

FORSCHEN

Nr. 1/2006

in Jülich

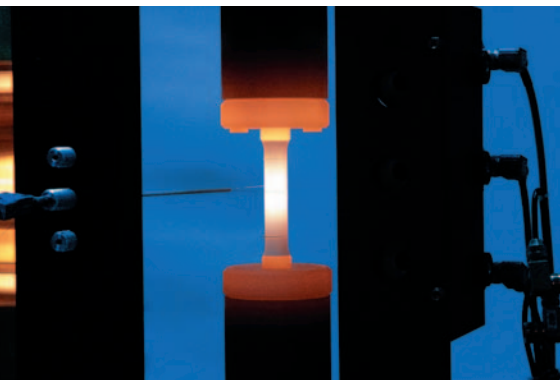


Energie

- > Mehr Strom fürs Auto
- > Hauchdünne Sonnenfänger
- > Im Brennpunkt: Kohlendioxid

Inhalt

Mit Energie in die Zukunft	>	3
Brennstoffzelle		
Energiebündel auf Rekordkurs	>	6
Mehr Strom fürs Auto	>	10
Vollgetankt mit Alkohol	>	12
Photovoltaik		
Hauchdünne Sonnenfänger	>	14
Kernfusion		
Durchhalten im Sonnenfeuer	>	18
Der chaotische Schutzengel	>	21
Interview		
mit Prof. Dr. Otto Hasenkopf	>	22
Entsorgungsforschung		
Eine Antwort auf die Entsorgungsfrage	>	24
Kraftwerkstechnik		
Fossil und fortschrittlich	>	26
Kohlendioxid-Abtrennung		
Im Brennpunkt: Kohlendioxid	>	30
Wasserstoffwirtschaft		
Wege in die Wasserstoffwelt	>	32
Überblick		
Der Weg in die Zukunft	>	34



Forschen in Jülich

ISSN 1433-7371

Magazin des Forschungszentrums Jülich

Herausgeber:

Forschungszentrum Jülich GmbH

52425 Jülich

Redaktion:

Dr. Angela Lindner (v.i.S.d.P.)

Dr. Frank Frick, Kosta Schinarakis

Autoren:

Dr. Frank Frick, Dr. Wiebke Rögner,

Axel Tillemans

Kontakt:

Stabsstelle Öffentlichkeitsarbeit

Tel.: 02461 61-4661

Fax: 02461 61-4666

E-Mail: info@fz-juelich.de

Titelfotos:

Thermisch-mechanische Ermüdungstests an Wärmedämmschichten, „JuMOVE“ Brennstoffzellen-Scooter

Layout, Grafiken:

Frank Hetzer, Ralf Lepper

Herstellung:

Grafische Medien des Forschungszentrums Jülich

Auflage der Ausgabe 1/06: 15 000
Auszüge aus diesem Heft dürfen ohne jede weitere Genehmigung wiedergegeben werden, vorausgesetzt, dass bei der Veröffentlichung der jeweilige Autor und das Forschungszentrum Jülich genannt werden. Um ein Belegexemplar wird gebeten. Alle übrigen Rechte bleiben vorbehalten.

Hinweis gemäß § 33 BDSG: Der Postversand des Heftes erfolgt für regelmäßige Leser über eine Adressdatei, die mit Hilfe der automatisierten Datenverarbeitung geführt wird.

Weitere Informationen zum Thema:

> www.fz-juelich.de/energie

> www.co2separation.com

> www.fuel-cells.de

Mit Energie in die Zukunft

Derzeit stillt die Weltbevölkerung ihren Energiehunger zu rund 80 Prozent mit Erdöl, Kohle und Gas – künftig wird sie ihren Appetit zügeln müssen. Denn die Vorräte an fossilen Brennstoffen sind begrenzt, und deren Konsum setzt das Treibhausgas Kohlendioxid frei. Um die Menschheit künftig nachhaltig mit Energie versorgen zu können, müssen neue Energiequellen erschlossen und bessere Technologien entwickelt werden: Die Wissenschaftler des Forschungszentrums Jülich arbeiten intensiv an diesem Ziel.

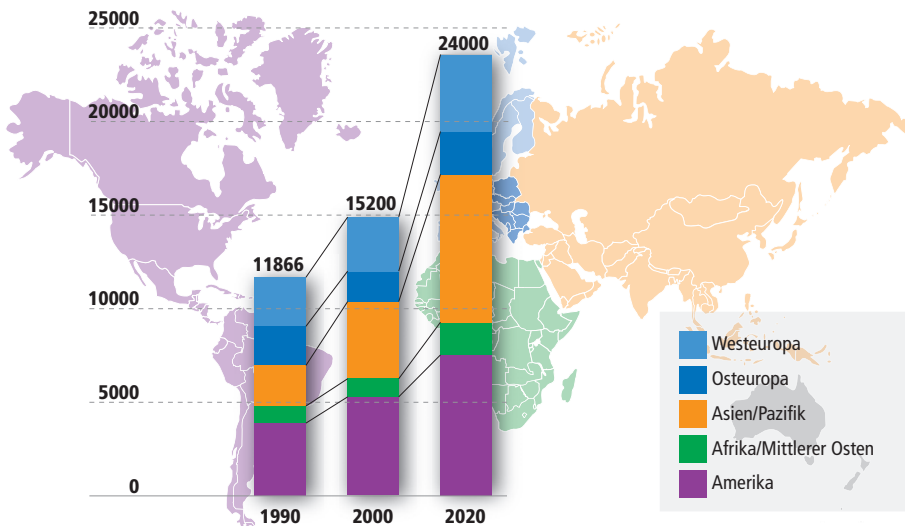
Knappheit macht Energie teuer und bremst das wirtschaftliche Wachstum dauerhaft. Die heutigen Höchstpreise bei Benzin, Gas und Strom sind Zeichen dafür, dass China und andere Länder für ihre boomende Wirtschaft immer mehr Energie brauchen und zusätzlich einkaufen. Während der ersten Ölkrise 1973 hatten schon geringfügige Liefereinschränkungen der arabischen Ölländer genügt, um die Konjunktur weltweit einbrechen zu lassen. Zwar reichen bei gleich bleibendem Weltverbrauch die Erdölvorräte noch über 40 Jahre, rechnet die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe aus. Doch wegen des rasant wachsenden Öldursts der Entwicklungs- und Schwellenländer wird das Produktionsmaximum wahrscheinlich bereits zwischen 2012 und 2025 erreicht. Etwa ab diesem Zeitpunkt könnte die Nachfrage nicht mehr befriedigt werden. Beim Erdgas und vor allem bei der Kohle ist die Situation etwas entspannter.

„Bedrohlicher als die Energieknappheit erscheint vielen Menschen derzeit der Engpass bei der Entsorgung der Rückstände unseres Energieverbrauchs“, sagt Dr. Gerd Eisenbeiß, im Vorstand des Forschungszentrums Jülich für den Bereich Energie verantwortlich. Ein solcher

Rückstand ist Kohlendioxid (CO_2), das bei der Verbrennung fossiler Energieträger freigesetzt wird. Hauptsächlich auf Grund des CO_2 -Ausstoßes erwarten Klimaforscher bis 2100 eine globale Erwärmung der Lufttemperatur in Oberflächennähe um bis zu 5,8 Grad. Ein anderer Rückstand ist der radioaktive Abfall, der bei Nutzung der Kernenergie entsteht. Die Energietechnik des 21. Jahrhunderts steht somit vor einer gewaltigen Herausforderung: Es gilt die Energieversorgung sicherzustellen und gleichzeitig das Entsorgungsproblem zu lösen. Dabei muss die Energie weiterhin erschwinglich bleiben. „Die Prognosen der Klimaforscher sind eine starke moralische Basis für Maßnahmen gegen den Klimawandel und seine Folgen, auch wenn dies ökonomische Opfer verlangt“, so Eisenbeiß. „Trotzdem muss die wirtschaftliche und soziale Entwicklung der Welt beachtet werden.“



Erdöl und Erdgas als Energieträger besitzen eine große Bedeutung für unser Leben. Man spricht auch vom „Zeitalter der Kohlenwasserstoffe“. Doch tatsächlich handelt es sich um eine äußerst kurze Episode der Menschheitsgeschichte, in der wir die Vorräte verbrauchen, die sich in Jahrtausenden gebildet haben.



Der Strombedarf der Weltbevölkerung wächst noch mehr als der Energiebedarf – und daran wird sich nach Experten-Prognosen auch künftig nichts ändern. Angegeben ist jeweils der Stromverbrauch in Terawattstunden, das sind 1 000 000 000 Kilowattstunden (Quelle: dekon).

Einziger Ausweg: Forschung

Nur Forschung kann den Weg zu ökologisch ungefährlichen, ökonomisch lohnenden und sozial akzeptierten Energietechniken weisen. Dabei sind marktnahe Forschungsarbeiten Sache von Unternehmen – in wirtschaftlich besonders risikoreichen Fällen gefördert vom Staat. „Für das Forschungszentrum Jülich als Mitglied der Helmholtz-Gemeinschaft sind nur jene Entwicklungen angemessener Forschungsgegenstand, die langfristig und komplex sind und deren Erfolg nicht sicher ist: also die großen gesellschaftlichen Herausforderungen“, erläutert Eisenbeiß.

Probleme dieser Art häufen sich auf dem Energiesektor und insbesondere bei der Stromerzeugung. Auf sie konzentrieren sich die Jülicher Forscher noch aus anderen Gründen: Der Strombedarf wächst weltweit stärker als der Energiebedarf. Dieser Trend dürfte sich fortsetzen: Eines fernen Tages werden womöglich selbst Autos und Flugzeuge indirekt mittels Strom angetrieben – nämlich aus Wasserstoff, der elektrolytisch erzeugt wurde (siehe „Wege in die Wasserstoffwelt“, S. 32).

Jülicher Themen

Das Forschungszentrum Jülich nutzt insbesondere die Physik, um die gesellschaftlich drängende Fragen zu lösen. Das gilt zum Beispiel für die Forschung an Krankheiten wie Alzheimer oder Parkinson ebenso wie für die Weiterentwicklung der Informationstechnik. Das stimmt aber auch für die Energieforschung. So ergeben sich die Jülicher Forschungsthemen:

Wissenschaftler des Forschungszentrums entwickeln Brennstoffzellen – hocheffiziente und umweltfreundliche Energiewandler für die dezentrale, autonome Stromversorgung beispielsweise von Gebäuden (siehe „Energiebündel auf Rekordkurs“, S. 6) und für Fahrzeuge (siehe „Mehr Strom fürs Auto“, S. 10 und „Vollgetankt mit Alkohol“, S. 12). Die Jülicher Experten sind dabei gefragte Partner der Industrie, die mit dieser Technologie Erfahrungen sammeln möchte, aber andererseits weder über das Know-how verfügt noch die hohen Entwicklungskosten alleine tragen kann. Besonders zu Gute kommt den Jülicher Forschern hierbei ihre Kompetenz bei Hochtemperaturmaterialien, die ihre Wurzeln in der Geschichte des Forschungszentrums hat.

Dieses Wissen dient auch unmittelbar der Verbesserung konventioneller Kraftwerke. Es fließt in die Entwicklung von Materialsystemen für Anlagen ein, die mehr Strom aus fossilen Brennstoffen herausholen und die damit sauberer und wirtschaftlicher als heute betrieben werden können (siehe „Fossil und fortschrittlich“, S. 26). Hier gibt es viele technologisch bedeutsame Grundlagenfragen, die Unternehmen mit Jülicher Unterstützung lösen.

Andere Wissenschaftler-Teams entwickeln eine materialsparende, preisgünstige Solarstromquelle (siehe „Hauchdünne Sonnenfänger“, S. 14). Diese Technologie hat eine gemeinsame Basis – die Halbleiterphysik – mit den Jülicher Arbeiten zur Mikro- und Nanoelektronik.

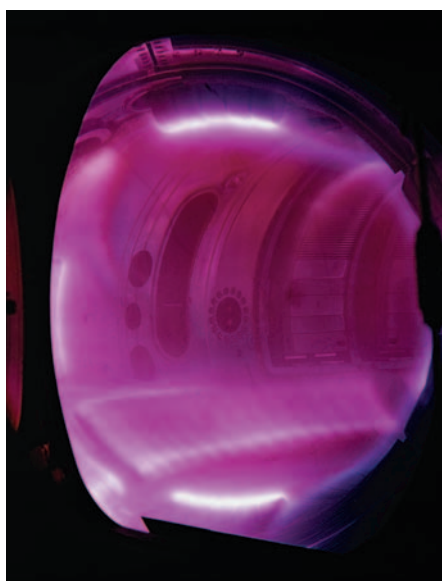




Ausweis des Erfolgs sind die exzellenten „Noten“, die internationale Gutachter der Jülicher Solarzellenforschung gaben. Das Budget für diese Forschung steigert sich auf Grund des Expertenurteils im Rahmen der programmorientierten Förderung der Helmholtz-Gemeinschaft um außergewöhnliche 87 Prozent.

Jülicher Wissenschaftler beschäftigen sich mit der Sicherheit der nuklearen Energietechnik und mit der Entsorgung radioaktiver Abfälle (siehe „Eine Antwort auf die Entsorgungsfrage“, S. 24) – ein Thema, das angesichts von 440 weltweit existierenden Reaktoren wichtig bleibt.

