermische Kraftwerke, Metall-Luft-Batterien oder energiereiche chemische Verbindungen wie Methan bieten langfristig große Potenziale. Vorerst sind sie vor allem eine Herausforderung für die Forschung.

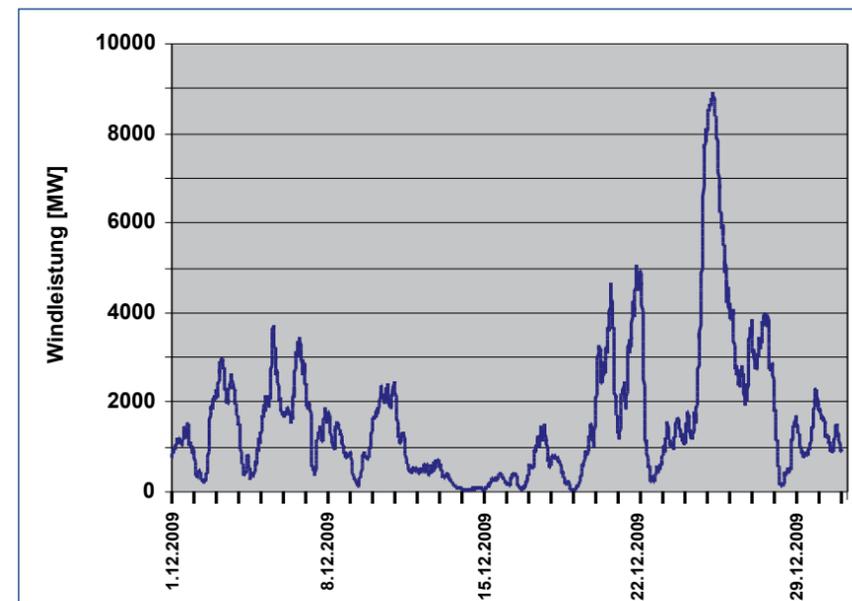
Angesichts zurückgehender Ölreserven und zunehmender Kohlendioxid (CO₂)-Konzentration in der Atmosphäre, die als eine wesentliche Ursache der Erderwärmung angesehen wird, steht die Menschheit vor der Herausforderung, die Energieversorgung auf eine neue Basis zu stellen. Wie auch immer unser zukünftiger Energiemix aussehen wird, der Anteil erneuerbarer Energien, wie Wind, Sonne oder Biomasse, wird in jedem Falle ansteigen. Dies stellt

unser Energiesystem vor neue Herausforderungen, denn die meisten Formen erneuerbarer Energie stehen nicht stetig bereit, sondern unterliegen starken Schwankungen. In der sogenannten Vattenfall-Regelzone zum Beispiel kann die ins Netz eingespeiste Windenergie innerhalb eines Monats zwischen Spitzenwerten von fast 9.000 Megawatt Leistung – das entspricht etwa sieben Kernkraftwerksblöcken – und fast gar keiner Leistung in Flautezeiten (siehe Grafik) schwanken. Die Schwan-

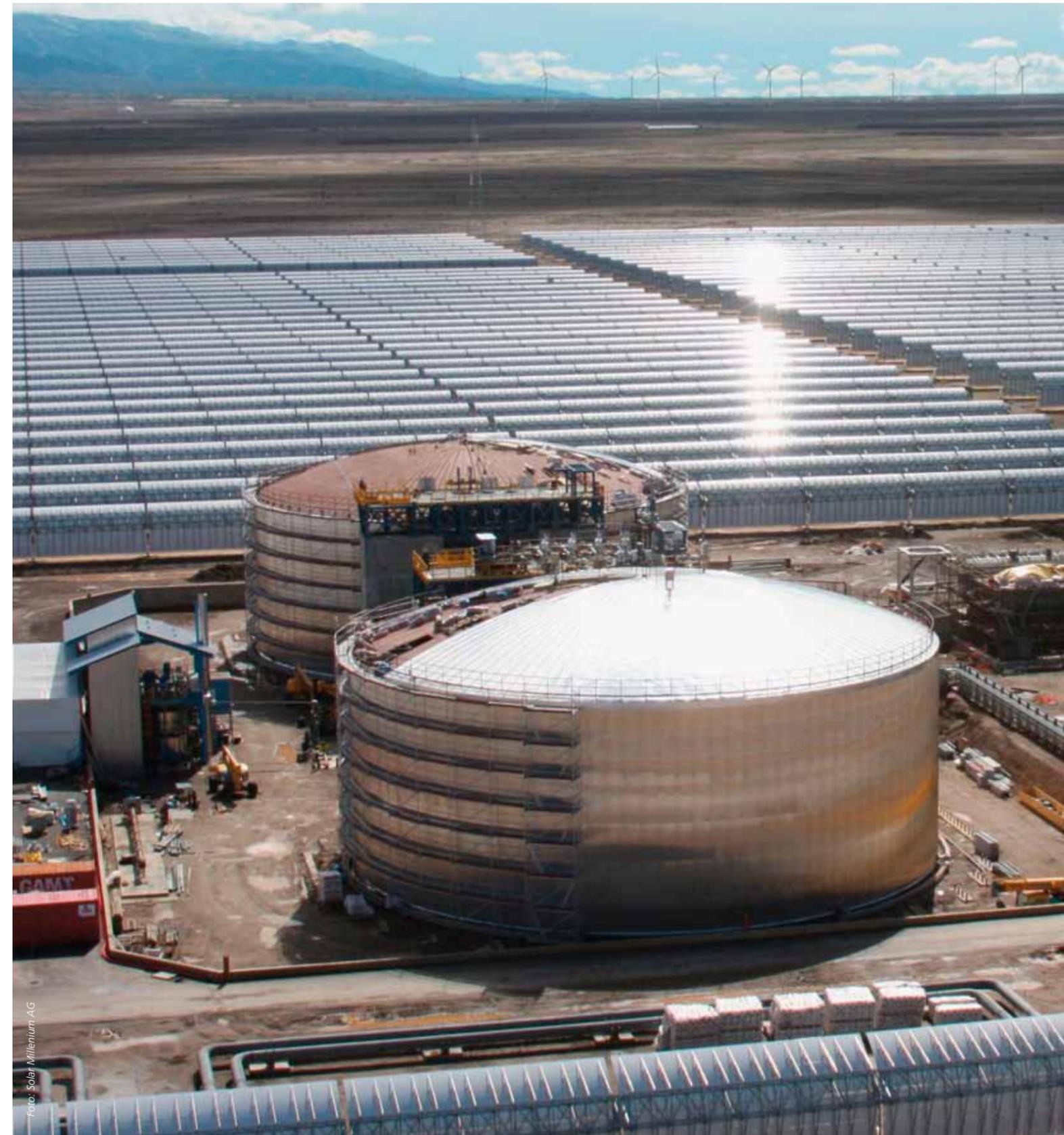
kungen zwischen Null und der vollen Leistung können dabei innerhalb weniger Stunden ablaufen.

Für die Zukunft wird geplant, solche Schwankungen durch geschickte Kopplung von solarer Energieerzeugung in Südeuropa und Nordafrika mit Windenergieerzeugung in Nordeuropa teilweise auszugleichen. Dazu ist aber ein gezielter Ausbau der Übertragungsnetze und eine ausgefeilte Regeltechnik erforderlich, die noch immer Herausforderungen an die Forschung stellt. Außerdem erscheint es derzeit noch nicht möglich, durch solche Methoden der intelligenten Netzsteuerung Angebot und Nachfrage nach elektrischer Energie vollständig auszubalancieren, weder über kurze Zeiträume noch über den saisonalen Verlauf.