Seit 2004 läuft ein Forschungsprojekt zur CO₂-Abtrennung an fossil befeuerten Kraftwerken (siehe „Im Brennpunkt: Kohlendioxid“, S. 30). Mit ihrer materialwissenschaftlichen Kompetenz entwickeln Jülicher Forscher neue Membranen zur besonders effizienten Gasabtrennung.



Um mit der Kernfusion eine schier unerschöpfliche Energiequelle zu erschließen, wird jetzt in Frankreich die Testanlage ITER errichtet. Jülicher Plasmaphysiker erforschen und verbessern dafür und für spätere Fusionskraftwerke Materialien, die das heiße Fusionsgas einschließen sollen (siehe „Durchhalten im Sonnenfeuer“, S. 18). Außerdem entwickeln sie ein aktives Schutzsystem für die Reaktor-Innenwand (siehe „Der chaotische Schutzengel“, S. 21).

Jülicher Systemanalytiker überprüfen die Rolle der erforschten Technologien für eine künftige Energieversorgung und beraten qualifiziert Politik und Wirtschaft. Dabei wissen sie, dass sich moderne Gesellschaften viele Möglichkeiten offen halten müssen, um auf unvorhersehbare Situationen flexibel reagieren zu können. „Neue Technologien ersetzen verbrauchte Ressourcen: Dies ist Nachhaltigkeit und Verantwortung für zukünftige Generationen. Ein hoch entwickelter Staat braucht deshalb Energieforschung“, ist Eisenbeiß überzeugt.

Frank Frick

Blick ins Innere der Jülicher Fusionsanlage TEXTOR. Am lila Leuchten erkennt man das Plasma – einen Materiezustand, in dem Atomkerne und Elektronen frei durcheinander fliegen.

Energiebündel auf Rekordkurs

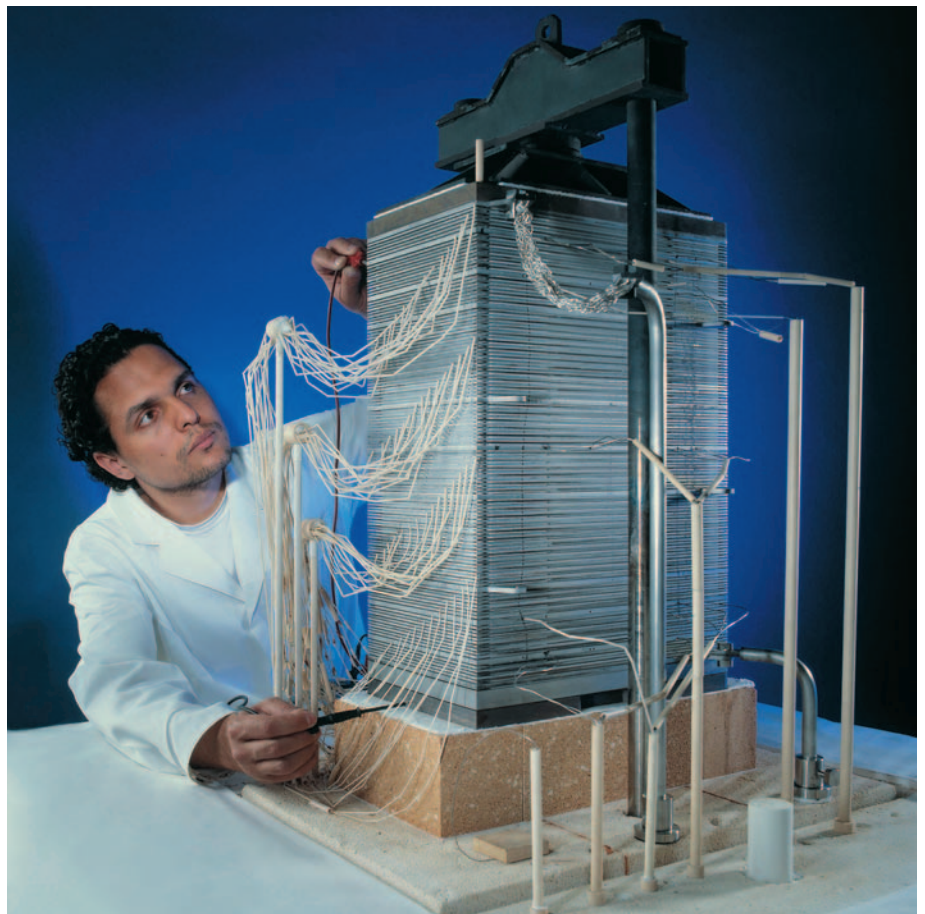
Brennstoffzellen – Made in Jülich: Das sind Weltbestleistungen am laufenden Band. Schon drei Mal stellten Jülicher Wissenschaftler einen Weltrekord auf, wenn es darum ging, elektrischen Strom aus Hochtemperatur-Brennstoffzellen zu gewinnen. Mit Wasserstoff betrieben, lieferte ein Stapel aus 60 flachen Solid Oxide Fuel Cells (SOFCs) eine Leistung von 13,3 Kilowatt – genug um ein Mehrfamilienhaus mit Strom zu versorgen. Das Ziel einer nachhaltigen Energieversorgung rückt ein Stück näher.

Elektrizität mit Brennstoffzellen zu erzeugen, bietet viele Vorteile: Da sie chemische Energie direkt in Strom wandeln (siehe Kasten „Lautloser Knalleffekt“), holen sie weit mehr aus Energieträgern heraus als herkömmliche Motoren oder Kraftwerke. Denn es entfällt der verlustreiche Umweg über die Erzeugung von Wärme und Bewegung – etwa beim Betrieb eines Kraftwerks mit Turbine und Generator. Auch schonen Brennstoffzellen das Klima: Werden sie mit reinem Wasserstoff betrieben, entsteht keinerlei Kohlendioxid; aber auch, wenn Erdgas als Brenngas dient, fallen pro Kilowatt Leistung weit weniger klimaschädliche Gase an als in Verbrennungs-

motoren oder Heizkesseln. Und da sich in Brennstoffzellen nichts bewegt außer Ionen und Elektronen, erzeugen sie keinen Lärm und keine Erschütterungen.

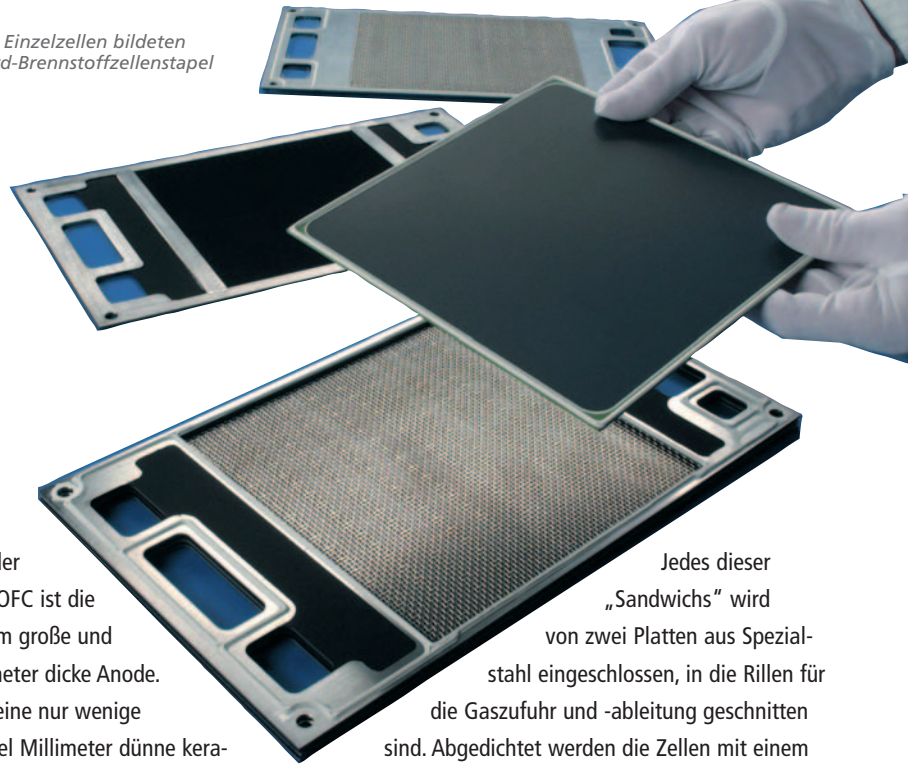
SOFCs – vielseitige Power-Pakete

Brennstoffzellen vom Typ SOFC, bei denen die Elektrolytschicht zwischen den Elektroden aus einem keramischen Material besteht, sind für viele Zwecke besonders vielversprechend. Dr. Robert Steinberger-Wilckens, Leiter des Projekts Brennstoffzelle am Forschungszentrum Jülich, erläutert: „SOFCs erreichen nicht nur den höchsten Wirkungsgrad aller Brennstoffzellen, sondern sind auch besonders kompakt.“



Umweltfreundlich und effizient erzeugt dieser Brennstoffzellenstapel genügend Strom, um ein Mehrfamilienhaus zu versorgen. Mit seinen Leistungswerten setzte er sich 2004 an die Weltspitze.

60 solcher Einzelzellen bildeten den Rekord-Brennstoffzellenstapel von 2004.



Außerdem lassen sie sich mit allen möglichen Brennstoffen betreiben, von Wasserstoff über Erdgas bis zu Diesel-Reformat.“ Dabei ist es nicht notwendig, Erd- oder Biogas extra aufzubereiten – zu reformieren, wie die Fachleute sagen. Bei der Betriebstemperatur der SOFC, um die 750 Grad, entstehen aus Methan und Wasser direkt an der Nickel-haltigen Anode Kohlendioxid und Wasserstoff. Künftig könnten SOFCs ein ganzes Spektrum von Aufgaben erfüllen, sei es in dezentralen Heizkraftwerken, in Kältemaschinen oder auch bei der Bordstromversorgung von Kraftfahrzeugen (siehe „Mehr Strom fürs Auto, S. 10).

Zentrales Element der Jülicher SOFC ist die 20 x 20 cm große und 1,5 Millimeter dicke Anode. Sie trägt eine nur wenige hundertstel Millimeter dünne keramische Schicht aus Yttrium-stabilisiertem Zirkonoxid, die wie ein Elektrolyt Strom leiten kann. Auf dieser Elektrolytschicht liegt eine etwa ebenso dünne Kathode auf.

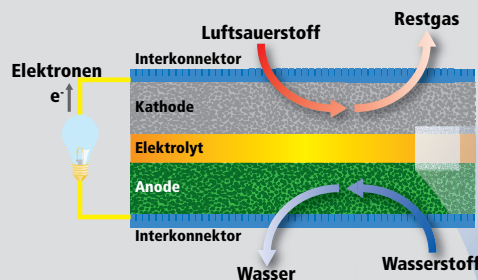
Jedes dieser „Sandwichs“ wird von zwei Platten aus Spezialstahl eingeschlossen, in die Rillen für die Gaszufuhr und -ableitung geschnitten sind. Abgedichtet werden die Zellen mit einem glaskeramischen Werkstoff. 60 solcher Zellen wurden zu einem „Stack“ aufeinander gestapelt und zusammenschaltet, um die Rekordleistung zu erzielen.

Lautloser Knalleffekt

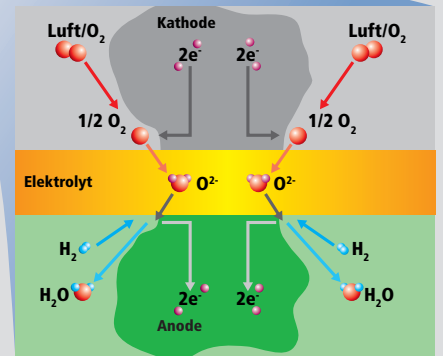
> Wer Wasser in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff aufspalten will, muss für diesen Vorgang – die Elektrolyse – Energie aufwenden. Beim umgekehrten Ablauf, wenn die beiden Gase sich zu Wasser vereinigen, wird Energie frei. Mit Knalleffekt verpufft sie im Chemieunterricht, wenn der Lehrer die klassische Knallgasreaktion vorführt. In Brennstoffzellen lässt sich die Reaktion steuern und die freigesetzte Energie in elektrischen Strom umwandeln.

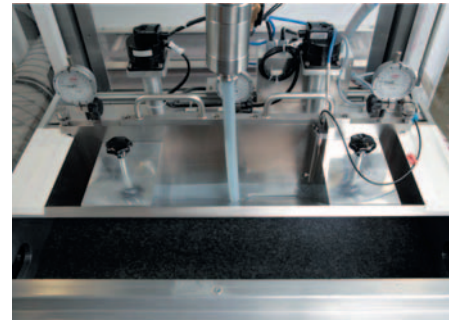
Technisch wurden unterschiedliche Typen von Brennstoffzellen entwickelt: Einige funktionieren bei hohen, andere bei niedrigen Temperaturen; manche bestehen ausschließlich aus festen Werkstoffen, andere enthalten einen flüssigen Elektrolyten.

Im Prinzip aber läuft stets der gleiche Vorgang ab: Zwei Elektroden sind über einen elektrischen Leiter miteinander verbunden, zwischen ihnen befindet sich ein für Gase undurchlässiger Elektrolyt. An einer Elektrode, der Anode,



wird Wasserstoff oder ein wasserstoffhaltiges Gas zugeführt. Der Wasserstoff wird an dieser mit einem Katalysator beschichteten Elektrode oxidiert – also in Elektronen und Protonen zerlegt; die Elektronen fließen durch den Leiter zur belüfteten Kathode. Dort reduzieren sie den Luftsauerstoff zu negativ geladene Sauerstoffionen. Durch den Elektrolyten gelangen positiv geladene Protonen und negativ geladene Sauerstoff-Ionen zueinander und vereinigen sich zu Wasserdampf. Der Elektronenfluss in diesem Stromkreis ist als elektrische Leistung nutzbar.





Das Forschungszentrum Jülich steht nicht zufällig an der Weltspitze. „Wir befinden uns an einer wichtigen Schnittstelle zwischen Grundlagenforschung und industrienaher Entwicklung“, erklärt Prof. Detlef Stolten, Direktor am Institut für Werkstoffe und Verfahren der Energietechnik. „Anders als Industrieforscher müssen wir uns nicht am kurzfristigen ‚Return on Investment‘ orientieren, können also kontinuierlich an langfristigen Projekten für eine nachhaltige Energieversorgung arbeiten. Doch gleichzeitig haben wir durch zahlreiche Industriekooperationen einen engen Bezug zu den Anforderungen der Praxis.“ Das zeigen gemeinsame Projekte mit namhaften Firmen wie BMW, ThyssenKrupp, CeramTec oder Siemens.

Mit rund 160 Mitarbeitern ist das Jülicher Team die größte Arbeitsgruppe in der europäischen Brennstoffzellen-Forschung. „Ein großer Vorzug ist die Vielfalt unterschiedlicher Kompetenzen, die hier zusammenkommen – von der Elektrochemie über Werkstoff- und Verfahrenstechnik bis hin zu Simulationsverfahren und zur Systemanalyse“, betont Stolten. Weltmeister sind die Jülicher Forscher nicht nur beim Bau leistungsstarker Brennstoffzellen, sondern auch, wenn es gilt, die Vorgänge darin am Computer zu simulieren. Modellrechnungen – etwa zur Wasserstoffkonzentration oder zur Stromdichte im Stack während des Betriebes – liefern wichtige Erkenntnisse zur Optimierung des Systems. Wie der Vergleich mit Messungen am „Weltrekord-Stack“ zeigte, kommen diese Modellierungen der Realität sehr nahe. Sie ersparen so manches aufwändige Experiment.

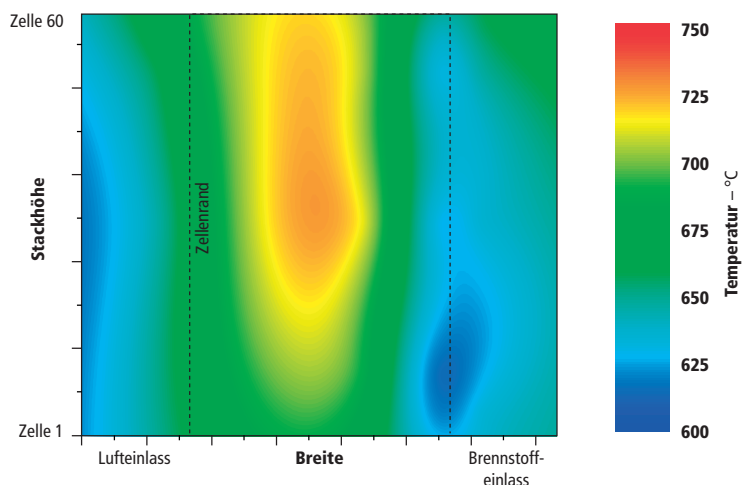
Jülicher Brennstoffzellen von Finnland bis Korea

Den geballten Sachverstand wissen Kooperationspartner aus aller Welt zu schätzen. So bauten Jülicher Wissenschaftler im November 2004 einen Stack aus 40 Zellen im Korean Institute for Energy Research auf. Die Koreanischen Forscher wollen versuchen, den SOFC-Stack bei höherem Druck zu betreiben und ihn mit einer Gasturbine zu kombinieren. Damit ließe sich der Wirkungsgrad weiter steigern. Ein kleinerer Stapel mit zehn Ebenen wurde beim Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus (VTT), dem Technischen Forschungszentrum Finnlands in Espoo, installiert. „Beide Stacks funktionieren sofort problemlos – ein Beweis für die Robustheit der in Jülich entwickelten SOFC-Technologie“, freut sich Steinberger-Wilckens.

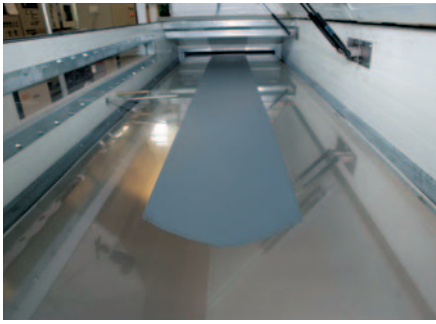
Auf ihren Lorbeeren ausruhen können sich die SOFC-Entwickler dennoch nicht. Für einen breiten Einsatz dieser Brennstoffzellen in der Praxis sind noch Entwicklungsarbeiten erforderlich. Zum einen sollen die Herstellungskosten durch Einsatz von industrienahen Fertigungs-

verfahren weiter sinken. Fortschritte gegenüber den ersten, quasi noch in Handarbeit gefertigten Zellen gibt es längst. So wird das Anodenmaterial heute in den Jülicher Labors mit einem in der Massenproduktion üblichen Verfahren, dem Foliengießen, produziert. Künftig wollen die Forscher Methoden aus der Halbleiterindustrie entlehnen, um noch dünnere Schichten zu erzeugen. Dazu gehört beispielsweise die „Chemical Vapor Deposition“, bei der das Schichtmaterial durch Reaktion von gasförmigen Vorläufern entsteht und sich auf der Oberfläche abscheidet.

Zum anderen gilt es, Komponenten und Werkstoffe weiter zu entwickeln. „Die Materialien in der SOFC müssen extremen und nicht selten widersprüchlichen Anforderungen genügen“, erklärt Dr. Hans-Peter Buchkremer, der für die Werkstoffe und Bauteile der Hochtemperatur-Brennstoffzelle verantwortlich ist. „Sie sollen bei der Betriebstemperatur der SOFC mechanisch stabil und elektrochemisch aktiv sein, aber keine unerwünschten Reaktionen miteinander eingehen.“



Wie diese Messung zeigt, herrscht in einem Brennstoffzellenstapel nicht überall die gleiche Temperatur: In den unteren Einzelzellen ist sie niedriger als in den oberen. Auch die Aufbereitung – Reformierung – des Brenngases führt zur Abkühlung, wie man an dem dunkelblau gefärbten Bereich nahe am Brenngaseintritt erkennen kann.



Das Anodenmaterial der Jülicher Hochtemperatur-Brennstoffzellen (SOFCs) wird durch ein industrienahe Verfahren, das Foliengießen, hergestellt. Ein Techniker gießt zunächst (Bildfolge von links nach rechts, erstes Bild) das Ausgangsmaterial in den Vorratsbehälter. Von da aus gelangt dieser so genannte Schlicker in eine Dosiereinheit (zweites Bild). Anschließend läuft er auf eine Kunststoffolie, auf der er maschinell wortwörtlich in Form gebracht wird. Eine Keramikfolie (drittes Bild) ist entstanden, die trocknen muss. Sie kann anschließend gesägt, gestanzt oder zugeschnitten werden (letztes Bild).

Kälter ist billiger

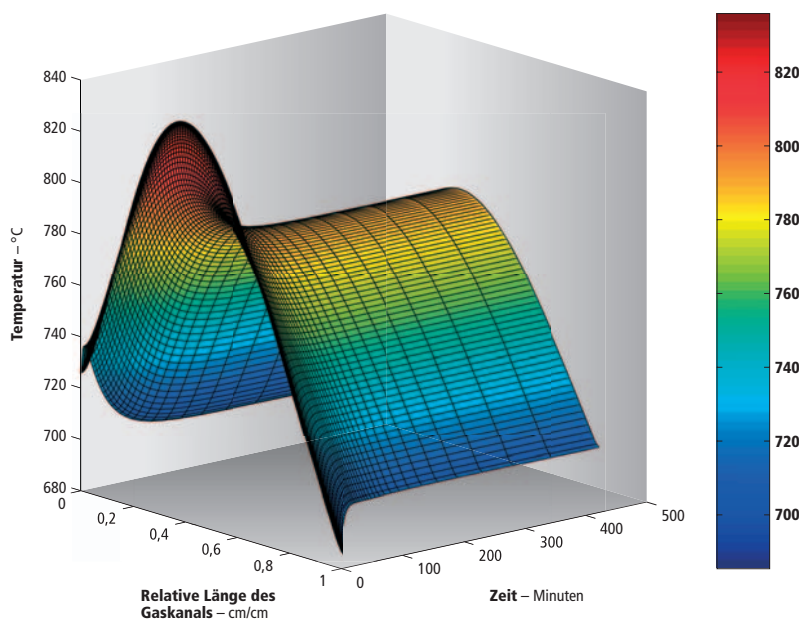
Wie man unterschiedlichste Ansprüche unter einen Hut bringt, zeigen die Jülicher Forscher an der neu entwickelten Hochleistungskathode. Damit Sauerstoff reduziert werden kann, muss diese Elektrode gasdurchlässig sein und leitfähig für Elektronen sowie Sauerstoff-Ionen; gleichzeitig soll sich der Kathoden-Werkstoff mit dem angrenzenden Elektrolyt-Material vertragen – weder darf es chemische Wechselwirkungen geben noch soll sich die Kathode bei Temperaturänderungen mechanisch anders verhalten als der Elektrolyt. Diesem Anforderungsprofil kommt das bislang verwendete Keramikmaterial – ein spezieller Perowskit – zwar nahe. Doch bei Temperaturen unterhalb von 800 Grad vermittelt es die Elektronenabgabe an die Sauerstoffatome der Umgebung nur schleppend. Die Jülicher Forscher fügten dem Perowskit gezielt bestimmte Mengen Eisen und Kobalt hinzu. „Jetzt ist die Kathode schon bei Temperaturen um 700 Grad aktiv“,

berichtet Buchkremer. Auch der neue Kathoden-Werkstoff habe allerdings noch seine Schwachstellen. „Er dehnt sich bei Erwärmung stärker aus als der Elektrolyt und reagiert chemisch mit diesem. Aber mit einer Zwischenschicht verhindern wir, dass an der Grenzfläche Phasen gebildet werden, die elektrisch schlecht leiten.“

Die Jülicher Wissenschaftler arbeiten intensiv an der weiteren Optimierung des Materials. Denn niedrigere Betriebstemperaturen bringen enorme Vorteile: „Wenn es gelingt, die Temperatur um 100 Grad zu senken, verlängert das die Lebensdauer eines Stacks um das Zehnfache“, erläutert Steinberger-Wilckens. Auch steigt bei geringeren Betriebstemperaturen die Auswahl der verwendbaren Materialien für die übrigen Bauteile – der Stack wird damit deutlich billiger. Niedrigere Kosten und längere Lebensdauer aber sind entscheidende Voraussetzung dafür, dass Brennstoffzellen sich kommerziell durchsetzen können. „Dies passiert

zunächst sicher in Nischenmärkten – etwa zur Energieversorgung an Bord von Fahrzeugen oder an netzfernen Orten, beispielsweise zur Baustellenversorgung, zur Stromversorgung von Relaisstationen oder zur Überwachung von Pipelines. Mit steigenden Umweltauflagen wird die SOFC auch in anderen Anwendungsbereichen konkurrenzfähig werden“, ist Steinberger-Wilckens überzeugt.

Wiebke Rögener



Computersimulationen helfen den Jülicher Wissenschaftlern, ihre Brennstoffzellen-Anlagen zu verbessern. Hier haben sie vorausgerechnet, wie sich eine reduzierte Stromabnahme auf die Temperatur entlang einer Brennstoffzellen-Ebene auswirkt.

Mehr Strom fürs Auto

Die gute alte Lichtmaschine stößt an ihre Grenzen, denn moderne Autos brauchen immer mehr Strom. Hochtemperatur-Brennstoffzellen könnten die benötigte Energie sehr effektiv und umweltfreundlich bereitstellen. Gemeinsam mit Industrieunternehmen arbeiten Jülicher Wissenschaftler daran, dieses Konzept in die Praxis umzusetzen. Ein wichtiger Schritt gelang ihnen mit der Entwicklung einer besonders widerstandsfähigen Metalllegierung, die inzwischen industriell gefertigt wird.

Wer ein Automobil der oberen Preisklasse erwirbt, erwartet weit mehr als nur einen fahrbaren Untersatz. Vom Navigationssystem über Klimaanlage und Sitzheizung bis zum elektronischen Radarsystem – zahlreiche Einrichtungen erhöhen schon jetzt Sicherheit und Komfort oder werden in naher Zukunft verfügbar sein. Doch sie brauchen Energie. Rund fünfmal so viel Leistung wie vor 25 Jahren muss die Lichtmaschine eines Wagens mit gehobener Ausstattung heute erbringen. Das treibt den Benzinverbrauch und den Ausstoß von Abgasen in die Höhe, zumal die Stromproduktion per Lichtmaschine nicht gerade eine effektive Art ist, die Energie aus Benzin oder Diesel zu nutzen. Auf dem Umweg über Motor und Mechanik geht der überwiegende Teil der im Treibstoff enthaltenen Energie verloren. Höchstens 17 Prozent werden für die Bordstromversorgung nutzbar. Zusätzliche Wunschausstattungen – etwa eine Standheizung oder Klimaanlage bei ausgeschaltetem Motor – lassen sich bei diesen Wirkungsgraden kaum realisieren.