Daher werden in zukünftigen Energiesystemen Speichertechnolo-



Rechts: Baustelle des ersten europäischen Solarkraftwerkes Andasol 1 in Andalusien. Im Vordergrund die thermischen Speicher mit einem Fassungsvermögen von 28.500 Tonnen Flüssigsalz. Mit ihnen können Kraftwerke zusätzlich circa 7,5 Stunden unter Volllast betrieben werden.



gien eine zentrale Rolle spielen, und zwar nicht nur für große Energiemengen. Speicher werden erforderlich werden für Zeiten zwischen Stunden und Monaten und für Energiemengen zwischen einigen zehn Kilowattstunden (kWh) und Terawattstunden (TWh). Dabei wird nicht eine Technik alle Probleme gleichermaßen gut lösen. Effizient und zu relativ geringen Kosten lässt sich Energie durch Pumpspeicherkraftwerke und Druckluftspeicher „einlagern“. Allerdings sind die Speicherkapazitäten, also die Energiemengen,

die sich in solchen Systemen speichern lassen, begrenzt. Für größere Energiemengen kommen eher Wärmespeicher, elektrochemische Speicher (Batterien) oder energiereiche chemische Verbindungen in Frage.

Lithium-Ionen-Batterien sind derzeit das vermutlich am intensivsten bearbeitete elektrochemische Speichersystem weltweit. Diese Art von Batterien befindet sich im Masseneinsatz in Laptops, Handys, Camcordern und anderen kleinen Elektrogeräten. Ein vom Speicher-

Die Hochtemperatur-Brennstoffzelle wandelt sehr effizient die unterschiedlichsten chemischen Energiespeicher in elektrische Energie um.



volumen her viel größeres Anwendungsfeld zeichnet sich aber im Bereich von Traktionsbatterien für Elektrofahrzeuge ab. Allerdings ist vor deren Masseneinsatz noch eine Vielzahl von Problemen zu lösen. Die Energiedichte der Systeme beispielsweise ist mit knapp 200 Wh/kg derzeit noch deutlich zu niedrig, um akzeptable Reichweiten mit reinem Batteriebetrieb zu erzielen.

Zur Erhöhung der Speicherdichte kann man grundsätzlich alle Komponenten einer Batterie leichter machen. Den größten Beitrag mit knapp 50 Prozent des Gewichtes am Gesamtgewicht der Batterie stellt das positive Elektrodenmaterial. Gelänge es, dieses Elektrodenmaterial durch eine leichtere Matrix zu ersetzen oder die erreichbare Spannung zu vergrößern, so könnte die Kapazität erhöht werden – was beim Elektrofahrzeug eine höhere Reichweite bedeuten würde. Aber auch die anderen Komponenten der Batterie, wie die negative Elektrode, die Separatormembran, der Elektrolyt und das Gehäuse, bieten noch Verbesserungspotenzial. Schließlich ist es auch erforderlich, Fertigungstechnologien zu entwickeln, mit denen in Massenproduktion Batterien mit um Größenordnungen höheren Speicherkapazitäten als von Laptops bekannt aufgebaut werden können.

Auf diesem hochkompetitiven Forschungsfeld gibt es eine Reihe von der DFG geförderter Projekte. In einem Paketantrag „Funktionsmaterialien und Materialanalytik zu Lithium-Hochleistungsbatterien“ werden sowohl neue Elektrodenmaterialien als auch Elektrolyte entwickelt. Außerdem werden die für die Funktion einer solchen Batterie kritischen Transportvorgänge untersucht, ein Gebiet, in dem die Forschung in Deutschland eine

Tanken aus der Steckdose: Mit dem Elektromobil sauber in die Zukunft



lange Tradition hat. Dieses Problem, insbesondere der Transport der Lithium-Ionen im Festkörper, steht auch im Zentrum der Forschergruppe FOR 1277, die kürzlich eingerichtet wurde. Schließlich ist auch das Schwerpunktprogramm 1473 „Materials with New Design for Improved Lithium Ion Batteries“ ausgeschrieben, die Förderung der erfolgreichen Projekte beginnt Mitte 2010.

Allerdings sollte die Wissenschaft den Blick nicht nur auf solche Technologien richten, die nahe am technischen Einsatz sind. Auch wenn noch erhebliche Verbesserungen in der Speicherkapazität von Lithium-Ionen-Batterien erwartet werden können: Reichweiten, wie sie heute mit konventionellen Autos erreichbar sind, erscheinen mit dieser Technik nicht möglich. Daher sollte die Forschung den Blick wei-

ten und neben den Grundlagen der Ladungstransferprozesse auch solche Konzepte verfolgen, die potenziell deutlich höhere Speicherdichten ermöglichen, bisher aber noch kaum im Blickfeld der Industrie sind. Dies könnten etwa reversible Metall-Luft-Batterien sein, die erhebliche Potenziale aufweisen, auf der anderen Seite aber auch große Herausforderungen an die Wissenschaft stellen.