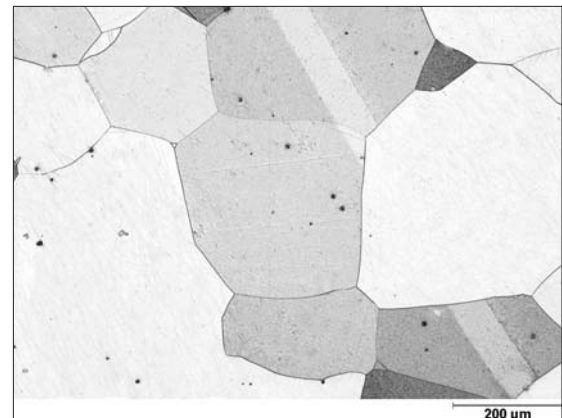
Fahrzeugproduzenten sind daher auf der Suche nach neuen Energiequellen für die Bordstromversorgung. Diese Lücke füllen Hochtemperatur-Brennstoffzellen, auch SOFC genannt (siehe auch „Energiebündel auf Rekordkurs“, S. 6). „Mit SOFCs lassen sich elektrische Wirkungsgrade bis etwa 50 Prozent erreichen“, sagt Dr. Martin Bram. Der Experte vom Institut für Werkstoffe und Verfahren der Energietechnik weiter: „Außerdem liefern die Brennstoffzellen auch dann Strom, wenn der Motor nicht läuft.“ Ideal für die Standheizung also. Zusammen mit dem Automobilhersteller BMW und acht weiteren Partnern arbeitet das Forschungszentrum Jülich daran, eine solche Stromversorgung, im Fachjargon „Auxiliary



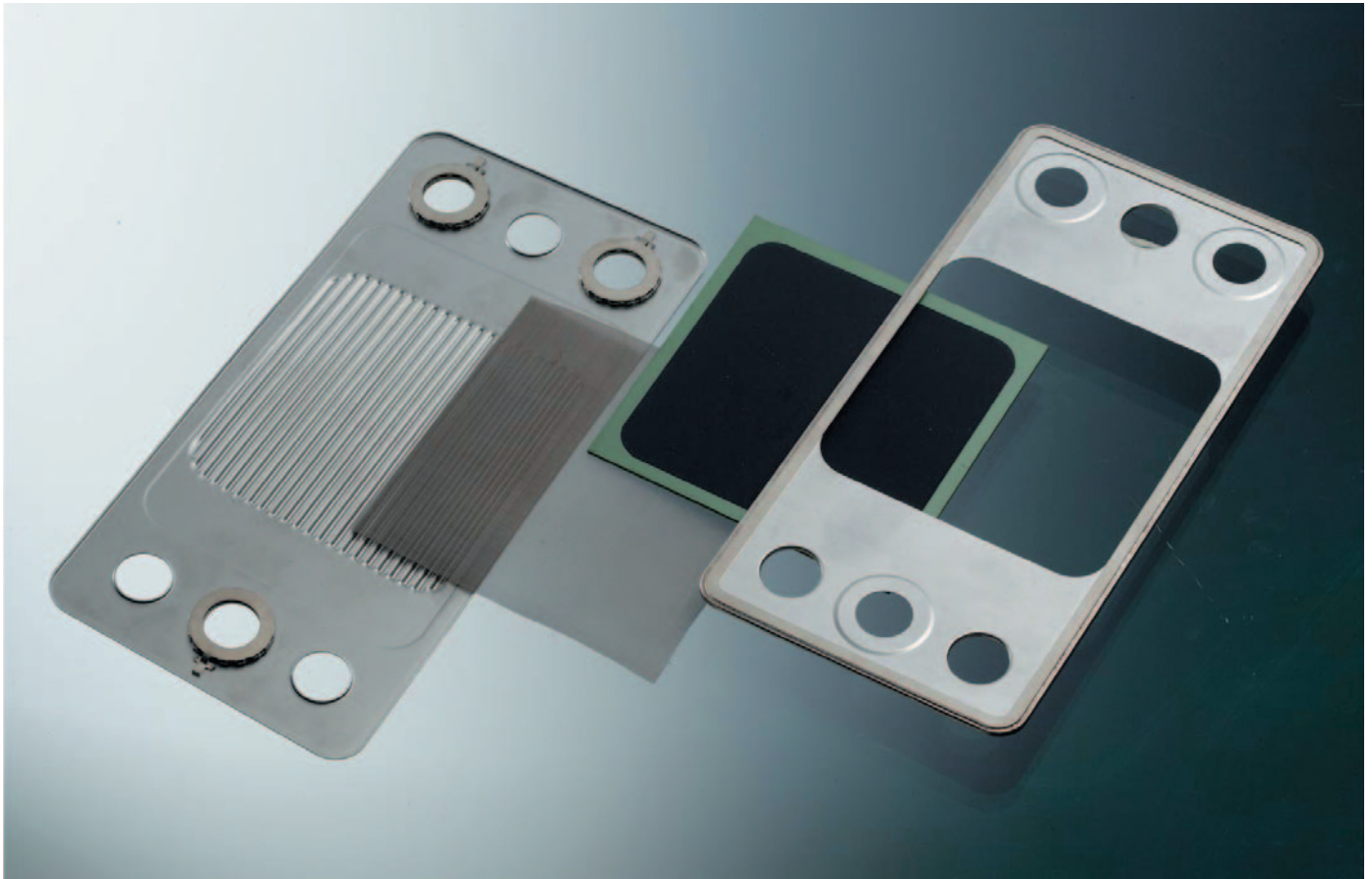
Foto: BMW Group

Power Unit“ (APU) genannt, in den nächsten Jahren zu realisieren. Durch ihre kompakte Bauweise empfiehlt sich die Hochtemperatur-Brennstoffzelle besonders für den Einsatz als APU in Autos.

Die hohe Betriebstemperatur der SOFC – um die 800 Grad – ist auf der einen Seite ein wichtiger Vorteil im Vergleich zu anderen Brennstoffzellen, da eine aufwändige Gasreinigung des reformierten Treibstoffs entfällt. So kann unter anderem Kohlenmonoxid, das für andere Brennstoffzellen Gift ist, direkt verbrannt werden. Und das anfallende Wasser verdampft einfach, muss also nicht wie bei



Ein Blick durch das Lichtmikroskop zeigt die Mikrostruktur der Jülicher Metalllegierung, die inzwischen von ThyssenKrupp industriell gefertigt und von BMW erprobt wird.



Niedrigtemperatur-Brennstoffzellen extra aus der APU abgeleitet werden. Andererseits stellt aber die Hitze hohe Anforderungen an das Material, beispielsweise an das Metall, aus dem die so genannten Interkonnektoren gefertigt werden.

Diese Bauteile koppeln die einzelnen Zellen miteinander zu einem Stapel – einem Stack – und stellen die elektrischen Verbindungen her. Wie in einem Sandwich liegen Elektroden und

Elektrolyt zwischen diesen Metallplatten. Damit sich keine Risse bilden, darf sich der metallische Werkstoff nicht stärker ausdehnen als die keramischen Bauteile. Um das zu erreichen, wird dem Stahl ein hoher Chromanteil zugesetzt, der zudem die Langlebigkeit der Platten erhöht. Der Nachteil: Ein Teil des Chroms verdampft bei hohen Temperaturen und lagert sich an der Grenzfläche zwischen Kathode und Elektrolyt ab. Damit aber verschlechtert sich die Leistung der Zelle.

Schützende Barriere

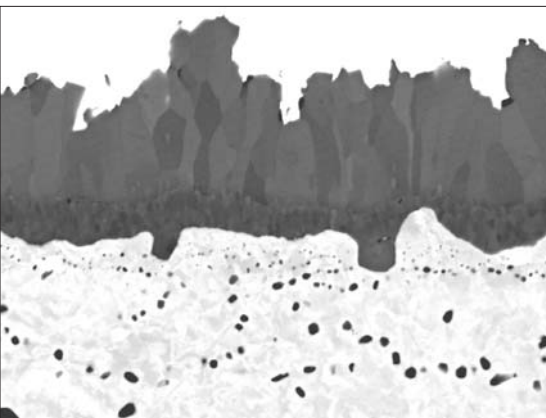
Einem Jülicher Forscherteam unter Leitung von Dr. Willem Quadackers gelang die Lösung des Problems: Die Forscher fügten der Metalllegierung unter anderem Lanthan, Titan und Mangan hinzu. Das Material bildet jetzt beim Betrieb der Brennstoffzelle eine Schicht aus Chrom- und Manganoxid auf der Oberfläche. Sie ist fest mit dem darunter liegenden Metall verbunden und reißt auch bei starken Temperaturveränderungen nicht. Die Schutzschicht verhindert das Abdampfen des Chroms und erhöht so Stabilität und Leistungsfähigkeit der SOFC. Inzwischen wird der Hightech-Werkstoff

Fensterblech, Brennstoffzelle, Nickelnetz und Interkonnektor (von rechts nach links) bilden eine Baueinheit, die – vielfach wiederholt – ein Aggregat zur Auto-Bordstromversorgung ergibt. Die dunkle Fläche der Brennstoffzelle ist die Kathode, die Anode befindet sich auf ihrer hier nicht sichtbaren Rückseite.

aus der Jülicher Ideenschmiede vom Unternehmen ThyssenKrupp unter dem Namen „Cofer 22 APU“ industriell hergestellt.

Damit sind aber noch nicht alle Probleme bewältigt. „Der Stack muss vor allem schneller starten als das bisher möglich ist“, erklärt Bram. Noch dauert es mindestens eine halbe Stunde, bis das Aggregat auf 800 Grad aufgeheizt ist – viel zu lange für den eiligen Automobilisten. Höchstens zwei Minuten sind das Ziel – das bedeutet eine enorme Beanspruchung des Materials. Doch die Jülicher Forscher sind zuversichtlich, auch diese Schwierigkeit zu meistern. „Die Ansprüche an die Werkstoffe in Brennstoffzellen-Stacks sind zwar oft widersprüchlich“, so Willem Quadackers. „Wie das Beispiel Crofer 22 APU zeigt, heißt das aber nicht, dass sie unlösbar sind.“

Wiebke Rögner



Als dunkle Schicht ist im Rasterelektronenmikroskop die schützende Barriere erkennbar, die der Jülicher Werkstoff nach 6000 Stunden an der Luft bei 800 Grad Celsius ausgebildet hat.

Vollgetankt mit Alkohol

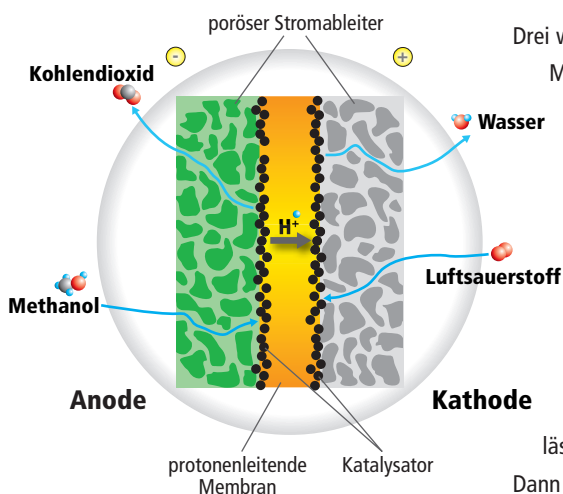
Das klingt fast zu utopisch: Ein Fahrzeug, das weder Benzin noch Diesel verbrennt, aber auch keinen Strom aus der Steckdose braucht. Doch das umweltfreundliche Gefährt rollt bereits. Angetrieben von Brennstoffzellen kann JuMOVE, so sein Name, bis zu 120 Kilometer zurücklegen, bevor es aufgetankt werden muss. Den sauberen Antrieb des Prototyps entwickelten Jülicher Wissenschaftler – von der Materialforschung bis zum praxisreifen System.

Wer ein Fahrzeug lenkt, sollte auf alkoholische Getränke verzichten. Im Tank dagegen kann sich Alkohol nützlich machen – in diesem Fall das Methanol. So lassen sich Verbrennungsmotoren mit Methanol oder einem Methanol-Benzin-Gemisch betreiben. Brennstoffzellen nutzen jedoch die im Treibstoff enthaltene Energie weit effektiver. Methanol kann zur Erzeugung von Wasserstoff dienen, der dann in der konventionellen Brennstoffzelle Energie liefert. Das Fahrzeug muss dafür mit einem so genannten Reformer ausgestattet werden, der Wasser und Methanol in ein wasserstoffreiches Gasgemisch umwandelt.

Einfach praktisch

Einfacher geht es mit Direktmethanol-Brennstoffzellen (DMFCs). Denn sie nutzen Methanol ohne Umweg für die Stromerzeugung, sie benötigen also keinen gasförmigen Wasserstoff und damit keinen Reformer mit nachgeschalteter Gasaufbereitung. Äußerst praktisch, denn flüssiges Methanol ist leichter zu handhaben und zu lagern als Wasserstoff; es braucht keinen druckfesten Gasbehälter, und das Fahrzeug kann wie gewohnt betankt werden.

Schematischer Aufbau der Membran-Elektroden-einheit. Aus Methanol und Luftsauerstoff entstehen Kohlendioxid, Wasser – und Strom.



Drei wichtige Ziele gibt es bei der Entwicklung Methanol-getriebener Aggregate: mehr Unabhängigkeit vom Erdöl, bessere Luftqualität und geringerer Ausstoß von Treibhausgasen. „Noch wird Methanol zwar meist aus Erdgas gewonnen, ist also kein regenerativer Rohstoff“, erläutert Prof. Bernd Höhle, der am Institut für Werkstoffe und Verfahren der Energietechnik den Bereich Verfahrensanalyse leitete. „Aber Methanol lässt sich auch aus Biomasse herstellen. Dann wird beim Betrieb der DMFC nicht mehr



Sichtlich Spaß hat Prof. Detlef Stolten, Direktor am Institut für Werkstoffe und Verfahren der Energietechnik, bei einer Probefahrt mit dem Brennstoffzellen-Flitzer „JuMOVE“.

Kohlendioxid frei, als die Pflanzen vorher der Atmosphäre entzogen haben.“ DMFCs könnten so einen wichtigen Beitrag zum Klimaschutz leisten.

Kernstück der DMFC ist die Membran-Elektroden-Einheit: Zwischen zwei porösen Elektroden, die mit einem Katalysator beschichtet sind, liegt eine Kunststoffolie, die für Protonen, also positiv geladene Wasserstoff-Teilchen, durchlässig ist. Die Membran trennt verdünntes Methanol auf der Anodenseite von Luft auf der Kathodenseite. Bei Betriebstemperaturen um 70 Grad entsteht in einem Oxidationsprozess an der Anode aus dem Methanol Kohlendioxid, Protonen und Elektronen. Die Protonen wandern durch die Membran zur Kathode und reagieren dort mit dem Luftsauerstoff zu Wasser. Gleichzeitig fließen die Elektronen

über einen elektrischen Leiter von der Anode zur Kathode. Dieser Strom kann beispielsweise einen Elektromotor antreiben.

Dass ihr Konzept praxistauglich ist, haben die Jülicher Forscher mit dem Prototyp JuMOVE bewiesen. Als Basis verwendeten sie ein kommerziell erhältliches Elektrofahrzeug. Die klobigen Bleiakkus darin ersetzen sie durch ein Aggregat aus 100 DMFCs und einen leichten Lithium-Ionen-Akku. Mit diesem Hybridantrieb bringt JuMOVE es auf eine Geschwindigkeit

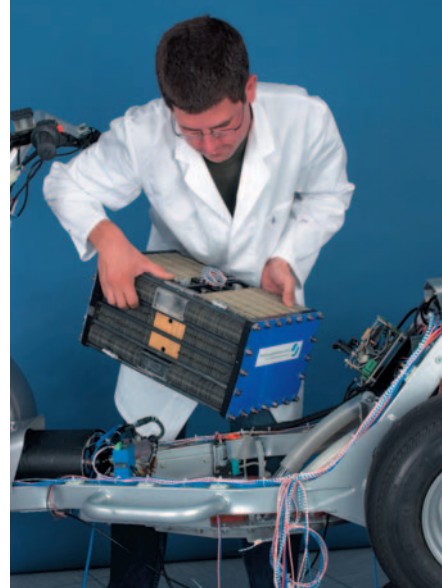
von 25 km/h. Bei normaler Fahrt treibt allein die Brennstoffzelle mit ihren 1,3 Kilowatt den Elektromotor an. Der kleine Akku verleiht bei besonderen Belastungen zusätzlichen Schub.

„Interessenten aus der Industrie für diesen Antrieb gibt es bereits“, berichtet Diplomingenieur Jürgen Mergel, Leiter der DMFC-Entwicklung. „Doch um konkurrenzfähig zu sein, muss die DMFC noch leistungsfähiger, langlebiger und preiswerter werden.“

Platin eingespart

„Wir können stabil und billig“ – mit diesem Slogan könnten die Jülicher Forscher für die bereits erzielten Entwicklungsfortschritte werben. So gelang es ihnen, die Hälfte des teuren Platinkatalysators an den Elektroden einzusparen, ohne dass die Leistung oder die Lebenszeit der Zelle darunter litten. Die Platinsmenge wurde von acht auf vier Milligramm pro Quadratmeter einer Zelle reduziert – das ist eine Ersparnis von rund 1,2 Gramm Edelmetall oder über 36 Euro pro Zelle beziehungsweise 3600 Euro pro JuMOVE. Auch wird für einige Bauteile statt Metall ein spezieller Graphit verwendet – er macht das Aggregat leichter und preiswerter.

Kosten senken kann man auch durch rationelle Fertigungsverfahren. Eine Maschine, die ursprünglich der Beschichtung von Textilien diente, wurde für die Herstellung von Komponenten der Membran-Elektroden-Einheit umgerüstet. Nun produziert sie in Jülich Elektroden am laufenden Band. „Bei dieser ‚Rakeltechnik‘ wird das pastenförmige Elektrodenmaterial mit einem Messer in gleichmäßig dünner Schicht auf ein Kohlenstoffgewebe aufgetragen, wie Butter aufs Brot“, beschreibt Mergel den Vorgang. Die verschiedenen Schichten werden getrocknet, erhitzt und



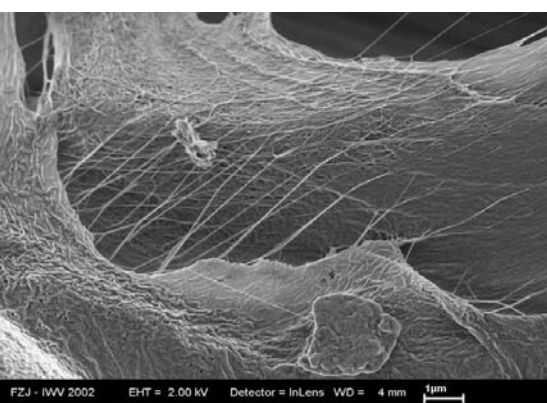
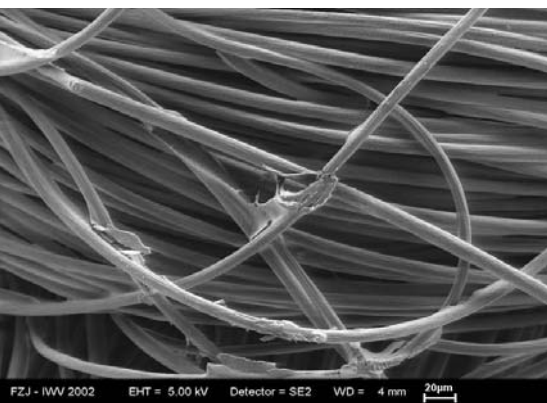
Einbau des Jülicher Brennstoffzellen-Stapels in ein umgebautes Elektrofahrzeug. Der Prototyp zeigt, dass Brennstoffzellen schon heute auch außerhalb des Labors einsetzbar sind.

schließlich heiß miteinander verpresst. Diese industrieähnliche Fertigung ist kostengünstig und sorgt für gleichbleibende Qualität.

Die Forscher um Mergel schauen zuversichtlich in die Zukunft. Sie werden die Technik weiter verbessern und zugleich die Kosten nochmals um etwa den Faktor 50 senken. In etwa drei Jahren, so schätzt Mergel, könnte die DMFC dann marktreif sein.

Wiebke Rögener

Elektroden am laufenden Band: Die Deskcoater-Maschine wurde ursprünglich entwickelt, um Textilien zu beschichten. Nach einer Umrüstung dient sie nun Jülicher Wissenschaftlern dazu, Komponenten der Membran-Elektroden-Einheiten von Brennstoffzellen kostengünstig und in hoher Qualität zu produzieren.



Bei der Herstellung der Gasdiffusionselektroden für die Direktmethanol-Brennstoffzelle wird das Elektrodenmaterial in dünner Schicht auf ein Kohlenstoffgewebe aufgetragen, das zuvor mit Teflon imprägniert wurde. Diese elektronenmikroskopischen Bilder zeigen, dass sich auf dem Kohlenstoffsubstrat Teflonfäden und -netze ausgebildet haben.

Hauchdünne Sonnenfänger

Kein Rauch, kein Lärm, keine Bewegung, aber jede Menge Energie – still und immer effektiver gewinnen Solarzellen Strom aus Licht. Weltweit wird mit ihnen bereits ein Umsatz von mehreren Milliarden Euro gemacht. Um sich auf breiter Front durchsetzen zu können, muss diese umweltfreundliche Technik aber künftig noch kostengünstiger werden und noch mehr leisten. Gut im Rennen liegen Dünnschichtszellen, die Jülicher Wissenschaftler entwickeln.

Solarzellen sind Hoffnungsträger einer nachhaltigen Energieversorgung – können sie doch den unerschöpflichen Rohstoff Sonnenlicht ganz ohne schädliche Nebenprodukte in Strom verwandeln. Und auch der Rohstoff, aus dem die Zellen meist gefertigt werden, steht praktisch unbegrenzt zur Verfügung: Silizium gibt es buchstäblich wie Sand am Meer. Scheiben aus kristallinem Silizium allerdings, aus denen Solarzellen heute in der Regel bestehen, sind nicht billig zu haben. Denn das Ausgangsmaterial muss zunächst gereinigt, dann geschmolzen, aufwändig kristallisiert und zuletzt in Scheiben zersägt werden. Das Resultat sind Solarmodule mit relativ hohen Wirkungsgraden – unter Laborbedingungen werden knapp 25 Prozent, im praktischen Einsatz 13 bis 14 Prozent des eingestrahnten Lichts in Strom umgesetzt. Doch der Herstellungsprozess ist teuer und verschlingt viel Energie.

Ersatz für teure Kristalle

Es geht auch günstiger: Statt der kostspieligen Kristallscheiben („Wafer“), die etwa einen drittel Millimeter dick sind, können weit dünnere Schichten aus Silizium das Licht einfangen und nutzbar machen. Sie werden kostengünstig aus einer gasförmigen Siliziumverbindung abgeschieden. Die Atome in der Schicht sind nicht wie bei einem Kristall perfekt geordnet, sondern bilden ein weniger

regelmäßiges Netzwerk, das außerdem Wasserstoffatome enthält. „Amorph“ (griechisch: formlos) nennen die Wissenschaftler diese Modifikation des Siliziums. Sie ist die Basis von Dünnschichtszellen. Dünn bedeutet hier eine Siliziumschicht von weniger als einem tausendstel Millimeter. Das spart Material und damit Kosten. „Auch verschlingt die Produktion weniger Energie. Es dauert also nicht so lange, bis man die Energie, die bei der Herstellung einer Zelle investiert wurde, wieder heraus hat“, erläutert Dr. Bernd Rech, der am Institut für Photovoltaik für die technologische Entwicklung der Dünnschichtszellen verantwortlich ist.

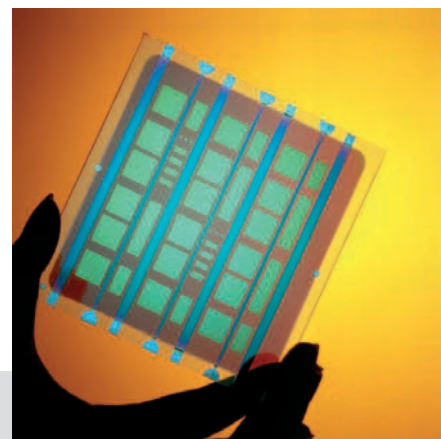
Ein weiterer Vorteil der ungeordneten Schichten: Sie lassen sich auf einer Vielzahl preiswerter Unterlagen erzeugen, beispielsweise auf Fensterglas, aber auch auf biegsamen Metall- oder Plastikfolien. Auch können große Flächen damit beschichtet werden. Das bietet viele Möglichkeiten, solche Solarzellen in Gebäude zu integrieren. Doch haben die preiswerten und vielseitigen Sonnenfänger auch Schattenseiten: Amorphes Silizium setzt weniger Lichtenergie in Strom um. „Im Laufe der Zeit wird die Leistung dann noch um 10 bis 30 Prozent schlechter – die Zelle altert“, sagt Rech. Erst nach einigen hundert Betriebsstunden ist der Wirkungsgrad amorpher Solarzellen stabil und dann nur etwa halb so groß wie bei Zellen aus kristallinem Silizium.

Dünn, aber leistungsfähig

Um mit dünnen Siliziumschichten mehr Strom aus dem Sonnenlicht herauszuholen, setzen die Jülicher Solarenergie-Forscher auf eine dritte Variante, das mikrokristalline Silizium. Säulenartig angeordnet stecken hier winzige kristalline Körner – Kristallite – in einer Schicht

Mehrere Ansichten in einem Bild: Gezeigt sind Vorder- und Rückseite einer Solarzelle sowie im Hintergrund ihre einzelnen Schichten.