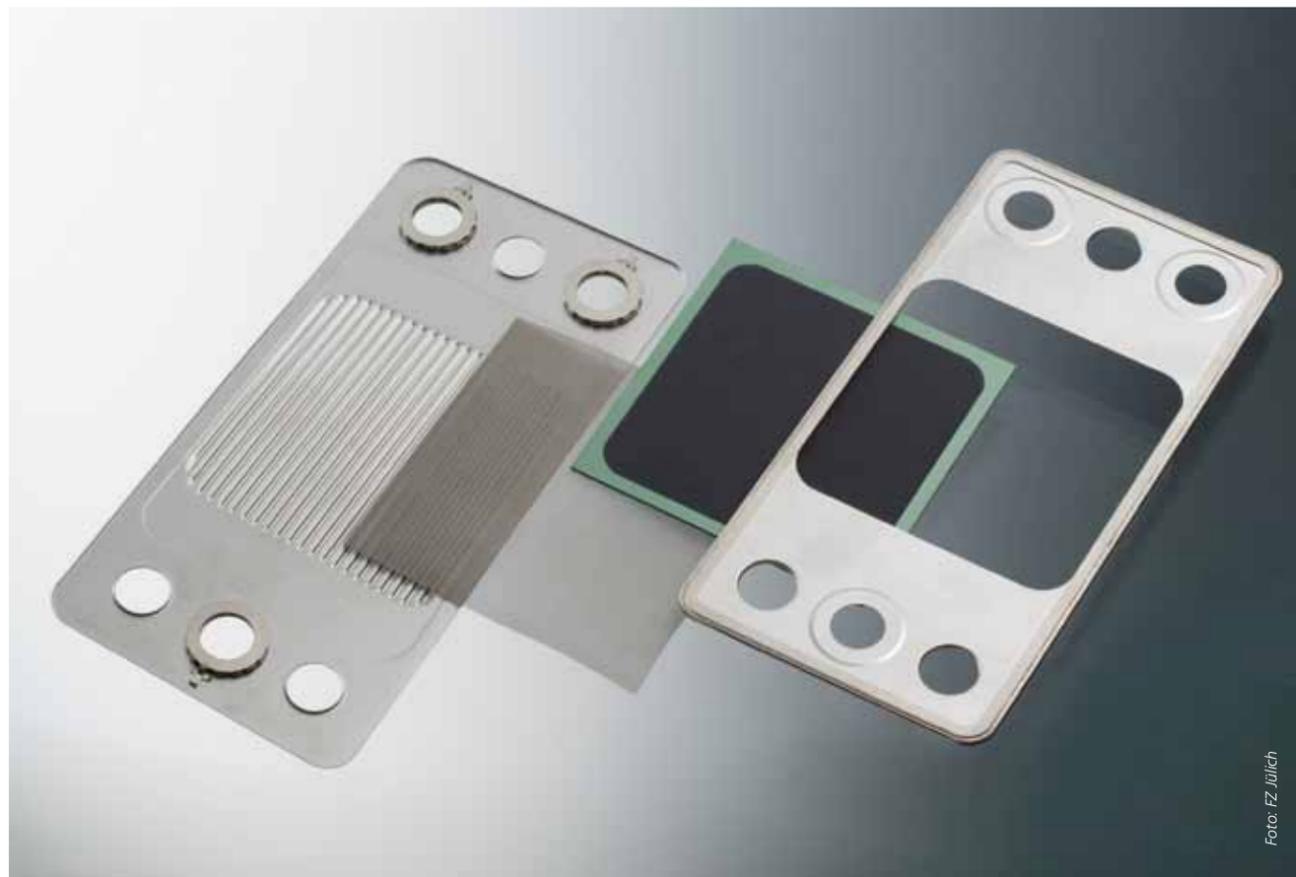


Foto: FZ Jülich

Elektrofahrzeuge und damit Traktionsbatterien stehen aufgrund der zentralen Bedeutung des Individualverkehrs in unserer Gesellschaft im Zentrum der Aufmerksamkeit, wenn es um die Speicherung von Energie geht. Große Chancen für Fortschritte existieren aber auch auf anderen Feldern. Die Speicherung von Wärmeenergie wird heute schon in großtechnischen Dimensionen eingesetzt: In solarthermischen Kraftwerken wie den Andasol-Kraftwerken in Andalusien wird ein Wärmeträger durch gebündelte Sonnenstrahlung erhitzt. Mit dem Dampf, der in einem Wärmetauscher erzeugt wird, treibt man dann Turbinen an.

Um die Nachtstunden zu überbrücken und derartige Kraftwerke grundlasttauglich zu machen, wird

ein Teil der am Tag erzeugten Wärmeenergie in einer Salzschnmelze gespeichert, die dadurch auf etwa 380°C aufgeheizt wird. In den Nachtstunden kühlt man die Schmelze auf etwa 280°C ab und nutzt die freigesetzte Energie zum Betrieb der Turbine. Das in der jüngsten Vergangenheit viel diskutierte Desertec-Projekt sieht vor, 100 Gigawatt Leistung aus Solarkraftwerken bereitzustellen, das entspricht der 2.000-fachen Leistung eines der Andasol-Kraftwerke.

Wärmespeichersysteme sind aber auch in unseren Breiten von Interesse. Bei gut isolierten Häusern erscheint es möglich, einen erheblichen Teil des Wärmebedarfs im Winter durch Speicherung von Solarenergie zu decken, die im

Einzelteile eines Brennstoffzellenstapels, aus denen ein sogenannter Stack zusammengesetzt wird

Sommer „geerntet“ und gespeichert werden könnte. Im einfachsten Falle könnte man dazu sehr gut isolierte Wassertanks nutzen. Günstiger wären aber Systeme, die auf der Speicherung sogenannter latenter Wärme beruhen. In solchen Systemen wird die gespeicherte Wärme auf einem konstanten Temperaturniveau wieder abgegeben. Aus dem täglichen Leben ist hier das Erstarren von Salzen bekannt, was heute in Taschenwärmern genutzt wird. Um auf großer Skala eingesetzt werden zu können, müssen solche Systeme aber eine Reihe von Anforderungen erfüllen, die bisher dem praktischen Einsatz entgegenstehen.

Wenn auch die komplette Wärmeversorgung im Wohnbereich durch Wärmespeichermaterialien derzeit noch nicht realisierbar erscheint, sind doch schon Materialien am Markt, die latente Wärme ausnutzen. Im letzten Jahr war eine Technologie für den Deutschen Zukunftspreis nominiert, die das Schmelzen von verkapselten Wachskügelchen, die in Beton eingearbeitet werden, ausnutzt, um einen ausgleichenden Effekt auf die Raumtemperatur zu erreichen. Bei starker Sonneneinstrahlung schmelzen die Wachseinschlüsse und halten so den Innenraum kühl, bei tiefen Temperaturen erstarrt das Wachs und setzt die gespeicherte Wärme wieder frei.

Die Identifizierung und Erforschung neuer, praktikabler Wärmespeichersysteme ist daher eine lohnende Aufgabe, besonders deswegen, weil Niedertemperaturwärme thermodynamisch eine niedrigwertige Energieform ist, wie sie heute aber überwiegend mit einer sehr hochwertigen Energieform, dem Erdgas, bereitstellen.

Die im Erdgas gespeicherte Energie steckt in den Bindungen des Methanmoleküls und ist somit chemischer Natur. Diese Energie der chemischen Bindung ist die effektivste Art, Energie zu speichern: Die Speicherdichte ist etwa hundertmal größer als in Batterien. Mit zurückgehenden Vorräten der fossilen Kraftstoffe werden wir über die nächsten Jahrzehnte aber auch eine Alternative finden müssen, um große Energiemengen langfristig zu speichern. Wasserstoff gilt als einer der großen Hoffnungsträger. Dabei wird häufig übersehen, dass Wasserstoff keine Energiequelle ist, sondern zunächst unter hohem Energieaufwand herge-

stellt werden muss. Heute geschieht dies durch Dampfpreformierung von Kohlenwasserstoffen, meist von Erdgas. Aber auch die Elektrolyse von Wasser aus regenerativ erzeugter elektrischer Energie könnte eine Zukunftsoption sein.

Wasserstoff und Methan sind große Hoffnungsträger, um in den nächsten Jahrzehnten beträchtliche Energiemengen langfristig zu speichern.

Die Speicherung von Wasserstoff ist ebenfalls noch ein großes Problem: Die erreichbaren Speicherdichten für den Betrieb von Autos in Verbindung mit Brennstoffzellen sind zu gering. Vor der Nutzung von Wasserstoff als universelle Transport- und Speicherform für Energie sind also noch Fortschritte in vielen Bereichen erforderlich.

Daher sollten alternative Speicherformen für chemische Energie nicht außer Acht gelassen werden. Eine interessante Alternative könnte Methan sein, für das wir bereits eine hervorragend ausgebaute Infrastruktur haben. Methan ist der wesentliche Bestandteil von Erdgas, wie es heute in unseren Netzen genutzt wird. Es ist aber auch zugänglich durch die anaerobe Vergärung von Biomasse zu Biogas, eines der effizientesten Verfahren zur Biomassenutzung. Bei Verfügbarkeit elektrischer Überschussenergie könnte der durch Elektrolyse erzeugte Wasserstoff schließlich auch zur katalytischen Hydrierung von CO₂ eingesetzt werden, was ebenfalls zu Methan führt. Die Rückverstromung ist effizient und sehr flexibel mit Gas- und Dampf-Turbinen möglich. Hier existieren aber noch zahlreiche Herausforderungen

für die Forschung: Lignocellulose-Biomasse bereitet bei der Vergärung große Schwierigkeiten. Auch für die Synthese aus Wasserstoff und CO₂ werden effizientere Verfahren benötigt, da die Wasserelektrolyse sowie die CO₂-Hydrierung in kleinen, nicht

stationär betriebenen Anlagen nicht sehr effizient sind.

Zahlreiche Herausforderungen also, die durch die notwendige Umstellung des Energiesystems auf uns zukommen. Glücklicherweise bleiben uns für die vollständige Umstellung noch einige Jahrzehnte Zeit, aber bereits heute müssen wir mit einer breit angelegten Forschung die Grundlagen schaffen.



Prof. Dr. Ferdi Schüth

ist Direktor am Max-Planck-Institut für Kohlenforschung in Mülheim/Ruhr und Vizepräsident der DFG.

Adresse:

Department of Heterogeneous Catalysis
Max-Planck-Institut für Kohlenforschung
Kaiser-Wilhelm-Platz 1,
45470 Mülheim an der Ruhr
E-Mail: schueth@mpi-muelheim.mpg.de

www.mpi-muelheim.mpg.de

Ortwin Renn

Überzeugungsarbeit für den Wandel

Energieforschung braucht nicht nur Technik- und Naturwissenschaften: Die Umstellung des Energiesystems kann nur mit einem breiten Konsens in der Gesellschaft gelingen. Die Wissensgrundlagen und Strategien dafür stellen die Kulturwissenschaften bereit.