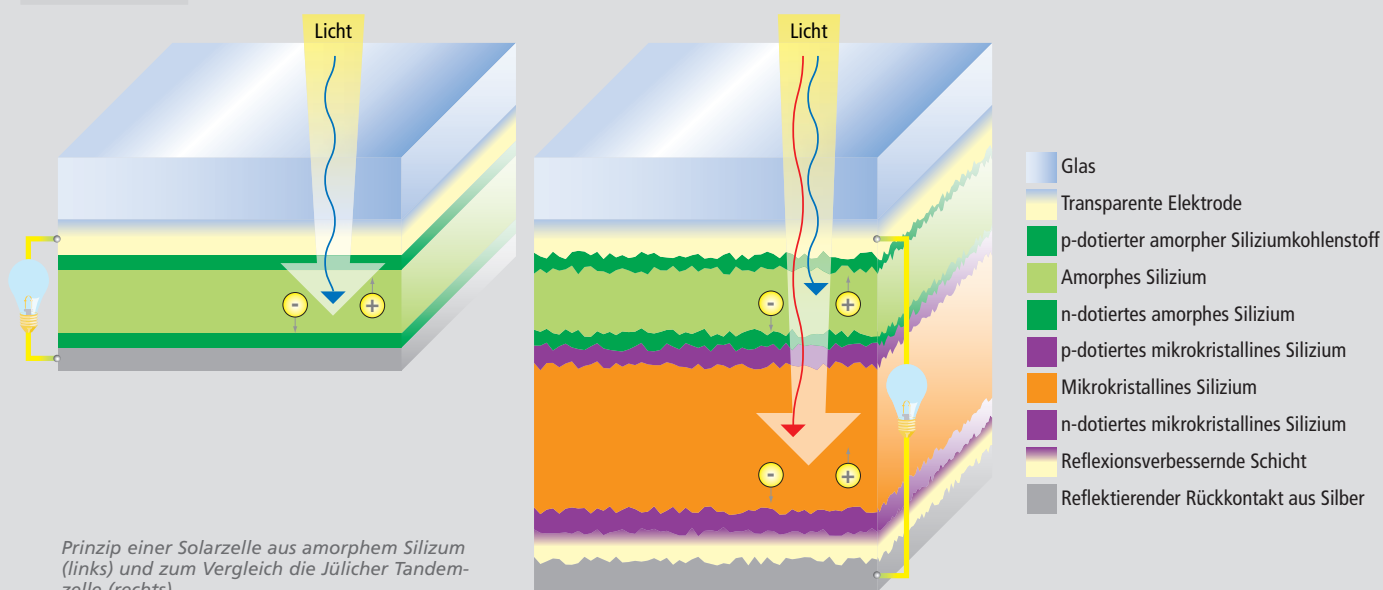


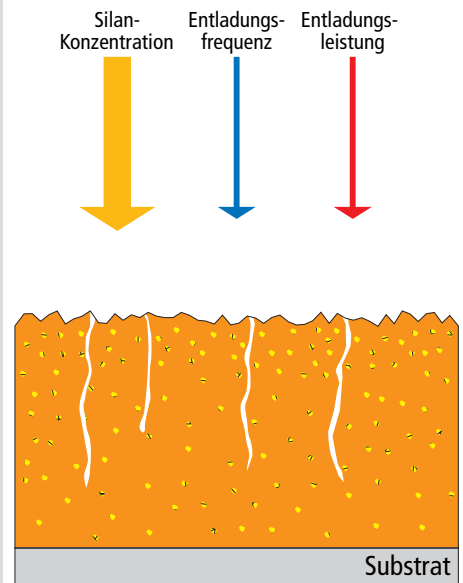
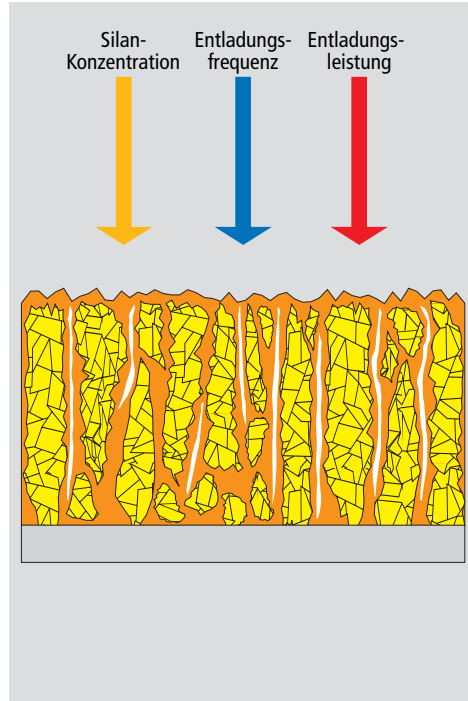
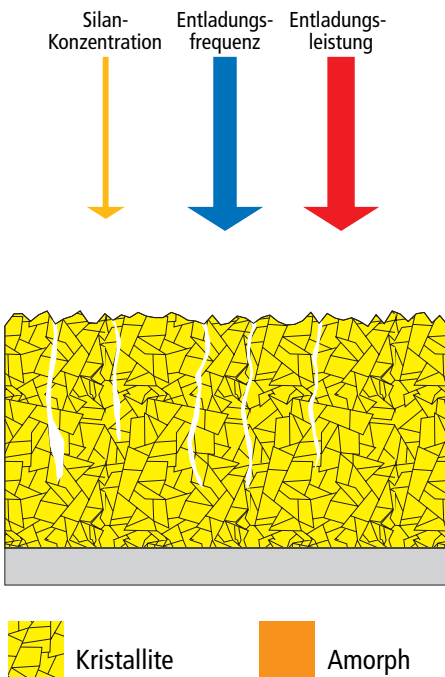
Von der Sonne zur Steckdose – wie's funktioniert

> Damit aus Licht Strom werden kann, sind drei Schritte nötig: Die Lichtteilchen müssen zunächst eingefangen werden. Ihre Energie muss bewegliche Ladungsträger erzeugen, und schließlich gilt es, diese positiven und negativen Ladungsträger zu trennen. All das geschieht, wenn Licht auf ein geeignetes Material trifft, wie der Physiker Antoine Cesar Becquerel schon 1839 feststellte. 1905 gelang es Albert Einstein, diesen Fotoeffekt zu erklären. Er griff dabei die Vorstellung auf, dass Licht nur in bestimmten Portionen – Quanten – Energie aufnehmen oder abgeben kann. Eine solche Energieportion kann Elektronen beispielsweise aus einem Metall herauslösen (äußerer fotoelektrischer Effekt) oder sie in einem Halbleiter auf ein höheres Energieniveau befördern (innerer fotoelektrischer Effekt). „Für die Entdeckung des Gesetzes des fotoelektrischen Effektes“ erhielt Einstein 1921 den Nobelpreis.

Halbleiter sind Stoffe, die bei Zufuhr von Wärme oder Licht elektrisch leitend werden, sonst aber isolierend wirken. Die Elektronen darin können nur ganz bestimmte Energieniveaus einnehmen – Fachleute sprechen von Bändern. Dazwischen befinden sich Bereiche, die gleichsam ein Schild „Für Elektronen verboten“ tragen. Bei einem Halbleiter befinden sich im Dunkeln die energiereichsten Elektronen im so genannten Valenzband, das voll besetzt ist. Hier gilt: „Das Boot ist voll, und keiner bewegt sich“ – es gibt also keine frei beweglichen Ladungen. Doch Lichtteilchen helfen den Elektronen auf die Sprünge. Einige von ihnen gelangen über die verbotene Zone hinweg in das so genannte Leitungsband – es entstehen frei bewegliche negative Ladungen. Zurück bleiben positiv geladene „Löcher“. Zur Herstellung einer Solarzelle werden Halbleitermaterialien gezielt verunreinigt –

„dotiert“ sagen die Physiker: In einem Bereich werden Atome mit Elektronenüberschuss, beispielsweise Phosphor, unter das Silizium gemengt. Dieser Bereich heißt dann n-dotiert. Ein anderes Gebiet wird p-dotiert, d.h. es werden Atome zugesetzt, die gegenüber dem Silizium einen Elektronenmangel aufweisen, etwa das Element Bor. So entsteht ein elektrisches Feld, in dem die verschiedenen durch die Lichtteilchen erzeugten Ladungsträger getrennte Wege gehen – Elektronen wandern Richtung n-Schicht, die Löcher zur p-Schicht. Werden die beiden Bereiche über einen elektrischen Leiter verbunden, fließen die Elektronen durch diesen von der n- zur p-Schicht zurück – es fließt also Strom. <





Viele Faktoren bestimmen, in welcher Form sich Silizium aus gasförmigen Siliziumverbindungen abscheidet. Jülicher Forscher können sehr gezielt eine Silizium-Variante (Mitte) herstellen, in der kristalline Körner säulenartig in amorphem Material verteilt sind. Diese Variante ist für Solarzellen besonders vorteilhaft.

aus amorphem Material. Diese Kombination aus Ordnung und Unordnung vereint Vorteile beider Silizium-Varianten. Mikrokristallines Silizium erreicht höhere Wirkungsgrade als amorphes und altert kaum, ist aber ebenso günstig herzustellen. Im Forschungszentrum Jülich verbessern Wissenschaftler seit 1995 Dünnschichtzellen aus diesem vielversprechenden Material. Sie gehören somit zu den Pionieren dieser Technologie. „Inzwischen haben wir große Fortschritte im Produktionsverfahren erzielt“, freut sich Dr. Friedhelm Finger, Rechtskollege in Jülich.

Der wichtigste Herstellungsprozess für Dünnschichtsolarzellen ist die „Plasmaunterstützte Gasphasenabscheidung“. Dabei befindet sich das Substrat – eine Glasplatte, die mit einem durchsichtigen und leitfähigen Oxid, beispielsweise Zinkoxid (ZnO), beschichtet ist – zwischen zwei Elektroden in einer Kammer. Diese enthält Silan, eine gasförmige Verbindung aus Silizium und Wasserstoff, sowie molekularen Wasserstoff. Diese Mischung hat sich für den Herstellungsprozess als vorteilhaft erwiesen. Herkömmlich wird Silan in einer Hochfrequenzentladung bei niedrigem Druck aufgebrochen,

und das Silizium lagert sich auf dem Substrat ab. „Bessere Ergebnisse ergibt jedoch unser neuer Produktionsprozess: Dazu verwenden wir hohen Druck und hohe Entladungsleistung“, erläutert Finger. Dadurch entstehen gleichmäßigere Schichten, je nach Produktionsbedingungen aus amorphem oder mikrokristallinem Silizium. Bei der Entladung wählen die Jülicher Forscher meist eine Frequenz von 13 Megahertz, da diese in der Industrie bereits für viele Zwecke eingesetzt wird.

Mehr Licht fangen

Mikrokristallines Silizium wandelt einzelne eingefangene Lichtteilchen zwar effektiver in Strom um als amorphes. Doch lässt es mehr Lichtteilchen völlig ungenutzt passieren. Um die gleiche Menge Photonen zu absorbieren, müssen die Schichten rund fünf mal dicker sein als bei Zellen aus amorphem Material. „Daher ist es wichtig, dass wir bei der Herstellung eine hohe Depositionsrate erzielen,“ betont Rech, „das heißt, die Schichten müssen schneller wachsen, damit der Prozess wirtschaftlich ist.“ Wachstumsraten von etwa 1,5 Nanometern (Milliardstel Metern) pro Sekunde haben die Jülicher Forscher bereits erreicht und benötigen

damit nur zehn Minuten für eine typische Schichtdicke von rund einem Mikrometer. „Wir kommen hier bereits in den Bereich, der für die industrielle Fertigung interessant ist“, so Finger. Zusätzlich wenden die Forscher einen Trick an, um die Lichtabsorption zu erhöhen: Sie behandeln die ZnO-Schicht mit Säure. So entsteht eine raue Oberfläche, die das Licht streut wie eine Milchglasscheibe. Zusammen mit einer Spiegelschicht auf der Rückseite der Solarzelle fängt sie das Licht gleichsam ein: Der Weg der Lichtteilchen durch das Silizium wird dadurch um ein Vielfaches länger und die Chance, dass sie zur Stromgewinnung beitragen, größer.

Das mikrokristalline Silizium nutzt einen breiteren Wellenlängenbereich aus als das amorphe Material – bis hinunter zum Infrarot; amorphes Silizium dagegen wandelt das sichtbare Sonnenlicht mit höherer elektrischer Spannung um. Um die guten Eigenschaften beider Siliziumformen zu nutzen, kombinieren die Jülicher Forscher sie zu einem Doppelpack. In einer solchen Tandemzelle fällt das

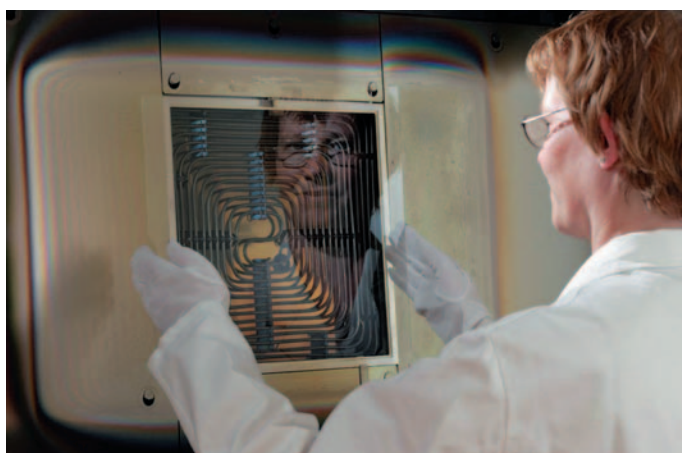
Licht durch eine Glasscheibe und die durchscheinende ZnO-Schicht. Die Lichtteilchen treffen dann zuerst auf eine dünne Lage aus amorphem Silizium und anschließend auf eine dickere mikrokristalline Schicht. Photonen, die beide Schichten passiert haben, werden von einem mit Silber beschichteten Reflektor in die Siliziumschichten zurückgelenkt.