Die Zukunft der Energieversorgung hängt zum einen von einem ausreichenden Angebot und zum anderen von einer nachhaltig gestalteten Nachfragesteuerung ab. Beim Angebot geht es um eine effiziente Nutzung von Primärenergieträgern, rationelle Energienutzung und -umwandlung, intelligente Speicher- und Transportsysteme sowie um die Entwicklung neuer Energietechnologien über den gesamten Lebenszyklus. Im Fokus der Nachfrage stehen dagegen das Innovations- und Meinungsklima in einer Gesellschaft, die Veränderungen im Energiekonsum auf der Grundlage sich wandelnder Lebensstile sowie der rechtliche und politische Kontext bei Entscheidungen im Energiesektor. Dazu zählen auch Fragen der Akzeptanz von Neuerungen im nationalen wie internationalen Umfeld.

Dieser auf Nachfrage und Akzeptanz bezogene Aspekt der Energieversorgung berührt das Feld der Sozial-, Wirtschafts-, Rechts- und Geisteswissenschaften, nachfolgend als Kulturwissenschaften zusammengefasst. Sie erkunden und erforschen Innovationsprozesse, untersuchen die Entwicklung der Nachfrage auf der Basis von Marktsignalen und

ordnungspolitischen Vorgaben, analysieren den sozio-kulturellen und rechtlich vorgegebenen Kontext und nehmen die Verhaltensmuster der Energie-Konsumenten und der energiebezogenen Akteursnetzwerke unter die Lupe.

Will man die ehrgeizigen energiepolitischen Zielvorgaben der

Pluralistische Gesellschaften benötigen Orientierung und kulturelle Reflexion, um ihre Potenziale voll auszuschöpfen.

Klima- und Umweltverträglichkeit, der Versorgungssicherheit, Wirtschaftlichkeit und Sozialverträglichkeit erreichen, dann wird dies nur gelingen, wenn man die Ingenieur-, Natur- und Kulturwissenschaften zu gemeinsamen und integrativen Forschungsansätzen gewinnen kann. Es bedarf, wie es kürzlich in einem Gutachten der Nationalen Akademien (Leopoldina, acatech und Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften) hieß, eines systemischen Ansatzes, bei dem technische Innovationen, neue institutionelle Strukturen und Prozesse sowie Änderungen der individuellen und organisatorischen

Verhaltensweisen beim Umgang mit Energie ineinander greifen. Dafür müssen wirksame und erfolgreiche energiepolitische Instrumente und Steuerungsprozesse entwickelt werden. Eine wirksame und sozial ausgewogene energiepolitische Trendwende (transformation management) erfordert eine integra-

tive Forschungsperspektive, bei der die Wechselwirkungen zwischen Technologieentwicklung und Gesellschaftsordnung, zwischen kulturellen Voraussetzungen und Umweltbedingungen im Mittelpunkt stehen. Während die Forschungsleistungen im Bereich der Ingenieur- und Naturwissenschaften für eine künftige Energieversorgung unumstritten sind, ist der Beitrag der Kulturwissenschaften in der Fachwelt und der öffentlichen Diskussion weniger präsent, zum Teil wird er sogar als verzichtbar und wenig ergiebig abgetan.

Doch warum ist gerade der Beitrag der Kulturwissenschaften zur



Energieforschung essenziell für eine systemische Betrachtung der Energieversorgung?

Pluralistische Gesellschaften benötigen Orientierung und kulturelle Reflexion. Die künftige Energieversorgung muss darauf ausgerichtet sein, den Wohlstand einer Gesellschaft zu erhalten und gleichzeitig die Umwelt-, insbesondere die Klimaverträglichkeit, sowie die Sozialverträglichkeit dauerhaft zu sichern. Damit mögliche Zielkonflikte frühzeitig erkannt und bearbeitet werden können und damit sich die zur Erreichung dieser Ziele benötigten

Mittel nicht verselbständigen können, ist eine Gesellschaft auf Prozesse der Orientierung und der Reflexion angewiesen. Kreative und innovative Lösungen entstehen selten aus einer Fortentwicklung des Bestehenden. Erst wenn man unterschiedliche Gestaltungsmöglichkeiten und Zukunftsvisionen gegeneinander abwägt, können neue Lösungen gesucht und Gegenstrategien zu Krisen und Überraschungen entworfen werden. In der Forschung geschieht dies durch die Entwicklung von integrierten Systemanalysen, in denen die klassischen Instrumente der Technikfolgenabschätzung ebenso

Grundsatzfrage: Können Raps, Solarzelle und Co. den Energiehunger zukünftiger Generationen tatsächlich stillen?

Eingang finden wie die Methoden der Szenarienbildung, des Foresight und der Risikoanalyse. Dadurch kann man mögliche Sackgassen früher identifizieren, alternative Optionen erkennen und in ihren Wirkungen abschätzen. Hierzu können gerade die Kulturwissenschaften wichtige Beiträge leisten, weil sie aus ihrem jeweiligen disziplinären Umfeld gelernt haben, in sich konsistente parallele Entwicklungsentwürfe zu konzipieren.

Energiapolitik und Energieforschung sind nur in ihrer globalen Vernetzung Erfolg versprechend. Antworten auf die Herausforderungen der zukünftigen Energieversorgung sind im Zeitalter der Globalisierung auf eine internationale Perspektive angewiesen. Dies betrifft nahezu alle relevanten Energiethemen – angefangen bei der Sicherheit und Transportabhängigkeit, über die wechselseitige Beziehung von regionalen, nationalen, europäischen und internationalen Steuerungsinstrumenten der Energiapolitik und die Verteilung von Chancen und Risiken, bis hin zur Versorgungssicherheit für die jeweils betroffenen Regionen (Stichwort: Energiearmut). Internationale Normen und Konventionen, Grundentscheidungen – speziell im Umweltrecht – und die Regulierungsstrategien der einzelnen Länder

fließen bis heute noch nicht ausreichend in die nationalen Entscheidungen mit ein. So ist zum Beispiel der internationale Rechtsvergleich eine wesentliche Voraussetzung für den Export des deutschen Energierechts.

Eine global wirksame und mit nationalen wie internationalen Zielen kompatible Energiapolitik ist dabei auf die Unterfütterung durch eine komparativ angelegte Energieforschung angewiesen. Gerade im Bereich der Klimapolitik ist es unabdingbar, ein global wirksames und von allen Staaten getragenes System einzurichten, das hilft, die bekannten Probleme bei der Nutzung von Gemeinschaftsgütern (Allmende-Dilemma) zu überwinden. Für diesen Zweck sind zum einen global wirksame Instrumente (wie Cap and Trade) zu entwickeln, zum anderen geeignete Steuerungs-

formen aus der Erforschung von internationalen Institutionen, Politiken und Mehrebenensystemen abzuleiten. Nicht zuletzt stärkt eine dezidiert internationale Ausrichtung die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Energieforschung.

Entscheidungs- und Handlungsfähigkeit der Energiapolitik ist auf Akzeptanz bei Akteuren und Bevölkerung angewiesen. Energiepolitisches Entscheiden und Handeln sind bestimmt durch institutionelle und soziale Rahmenbedingungen, kulturelle Vorstellungen und individuelle Präferenzen. Energiepolitische Steuerungsmaßnahmen können daher nur dann Veränderungen in Politik, in Organisationen und im individuellen Verhalten bewirken, wenn ihre sozio-kulturellen Einflussfaktoren und Rahmenbedingungen besser verstanden werden.

Zur bestmöglichen Unterstützung energiepolitischer Entscheidungen empfiehlt es sich, gemeinsame geteilte und hinreichend robuste „Energiezukünfte“ zu entwickeln. Schließlich müssen die Maßnahmen auch von denen angenommen werden, die von deren Konsequenzen betroffen sind. In einer Demokratie setzt dies Überzeugungsarbeit voraus. Sozial- und geisteswissenschaftliche Forschung kann aufzeigen, wie Maßnahmen im Rahmen einer demokratischen Willensbildung legitimiert und wie durch geeignete Partizipationsformen betroffene Akteure aktiv in die Entscheidungsfindung eingebunden werden können.

Institutionelles und organisatorisches Lernen ist Bedingung für den angemessenen Umgang mit der Dynamik der Energieprobleme. Im Rahmen einer integrierten Energieforschung werden Forschungspraktiken, Methoden und Instrumente entwickelt, mit denen unerwartete Nebenwirkungen von Maßnahmen und Technologien im Voraus abgeschätzt und bewertet werden können. Dies fördert die gesellschaftliche Lern- und Adaptionfähigkeit. Die Erforschung und Etablierung von Konfliktschlichtungs- und Planungsverfahren hat eine katalytische Funktion, die dazu beiträgt, Entscheidungsprozesse rationaler, nachhaltiger und fairer zu gestalten.



Ziel einer systematischen Energieforschung: Mehr klimafreundliche Elektrizität

Eine anwendungsorientierte, interdisziplinäre und integrierte Energieforschung leistet unverzichtbare Beiträge für die Ausgestaltung einer wirksamen, effizienten sowie umwelt- und sozialverträglichen Energiapolitik. Die größten Herausforderungen liegen dabei in der Ziel-, Steuerungs- und Instrumentenforschung unter regulatorischer Unsicherheit und Risiko, in der Entwicklung und Diffusion von tech-

nischen und sozialen Innovationen für den Übergang in ein nachfossiles Zeitalter sowie in der rechtlichen, politischen und sozialen Umsetzung von nachhaltigen Energiestrategien in einer pluralen, von Interessensgegensätzen geprägten Weltgemeinschaft.

Die bisherige Energieforschung hat die Frage des Energieangebots wesentlich stärker im Visier gehabt als die Variablen, die die Bereitstellung, die Verteilung und die Nutzung von Energie bestimmen. Diese Schieflage sollte möglichst bald korrigiert werden. Dabei geht es weniger um zusätzliche Themen, die bearbeitet werden müssen, als vielmehr um die notwendige Integration von Angebots- und Nachfrageforschung im Kontext von Politik, Wirtschaft und Gesellschaft. Zu dieser Integration können die vielfältigen Ansätze in der Nutzungs-, Konsum- und Kontextforschung

einen wesentlichen Beitrag leisten. Die Kulturwissenschaften sind in der Energieforschung kein schmückendes Beiwerk und nicht zuständig für die After-Dinner-Speech, sondern ein integraler Bestandteil einer systemisch integrierten Forschungslandschaft, die für Politik und Gesellschaft notwendige Wissensgrundlagen bereitstellt, um im Sinne der Nachhaltigkeit wirtschaftlich vertretbare, ökologisch verträgliche und sozial angepasste Energiestrategien zu entwickeln.

Für welche Energie sich eine Gemeinschaft auch entscheidet – ohne Akzeptanz(-Forschung) geht es nicht.



Prof. Dr. Dr. h.c. Ortwin Renn ist Geschäftsführender Direktor und Leiter der Abteilung für Technik- und Umweltsoziologie am Institut für Sozialwissenschaften der Universität Stuttgart.

Adresse:
Abteilung für Technik- und Umweltsoziologie
Institut für Sozialwissenschaften
Universität Stuttgart
Seidenstraße 36, 70174 Stuttgart
E-Mail: ortwin.renn@sowi.uni-stuttgart.de

DFG-Förderung im Rahmen verschiedener Verfahren und Projekte

www.uni-stuttgart.de/soz/tu/index.html

Achim Peters

Der selbstsüchtige Energiefresser im Kopf

Auch für den menschlichen Organismus sind Störungen im Energiekreislauf eine Gefahr: Wenn das Gehirn seinen Glukosebedarf aus dem Körper nicht decken kann, gibt es den Befehl zu sofortiger Nahrungsaufnahme – Übergewicht und Diabetes können die Folge sein.

Neueste Beobachtungen der Hirnforschung zeigen, dass das menschliche Gehirn sich – metaphorisch gesprochen – selbstsüchtig (engl. selfish) verhält. Es stellt seinen außergewöhnlich hohen Energiebedarf über den aller übrigen Organe. Bei der Erforschung von Adipositas wurde diese Grundeigenschaft des Gehirns bislang nicht berücksichtigt. Adipositas entsteht durch einen Versorgungsengpass des Gehirns. Wann und warum entwickeln so viele Menschen Übergewicht? Aufgrund von genetischen

über zehn Jahren formuliert habe und die inzwischen experimentell belegt werden konnten, verbraucht das Gehirn von allen Organen des Menschen am meisten Energie in Form von Glukose, die es primär aus dem Körper anfordert. Die Nervenzellen unserer Großhirnrinde verbrauchen dabei den größten Energieanteil innerhalb des Hirns.

Was hat das mit Adipositas zu tun? Aus Perspektive der Selfish-Brain-Theorie ist Übergewicht die Folge eines Notfallplans, der dazu dient, einen Engpass in der Ener-

worter dieser Ansicht können aber nicht erklären, wieso es trotz Nahrungsüberangebot immer noch viele schlank-gesunde Menschen gibt.

Unter Physiologen ist das Konzept verbreiteter, dass der menschliche Organismus eher – einem Pull-Prinzip folgend – aktiv Energie aus der Umwelt anfordert, und das entsprechend dem Energiestatus seines inneren Milieus. Zwei Denkansätze aus dem Jahre 1953, die lipostatische und die glukostatische Theorie, beruhten auf diesem Pull-Prinzip und bildeten seit mehr als 50 Jahren die Grundlage der Adipositas- und Diabetes-Forschung. Doch zwei Hauptfragen der Stoffwechselforschung können mit diesen beiden Theorien bis heute nicht schlüssig beantwortet werden. Warum nehmen die vielen Menschen mit Adipositas und überfüllten Körperfettdepots trotzdem noch weiter Nahrung auf? Und warum essen Patienten mit Diabetes mellitus, die hohe Blutglukosekonzentrationen aufweisen, überhaupt noch?

Die Selfish-Brain-Theorie ist eine Theorie über die Eigenschaft des menschlichen Gehirns, bei der Regelung der Energieversorgung des Organismus vorrangig den eigenen, vergleichsweise hohen Bedarf

Die Ursache von Fettleibigkeit ist aus neurobiologischer Sicht ein Energiestau in der Lieferkette.

Defekten? Weil wir in einer Überflussgesellschaft einem Nahrungsüberangebot ausgesetzt sind, das zum permanenten Essen verführt? Liegt es an ungesunder Ernährung, mangelnder Bewegung oder zu viel Stress? Sind hormonelle Störungen schuld?

Aus Sicht der Hirnforschung und Neurobiologie wurde bei der Erforschung von Adipositas die Selbstsüchtigkeit des Gehirns bislang nicht bedacht. Gemäß der Selfish-Brain-Theorie, deren Grundlagen ich vor

gieversorgung des Gehirns zu überwinden. Wenn Glukose aus irgendeinem Grund nicht ausreichend für die Großhirnhälften angefordert werden kann, wird sie durch zusätzliche Nahrungsaufnahme herbeigeschafft. In der Lieferkette zum Gehirn entsteht dabei ein Stau in Form sich auffüllender Fettpolster.