Auf diese Weise konnten die Jülicher Forscher bereits Dünnschicht-Solarmodule mit Wirkungs-

graden von zehn Prozent herstellen. Ihr Ziel ist jetzt, solche Werte nicht nur unter Laborbedingungen auf 30 x 30 Zentimetern großen Solarzellen zu erreichen, sondern bald auch in Solarmodulen mit einem Quadratmeter Fläche. Dabei gilt: Je größer die Fläche, desto schwieriger wird es, eine gleichmäßige Beschichtung mit hohem Wirkungsgrad zu erzeugen. Bernd Rech betont: „Bei dieser Aufgabe arbeiten wir einerseits eng mit industriellen Partnern zusammen. Andererseits ist auch die Grund-

lagenforschung in der Photovoltaik sehr wichtig.“ Denn davon sind die Forscher in Jülich überzeugt: Wenn es gelingt, die optischen und elektronischen Eigenschaften der Siliziumschichten genauer zu verstehen und theoretisch zu beschreiben, lässt sich die Leistungsfähigkeit von Dünnschichtsolarmodulen noch enorm steigern – mehr Strom aus Licht ist machbar.

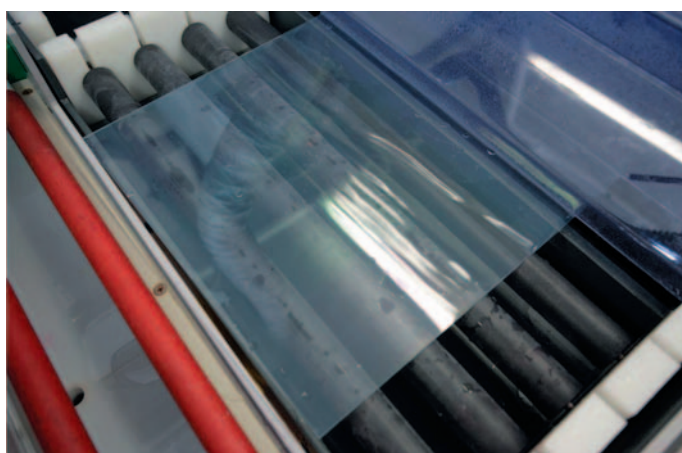
Wiebke Rögener



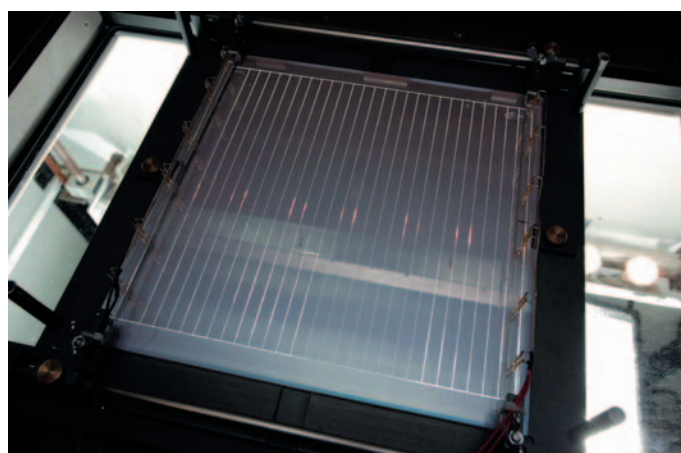
Die Herstellung einer Solarzelle beginnt: Eine Mitarbeiterin baut eine Glasscheibe in eine Anlage ein, in der die Scheibe anschließend mit transparentem, leitfähigem Zinkoxid beschichtet wird.



In einer so genannten PEVCD-Anlage (für: Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition) werden die Siliziumschichten aufgedampft. Ein Techniker entnimmt die beschichtete Platte.



Die werdende Solarzelle durchläuft einen chemischen Prozess, bei dem die Zinkoxid-Schicht durch Säurebehandlung aufgeraut wird.



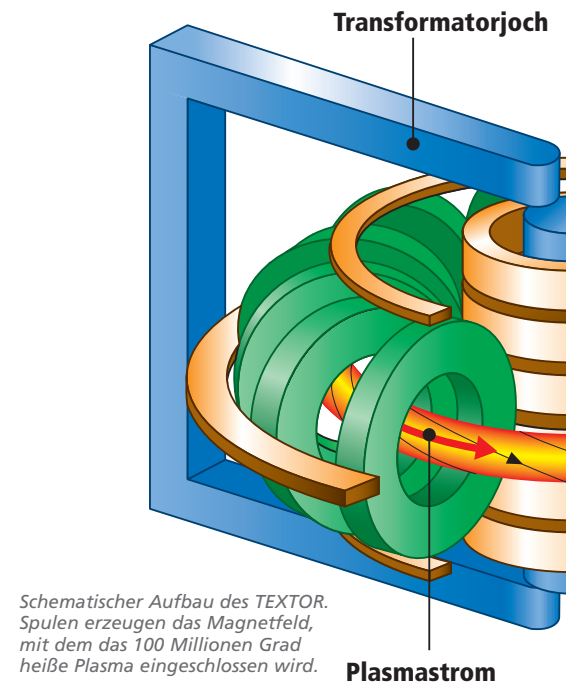
Auf einem Messstand werden die Strom-Spannungs-Kennlinien eines Moduls ermittelt. Das Modul besteht aus Solarzellen – zu erkennen als dunkle Streifen –, die miteinander verschaltet sind.

Durchhalten im Sonnenfeuer

Das Sonnenfeuer brennt bereits auf der Erde – einige Sekunden erst in heutigen Testanlagen, mindestens acht Minuten werden es beim Fusionsreaktor ITER im französischen Cadarache ab 2015 sein. Ob die Menschheit es vollends bündigt, hängt entscheidend von der Wirtschaftlichkeit ab. Ein wichtiger Kostenfaktor: Durch den Kontakt mit dem heißen Fusionsplasma verschleißt die Reaktorwand schnell. Deshalb erforschen Jülicher Wissenschaftler die Prozesse, die beim Zusammentreffen von Plasma und Wand ablaufen.

Einerseits ist ein Kontakt des mehr als 100 Millionen Grad heißen Plasmas mit den Wänden einer Fusionsanlage unerwünscht. Auch wenn die Plasmadichte in Fusionsreaktoren etwa 250 000-mal geringer ist als die Dichte der Erdatmosphäre, können die Plasmateilchen an den Reaktorwänden beträchtliche Schäden anrichten. Zudem verringert jedes Atom, das aus der Wand herausgeschlagen wird, die Temperatur des Plasmas. Wenn zu viele Verunreinigungen in das Plasma eindringen, erlischt das „Kernfeuer“.

Andererseits ist der Kontakt des Plasmas mit den Wänden unvermeidbar. Obwohl Magnetfelder das Plasma einschließen, um es von den Wänden fernzuhalten, kommt es zu Wandkontakten – teilweise mit Vorsatz. „Denn wir müssen die Asche der Kernfusion – das Helium – aus dem Plasma entfernen, sonst erstickt die Fusion“, erläutert Prof. Ulrich Samm, Direktor am Institut für Plasmaphysik. Zu diesem Zweck

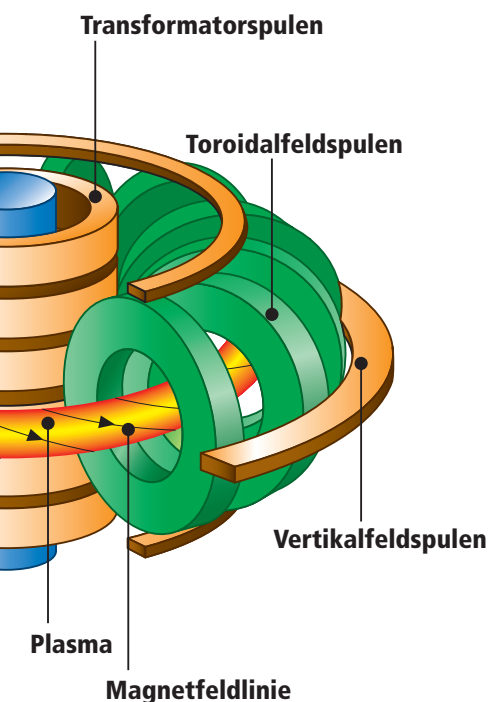


Schematischer Aufbau des TEXTOR. Spulen erzeugen das Magnetfeld, mit dem das 100 Millionen Grad heiße Plasma eingeschlossen wird.

lenken die Magnetfelder das Plasma auf die so genannten Divertorplatten. Das sind besonders verstärkte Bereiche der Reaktorwände. Hier werden dann das Helium und die Verunreinigungen abgepumpt.



Ein Techniker befestigt Graphitplatten im Jülicher TEXTOR.



Magnetfeldlinie

Aufgrund ihrer Forschungsreihen am Jülicher Fusionsexperiment TEXTOR, den die Jülicher Wissenschaftler zusammen mit Partnern aus Belgien und den Niederlanden betreiben, favorisieren sie als Beschichtung für die besonders kritischen Wandstellen derzeit Graphit, also Kohlenstoff. „Der naheliegendste Vorteil von Graphit ist“, sagt Samm, „dass er nicht schmilzt, sondern bei etwa 3550 Grad Celsius gleich in den gasförmigen Zustand übergeht.“ Dadurch wird die Beschichtung zwar dünner, aber die Wand bleibt intakt. Das Schmelzen der Beschichtung würde die Wandeigenschaften dagegen drastisch verschlechtern.

Kohlenstoff bläst das Kernfeuer nicht aus

Doch der Kohlenstoff hat noch einen weiteren Vorteil: Sein Kern besitzt nur sechs Protonen. Die geringe Protonenzahl dieser Stoffe zieht Elektronen nur mit einer vergleichsweise schwachen Kraft an. Kohlenstoffatome, die ins heiße Plasma gelangen, verlieren deshalb sofort ihre Elektronen. Damit ist aber die

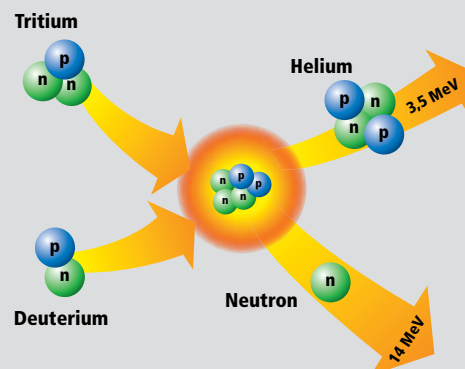
Was ist Kernfusion?

> Während in den herkömmlichen Kernkraftwerken Atomkerne gespalten werden, werden bei der Kernfusion je zwei Kerne miteinander verschmolzen. Die auf den ersten Blick zueinander gegensätzlichen Prozesse arbeiten nach dem gleichen physikalischen Grundprinzip: Gemäß Einsteins berühmter Formel $E = mc^2$ verwandeln sie Masse in Energie.

Bringt man mehrere Kernteilchen zusammen, beispielsweise zwei Protonen und zwei Neutronen, dann hat das Endprodukt – in dem Fall ein Heliumkern – weniger Masse als die Summe der vier Einzelteilchen. Der Grund ist die Bindungsenergie, die freigesetzt wird, wenn die Teilchen sich verbinden.

Eisenatome haben pro Kernteilchen die größte Bindungsenergie. Bei Atomen, die im Periodensystem der Elemente eine niedrigere Protonenzahl haben als Eisen, kann man Energie durch Kernfusion gewinnen, bei Atomen mit mehr Protonen durch Kernspaltung. Die effektivste Kernfusion (siehe Grafik oben) ist das Verschmelzen von Deuterium – schwerem Wasserstoff – und Tritium, das auch als überschwerer Wasserstoff bezeichnet wird.

Im Zentrum der Sonne, wo diese Fusionsreaktion neben anderen abläuft, herrscht eine Temperatur von etwa 10 Millionen Grad Celsius und ein Druck, der mindestens dem 200 Milliardenfachen des Erdatmosphärendrucks entspricht. Da dieser hohe Druck im Labor nicht zu erreichen ist, wird in Kernfusionsreaktoren zum Ausgleich eine Temperatur von 100 Millionen Grad benötigt – was hohe Anforderungen an die Wandbeschichtung der Reaktoren stellt.



Wie bei der Kernspaltung hat man es auch bei der Kernfusion mit Radioaktivität zu tun. Jedoch entfällt die umstrittene Endlagerung von Abfallprodukten. Das radioaktive Tritium wird erst im Reaktor aus Lithium gewonnen und dort sofort verbraucht. Das Endprodukt der Kernfusion, Helium, ist nicht radioaktiv. Dagegen bilden sich in den Wandmaterialien wegen des starken Neutronenbeschusses radioaktive Stoffe. Durch geeignete Wahl der Materialien lässt sich die Halbwertszeit dieser Stoffe aber auf 100 Jahre begrenzen, so dass sie zwischengelagert und wiederverwendet werden können.

Ein weiterer Unterschied zur Kernspaltung: Bei der Kernfusion sind keine Kettenreaktionen möglich. Eine Störung im Reaktor führt schlimmstenfalls zum Erlöschen der Fusion. <

Dieser „Brennstoff“ ersetzt 1000 Liter Öl: Zwei Liter Wasser enthalten 75 Milligramm Deuterium. Einige Kilogramm Gestein enthalten 225 Milligramm Lithium, aus dem im Reaktor Tritium entsteht.





Die Steuerzentrale von TEXTOR. Von hier aus lenken und überwachen die Wissenschaftler die Fusionsexperimente.

größte Gefahr für das Erlöschen des Kernfeuers gebannt. Denn es sind in erster Linie die gebundenen Elektronen von Verunreinigungsatomen, die das Plasma abkühlen, indem sie laufend Energie aufnehmen und als Licht abstrahlen.