Einige Experten gehen davon aus, dass die gegenwärtige Adipositas-Epidemie durch eine Umwelt bedingt wird, die ein exzessives Nahrungsangebot bereitstellt. Die Befür-



zu decken. 1998 erkannte ich, dass sowohl in der glukostatischen als auch in der lipostatischen Theorie implizit Grundannahmen getroffen worden sind, die man aus moderner neuroenergetischer Sicht als problematisch ansehen muss und die weder von Adipositas- noch von Diabetes-Forschern hinterfragt worden sind: Es handelte sich dabei um die Annahme, dass der Energiefluss vom Körper zum Gehirn ein rein passiver Vorgang sei. Daraus würde folgen, dass sich die Energie nach dem Push-Prinzip auf das Gehirn und den übrigen Körper verteilt.

Bereits vor der Zeit, in der die beiden theoretischen Ansätze formuliert worden sind, hatten experimentelle Befunde vorgelegen, wonach das Gehirn bei der Energieverteilung im Organismus eine Sonderstellung einnimmt. Schon 1921 hatte diese Befunde Marie Krieger erhoben, Schülerin eines der Pio-

niere der Pathologie, Robert Rössle, indem sie bei Menschen, die an Abmagerung gestorben waren, die Organengewichte bestimmte. Sie stellte fest, dass fast alle Organe wie Herz, Leber, Milz und Nieren dramatisch an Gewicht verloren hatten (circa 40 Prozent), die Gehirnmasse aber kaum oder gar nicht verändert war. Auch mit modernsten Messmethoden ließ sich der Befund sowohl in Human- als auch in tierexperimentellen Studien bestätigen.

Doch warum nimmt das Gehirn nicht ab? Aufgrund der hier dargestellten Überlegungen entdeckte ich 1998 eine effiziente Brain-Pull-Komponente, die Energie bedarfsgerecht für das Gehirn aus dem Körper anfordert, und formulierte Axiom Nummer 1 der Selfish-Brain-Theorie: Das Gehirn verfolgt mit höchster Priorität die Regulation seines eigenen Energiegehaltes. Das Gehirn verhält sich insofern selbstsüchtig.

Brain-Pull-Mechanismen stellen demnach die Basis eines natürlichen und vitalen Vorganges im Hirnstoffwechsel dar, der nötig ist, um das zerebrale Energiegleichgewicht sicherzustellen. Immerhin verbraucht das menschliche Gehirn große Mengen Glukose – mehr als 130 Gramm pro Tag – also etwa 60 Prozent der zirkulierenden Blutglukose. Es ist durch die Blut-Hirnschranke von der generellen Blutzirkulation getrennt und stellt damit eine in sich geschlossene Einheit dar.

Nach der Selfish-Brain-Theorie entsteht Adipositas durch ineffiziente Brain-Pull-Mechanismen, das heißt eine Leistungsschwäche des Gehirns, aktiv Glukose aus dem Körper anzufordern. Als Konsequenz daraus fließt zu viel Glukose in Muskel- und Fettgewebe, zu wenig Blutglukose steht dem Gehirn zur Verfügung, und das Gehirn muss dieses Defizit durch eine gesteigerte

Nahrungsaufnahme kompensieren. Der ganze Vorgang lässt sich mit dem logistischen Bild der Lieferkette beschreiben. Eine Ineffizienz der Brain-Pull-Mechanismen führt zu einer Reduktion des angeforderten Glukoseflusses zum Gehirn – wie bei einem Engpass – und Adipositas und Typ-2-Diabetes entstehen dann als Stau in der Lieferkette. Dieser Stau ist gekennzeichnet durch eine überproportionale Akkumulation von Energie im Fettgewebe oder im Blut. Ein ineffizienter Brain-Pull äußert sich in einer Schwächung des sympathischen Nervensystems. Diese verursacht, dass die für das Gehirn bestimmte Energie aus dem

Blut überwiegend in die Seitenspeicher fließt, das heißt ins Fettgewebe und in die Muskulatur. Eine Unterversorgung des Gehirns ist die Folge. Um das drohende Defizit auszugleichen, gibt das Gehirn den Befehl zu akuter Nahrungsaufnahme. Der Akkumulationsprozess eskaliert, die Seitenspeicher werden immer weiter aufgefüllt. Das Krankheitsbild der Adipositas stellt sich ein.

Betrachten wir die Lieferkette des Gehirns: Da das Gehirn der größte Glukoseverbraucher im Organismus ist, weisen wir ihm die Position des Endverbrauchers in der Kette zu. Die Energie aus der entfernten Umgebung (etwa vom

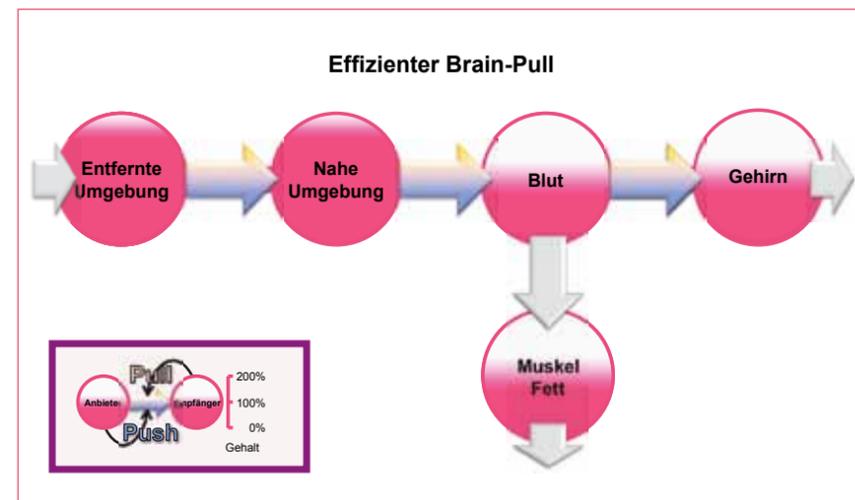
Markt) wird in die nähere Umgebung geholt (zum Beispiel auf den Esstisch), wird dann vom Körper in die Blutzirkulation aufgenommen, und von dort gelangt ein beträchtlicher Anteil in das Gehirn.

Die Energie- und Güter-Lieferketten, die wir von Industrieproduktionsprozessen kennen, haben große Ähnlichkeit mit dem Glukosepfad von der Umgebung durch den Körper zum Gehirn. In den Wirtschaftswissenschaften, der Logistik, sind derartige Lieferketten seit Jahrzehnten intensiv untersucht und wesentliche Grundprinzipien formuliert worden.

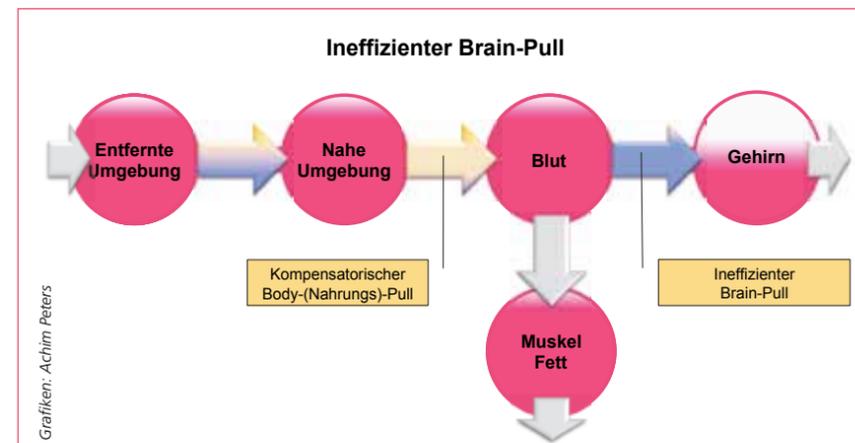
Das sogenannte Push-Prinzip arbeitet nach folgender Regel: Der Anbieter offeriert das Material und bestimmt auf diese Weise die Aktivität des Produktionsschrittes. Im Gegensatz dazu wird beim sogenannten Pull-Prinzip das Material, das für einen Produktionsschritt benötigt wird, nur dann bereitgestellt, wenn der Empfänger es braucht (on demand; just in time). Das Pull-Prinzip hat gegenüber dem Push-Prinzip klare ökonomische Vorteile mit kürzeren Aufrüstzeiten und kleineren, ökonomisch optimierten Zwischenlagern.

Die hier beschriebene Gehirn-Lieferkette beruht auf den Grundprinzipien von generellen Lieferketten. Dementsprechend werden die Flüsse zum Gehirn jeweils durch Angebot und Nachfrage reguliert. Die Energie fließt antegrad zum Endverbraucher (Gehirn); Störungen hingegen propagieren retrograd, das heißt, Staus bilden sich jeweils vor dem Versorgungsengpass (Adipositas).

Wodurch entsteht ein Versorgungsengpass des Gehirns? Wenn das Gehirn nur eine unzureichende

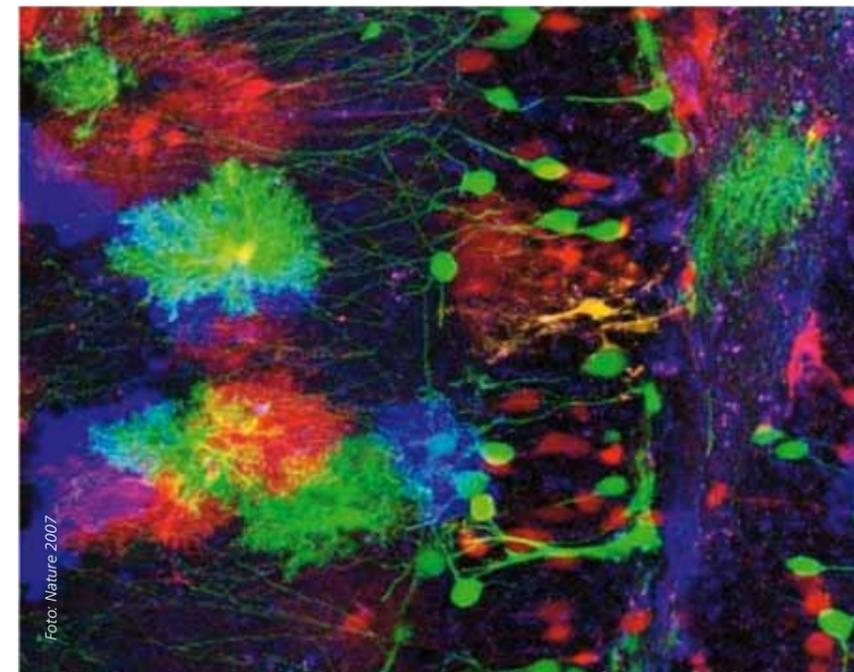


Die beiden Grundprinzipien der Lieferkette des menschlichen Gehirns



Grafiken: Achim Peters

lung von Adipositas. Jede Therapie muss als Eingriff in die Selbstregulationskreisläufe des Organismus betrachtet werden und stößt unter Umständen auf erhebliche Widerstände. Damit lässt sich erklären, warum viele Ansätze zur Gewichtsreduktion scheitern, oder diejenigen, deren Übergewicht auf drakonische Weise abgebaut wurde, mitunter in Depression verfallen. Neue, andere Therapieformen müssen entwickelt werden, wenn nicht die Lösungen von heute die Probleme von morgen werden sollen, wie Marcel Proust, Schriftsteller und Spross einer bedeutenden Medizinerfamilie, schrieb: „Es gibt Leiden, von denen man die Menschen nicht heilen soll, weil sie der einzige Schutz gegen weit ernstere sind.“



Mikroskopische Aufnahme von Nervenzellen und Astrozyten im Großhirn: Die Astrozyten (links) sind Versorgungszellen und beschaffen auf Anforderung durch die Nervenzellen Energie aus dem Blut.

Menge Glukose für sich anfordern kann, so ist es bei einem derartigen Versorgungsengpass umso mehr darauf angewiesen, dass im Blut stets genügend Glukose vorhanden ist und dass es so durch passive Aufnahme von Glukose aus dem Blut hinreichend versorgt wird. Eine Ausweichstrategie besteht für das Gehirn darin, in solchen Situationen mehr Nahrung anzufordern. Zwar wird so die Gehirnversorgung ausgeglichen, als Nebenwirkung fließt jedoch die überschüssige Energie in die peripheren Energiespeicher. Langfristig entsteht dann Adipositas.

Eine Malfunktion oder Maladaptation im sogenannten autonomen neuroendokrinen Motorsystem führt dazu, dass die Brain-Pull-Mechanismen ineffizient arbeiten. Störungen dieser Mechanismen können unter anderem durch Gendefekte, Gehirntumoren, falsche

Ernährung und Bewegungsmangel, Medikamente oder seelische Faktoren wie Stress ausgelöst werden und potenziell zur Adipositas führen.

Hirnforschung und Neurobiologie, genauer Neuroenergetik, können mit der Untersuchung des Versagens der Brain-Pull-Mechanismen eine schlüssige Erklärung für die Entstehung von Adipositas und Diabetes mellitus liefern. Von grundlegender Bedeutung ist dabei die Selfish-Brain-Theorie.

Gleichzeitig wird aber auch die Notwendigkeit eines differenziellen Umgangs mit Adipositas klar. Denn genau betrachtet, ist Adipositas nur die Folge beziehungsweise Begleiterscheinung einer Strategie, mit der der menschliche Organismus sich selbst hilft – nämlich die Energieversorgung des Gehirns sicherstellt und damit letztlich seine Vitalfunktionen. Das hat Konsequenzen für die Behand-



Prof. Dr. med. Achim Peters

ist Leiter der Klinischen Forschergruppe „Selfish Brain“ (Hirnstoffwechsel, Neuroenergetik, Adipositas und Diabetes) an der Medizinischen Klinik 1 der Universität zu Lübeck.

Adresse:
Medizinische Klinik 1
Universität zu Lübeck, 23538 Lübeck
E-Mail: achim.peters@uk-sh.de

DFG-Förderung im Rahmen
der Klinischen Forschergruppe KFO 126

► „Selfish Brain: Gehirnglukose und metabolisches Syndrom“

www.selfish-brain.com

Die Deutsche Forschungsgemeinschaft

Die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) ist die größte Forschungsförderorganisation und die zentrale Selbstverwaltungsorganisation der Wissenschaft in Deutschland. Nach ihrer Satzung hat sie den Auftrag, „die Wissenschaft in allen ihren Zweigen zu fördern“.

Mit einem jährlichen Etat von inzwischen mehr als zwei Milliarden Euro finanziert und koordiniert die DFG in ihren zahlreichen Programmen über 20.000 Forschungsvorhaben einzelner Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler sowie von Forschungsverbänden an Hochschulen und außeruniversitären Forschungseinrichtungen. Dabei liegt der Schwerpunkt in allen Wissenschaftsbereichen in der Grundlagenforschung.

Alle Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler an Hochschulen und Forschungseinrichtungen in Deutschland können bei der DFG Anträge auf Förderung stellen. Die Anträge werden nach den Kriterien der wissenschaftlichen Qualität und Originalität von Gutachterinnen und Gutachtern bewertet und den Fachkollegen vorgelegt, die für vier Jahre von den Forscherinnen und Forschern in Deutschland gewählt werden.

Weitere Informationen im Internet unter www.dfg.de

Die besondere Aufmerksamkeit der DFG gilt der Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses, der Gleichstellung in der Wissenschaft sowie den wissenschaftlichen Beziehungen zum Ausland. Zudem finanziert und initiiert sie Maßnahmen zum Ausbau des wissenschaftlichen Bibliothekswesens, von Rechenzentren und zum Einsatz von Großgeräten in der Forschung. Eine weitere zentrale Aufgabe ist die Beratung von Parlamenten und Behörden in wissenschaftlichen Fragen. Zusammen mit dem Wissenschaftsrat führt die DFG auch die Exzellenzinitiative des Bundes und der Länder zur Stärkung der universitären Spitzenforschung durch.

Zu den derzeit 96 Mitgliedern der DFG zählen vor allem Universitäten, außeruniversitäre Forschungsorganisationen wie die Max-Planck-Gesellschaft, die Leibniz-Gemeinschaft und die Fraunhofer-Gesellschaft, Einrichtungen der Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren sowie wissenschaftliche Akademien. Ihre Mittel erhält die DFG zum größten Teil von Bund und Ländern, hinzu kommt eine Zuwendung des Stifterverbandes für die Deutsche Wissenschaft.

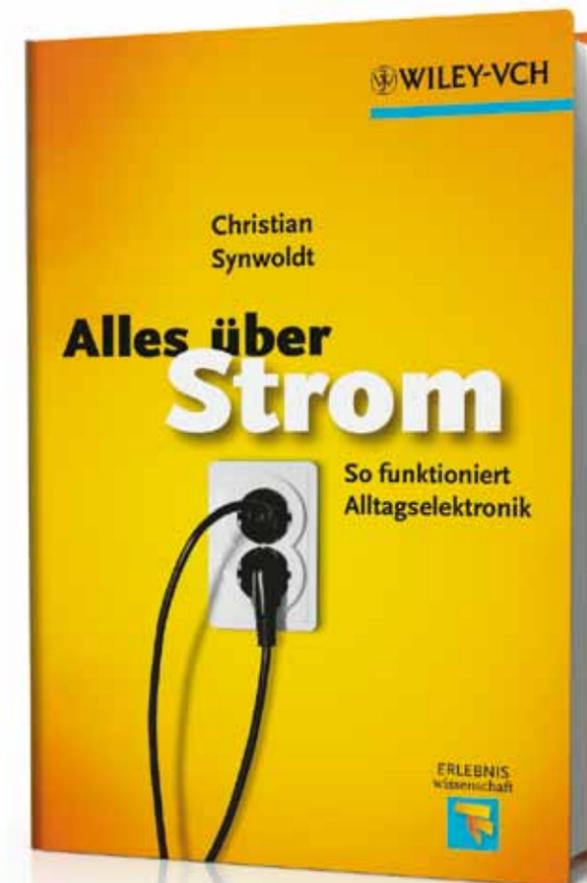
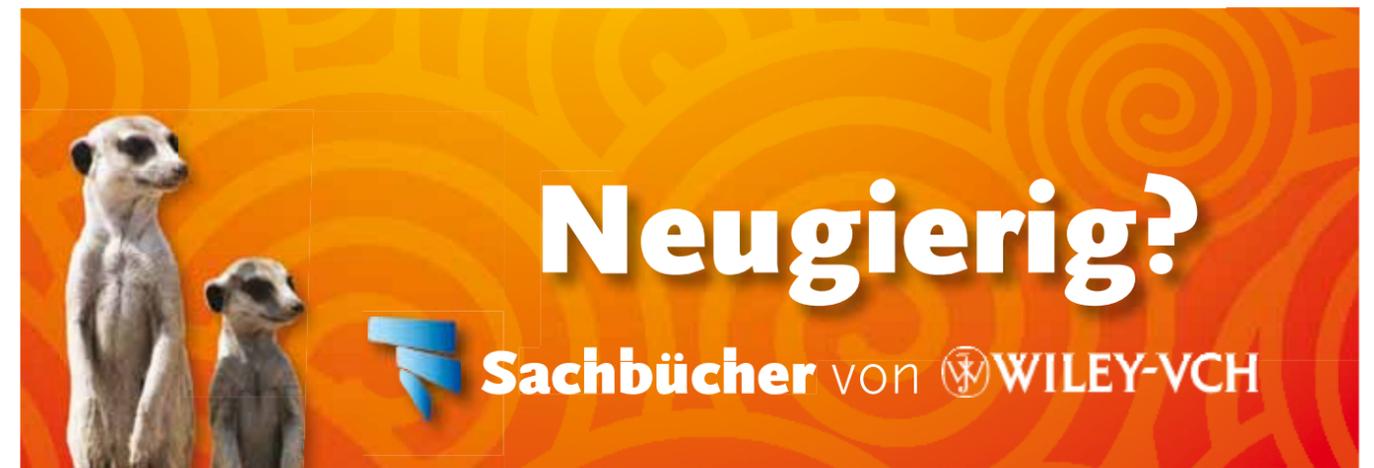
Impressum

„forschung SPEZIAL Energie“ ist eine Sonderausgabe des vierteljährlich erscheinenden DFG-Magazins „forschung“ zum „Jahr der Energie 2010“.

Herausgeber: Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), Bonn; Verlag: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Postfach 10 11 61, 69451 Weinheim; Chefredakteur: Marco Finetti (verantwortlich für den Inhalt); Redaktion: Dr. Rembert Unterstell (Chef vom Dienst), Tim Wübben (Gestaltung); Redaktionsanschrift: DFG, Bereich Presse- und Öffentlichkeitsarbeit, Kennedyallee 40, 53175 Bonn, Tel.: 0228 885-1, Fax: 0228 885-2180, E-Mail: postmaster@dfg.de, Internet: www.dfg.de; Produktion: Bruni Köppen/Lemmens Medien GmbH, Bonn; Satz: Angelika Böll, Unkel/Rhein; Druck: Bonner Universitäts-Buchdruckerei (BUB); gedruckt auf chlorfrei gebleichtem Papier mit 50% Recyclingfaser

Erstauflage: 30.000; Juni 2010

ISSN 0172-1518



CHRISTIAN SYNWOLDT

Alles über Strom

So funktioniert Alltagselektronik

ISBN: 978-3527-32373-9

September 2009 250 S. mit 112 Abb.

Gebunden € 24,90

Synwoldt nimmt seine Leser mit auf eine äußerst unterhaltsame Reise in die Innenwelten der Geräte und Anwendungen, ohne die modernes Leben nicht mehr vorstellbar ist. Dabei begegnet man Beethoven und dem Radio ebenso wie den neuesten Klingeltönen, surft auf der Welle von Protokollen und Diensten durchs Internet und erfährt, wie die Bilder der letzten Tatort-Folge ihren Weg in unser Wohnzimmer fanden. Und wenn der Krimi schlecht war, weiß man nach der Lektüre dieses Buches, wie die Technik funktioniert, mit deren Hilfe man seine Kritik an den Sender übermittelt – egal ob man das per E-Mail, Festnetztelefon oder Handy tut.

In seinem auch für Techniklaien leicht verständlichen Buch lüftet Christian Synwoldt die Geheimnisse der „Technologie des Alltags“.



Als die größte Forschungsförderorganisation in Deutschland fördert die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) bereits seit langem zahlreiche Projekte zur Energieforschung – diese SPEZIAL-Ausgabe des DFG-Magazins „forschung“ zum „Jahr der Energie 2010“ stellt auf 64 Seiten einige beispielhaft vor. Doch damit nicht genug: Auf dem Dach der DFG-Geschäftsstelle in Bonn Bad-Godesberg ist seit dem Sommer 2009 eine Fotovoltaik-Anlage in Betrieb. Die 144 Kollektoren haben in den ersten neun Monaten mehr als 24.000 Kilowattstunden Strom erzeugt, die in das Netz der Geschäftsstelle eingespeist wurden – ein ganz praktischer Beitrag zur Nutzung der Sonnenenergie und damit auch zu Klimaschutz und Energiewende.