Allerdings hat Kohlenstoff auch einen Nachteil: Weil er zu den leichteren Elementen gehört, können die heißen Plasmateilchen Kohlenstoffatome relativ einfach aus der Wandbeschichtung herausschlagen. Für sich allein betrachtet würde dies eine Abtragungsrate der Wandbeschichtung von mehreren Metern pro Betriebsjahr zur Folge haben. Die entsprechenden Wandkomponenten eines Fusionskraftwerkes müssten demzufolge in extrem kurzen Abständen ausgewechselt werden.

Aber innerhalb des Reaktors geht zum Glück nichts verloren. Der aus der Wand gelöste

Kohlenstoff lagert sich auch wieder auf der Wand ab. Erfreulicherweise ist die Ablagerungsrate genau dort am höchsten, wo auch der meiste Kohlenstoff abgelöst wird – wodurch die Lebensdauer der Wandbeschichtung erheblich verlängert wird.

Konzept für 2015

Einer der Jülicher Plasmaphysiker, Dr. Volker Philipps, leitet die europäische Arbeitsgruppe „Plasma-Wand-Wechselwirkung“, in der die europäische Forschung auf diesem Gebiet koordiniert wird. „Unser Konzept für den internationalen Testreaktor ITER steht“, sagt Philipps. ITER soll im Jahr 2015 seinen Betrieb im französischen Cadarache aufnehmen. Die bei ITER gewonnenen Erkenntnisse sollen dann den Bau des ersten Fusionskraftwerks ermöglichen.

Drei Materialien sind für die Wandbeschichtung von ITER vorgesehen. „Für die Stellen, die am

meisten belastet sind, nehmen wir Graphit, die Stellen mit mittlerer Belastung werden mit Wolfram beschichtet und der Rest mit Beryllium“, erläutert Philipps. Erstmals wird die Kombination dieser drei Materialien ab 2008 im europäischen Testreaktor JET getestet, der im britischen Culham steht. „Unser Beitrag aus Jülich werden Wolfram-Kacheln sein, deren Eigenschaften wir ebenfalls am TEXTOR untersuchen“, sagt Samm. Wolfram hat gegenüber Graphit eine niedrigere Erosionsrate, trägt aber zur Abkühlung des Plasmas bei, falls einzelne Atome aus den Kacheln herausgeschlagen werden. „Die kombinierten TEXTOR- und JET-Experimente werden uns dabei helfen, die Vor- und Nachteile gegeneinander abzuwägen“, so Samm.

Dabei ist ein noch zu lösendes Problem, dass der wieder abgelagerte Kohlenstoff radioaktives Tritium aus dem Plasma einfängt und an der Wand anreichert. Aus Sicherheitsgründen ist dies nicht tolerierbar. Die Wand müsste regelmäßig gereinigt oder ersetzt werden. Deshalb prüfen die Jülicher Wissenschaftler sehr genau, wo noch Graphit und wo schon Wolfram verwendet werden kann.

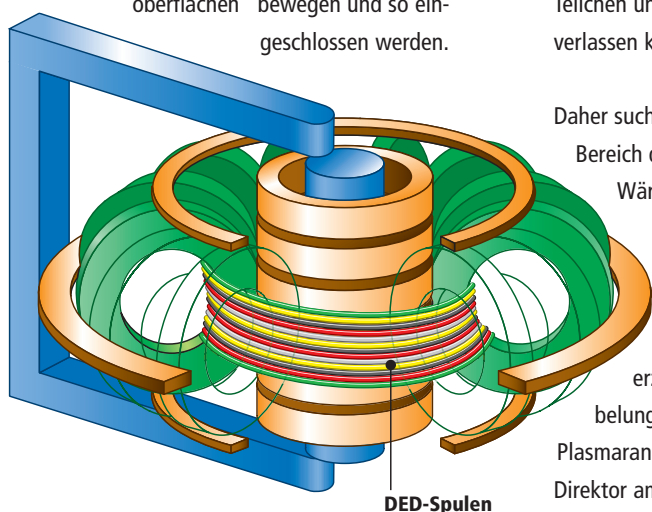
Ständig rechnen die Jülicher Forscher die an TEXTOR gewonnenen Erkenntnisse auf die Verhältnisse von ITER hoch. Dabei geht es immer wieder um die kostenentscheidende Frage: Wie lange hält die Wand durch, bevor sie ausgewechselt werden muss?

Axel Tillemans

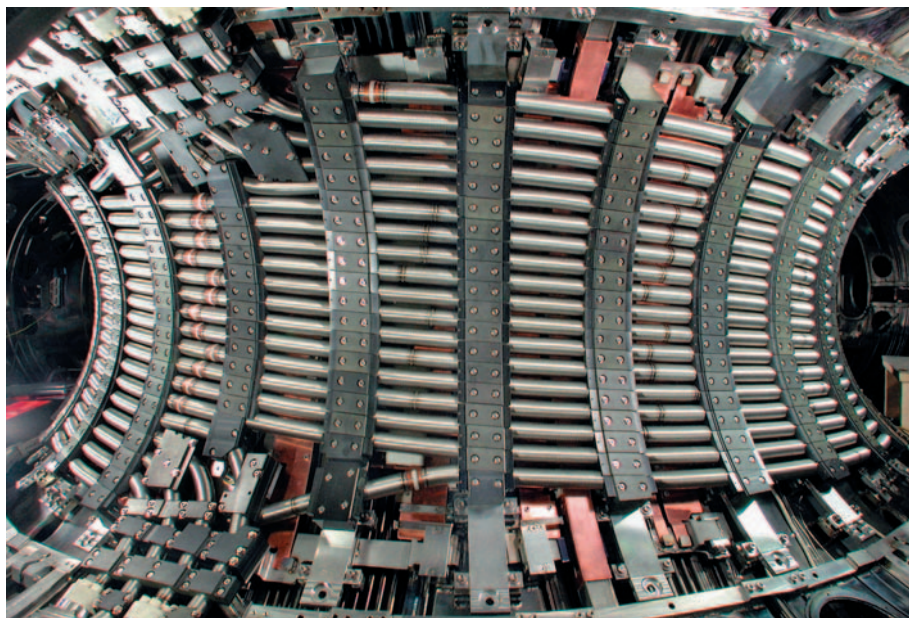
Der chaotische Schutzengel

Die Wand zukünftiger Kernfusionsreaktoren muss vor der „vollen Wucht“ des 100 Millionen Grad heißen Plasmas geschützt werden. Dabei macht es gar nichts, wenn der „Schutzengel“ etwas chaotisch ist. Im Gegenteil: Ein gewisses Maß an Chaos in den Magnetfeldern, die das Plasma einschließen, sorgt dafür, dass die Hitze auf größere Wandbereiche verteilt wird.

In Fusionsexperimenten wie dem Jülicher TEXTOR und auch dem zukünftigen internationalen Testreaktor ITER füllt das Plasma das Innere eines Torus aus – also ein autoreifenförmiges Volumen. Ein Magnetfeld sorgt dafür, dass sich die elektrisch geladenen Plasmateilchen auf ineinandergeschichteten „Reifenoberflächen“ bewegen und so eingeschlossen werden.



Die DED-Spulen verlaufen spiralförmig an der inneren Toruswand des Jülicher Fusions-experiments.



Die Spulen des Dynamischen Ergodischen Divertors (DED), mit dem die Magnetfeldlinien am Plasmarand chaotisch verwirbelt werden können.

Die Temperatur in der Mitte des „Reifenschlauchs“ ist am höchsten – dort findet auch die Kernfusion statt – und es gibt ein Wärmegefälle nach außen. Der Wärmeeinbruch ist nicht perfekt. Das soll er auch gar nicht sein: Teilchen und Energie müssen das Plasma verlassen können.

Daher sucht man sich einen bestimmten Bereich der Wand aus, auf den man den Wärmefluss konzentriert und schützt ihn mit speziell beschichteten Platten. Jülicher Wissenschaftler experimentierten im TEXTOR zusätzlich mit einem neuartigen Konzept. „Dabei erzeugen wir eine chaotische Verwirbelung der Magnetfeldlinien am äußeren Plasmarand“, erläutert Prof. Robert Wolf, Direktor am Institut für Plasmaphysik. So treffen die Magnetfeldlinien die Platten nicht dauernd an der gleichen Stelle: Plasmateilchen und Wärmefluss verteilen sich gleichmäßiger.

Eine ergänzende Rotation des Magnetfeldes verstärkt diesen Effekt noch. Hervorgerufen wird die chaotische Verwirbelung durch ein zusätzliches Störmagnetfeld, den Dynamischen Ergodischen Divertor.

Dieser „Schutzengel“ vollführt noch mehr gute Taten: Er schirmt den Plasmarand vor dem Eindringen von Verunreinigungen ab, die aus der Wand herausgeschlagen werden und das Kernfeuer „löschen“ können. Künftig könnte er außerdem helfen, ein weiteres Problem zu lösen: Aufgrund von Instabilitäten verlässt die Energie das Plasma nicht kontinuierlich, sondern trifft die Wand pulsartig. „Wir haben die berechtigte Hoffnung, dass wir mit der Verwirbelung des Plasmarandes einen gleichbleibenderen Energiefluss erreichen können, der für die Wand weniger belastend wäre“, sagt Wolf.

Axel Tillemans

„Nicht einseitig forschen“

Interview mit Prof. Dr. Otto Hasenkopf

> Herr Prof. Hasenkopf, werfen wir gemeinsam einen Blick ins Jahr 2020. Was wird dann auf dem deutschen Strommarkt anders sein als heute?

Für Veränderungen in der Energieversorgung sind 15 Jahre eine eher kurze Zeit. Sicherlich wird dann der Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromproduktion zugenommen haben. So bin ich ziemlich sicher, dass wir das politisch erklärte Ziel erreichen werden, diesen Anteil bis 2010 auf 12,5 Prozent zu erhöhen. Was die Kernenergie betrifft, so haben alle Energieversorgungsunternehmen den Ausstiegsvertrag unterschrieben, beobachten aber gleichzeitig gespannt die politische Entwicklung. Klar ist: Was dort wegfällt, muss hauptsächlich durch die fossilen Energieträger Braunkohle, Steinkohle und Erdgas ersetzt werden.



> Erdöl kommt in Ihrer Aufzählung nicht vor. Warum?

Erdöl hat an der Stromerzeugung nur einen Anteil von unter zwei Prozent; 2020 wird dieser Wert weiter gefallen sein. Verkehr und chemische Industrie werden natürlich noch Erdöl brauchen.

> Bis 2020 sind viele Kraftwerke, die Kohle und Erdgas nutzen, veraltet. Was hat das für Konsequenzen?

Tatsächlich sind bis dahin Kraftwerke mit einer Gesamtleistung von 20 000 Megawatt stillzulegen. Rechnet man noch die 20 000 Megawatt hinzu, die aus Gründen des Kernenergieausstiegs wegfallen, so müssen mehr als 35 Prozent der derzeit installierten Leistung ersetzt werden. Der Bau entsprechender Kohle- und Gaskraftwerke wird – grob geschätzt – 30 Milliarden Euro kosten. Das ist wahrlich kein Pappenstiel. Allerdings liegt darin auch eine große Chance: Der Wirkungsgrad eines heutigen Dampfkraftwerks liegt mindestens 10 Prozentpunkte über dem eines entsprechenden stillzulegenden Kraftwerks. Dadurch wird weniger Brennstoff verbraucht: ein volkswirtschaftliches Plus und – wegen des geringeren Kohlendioxid-Ausstoßes – auch ein ökologischer Vorteil.

> Schauen wir noch weiter voraus – ins Jahr 2050. Wird dann Strom in Deutschland immer noch aus Kohle und Gas erzeugt? Und wie wird es der Menschheit gelingen, ihren Energiehunger zu stillen?

Die Braunkohle als inländische Energiequelle reicht bei gleichbleibendem Verbrauch noch über 100 Jahre, Steinkohle noch länger. Beim Erdgas ist die Lage schwierig einzuschätzen. Ohne fossile Energieträger wird man in Deutschland und in der Welt jedenfalls nicht auskommen. Ich sehe nicht, wie erneuerbare Energieträger unter Beibehaltung unserer Wirtschaftsstruktur den zukünftigen Energiebedarf abdecken können.



> Und was ist mit der Kernfusion?

Ich hoffe, dass man mit der künftigen Testanlage ITER zeigen kann, dass diese Energieumwandlung prinzipiell funktioniert. In hoch entwickelten Ländern mag die Kernfusion ab 2050 eine Rolle spielen. Doch damit ist das Welt-Energieproblem noch nicht gelöst.

> Wenn man auf fossile Energieträger nicht verzichten kann – wie steht es dann um den Klimaschutz?

Umwelt- und Klimaschutz, Wirtschaftlichkeit und Versorgungssicherheit sind als gleichrangig anzusehen. Stellt man den Klimaschutz über alles, dann wird es irgendwann dazu kommen, dass sich diesen Klimaschutz keiner mehr leisten kann. Wir werden alle Energiequellen nutzen müssen, die uns zur Verfügung stehen. Etwas kann jedenfalls nie falsch sein: die Effizienz bei der Energieumwandlung zu erhöhen.



> Was sich wiederum nur durch Forschung erreichen lässt...

Genau. Aber: Man darf nicht einseitig forschen und sich beispielsweise nur auf die Sonnenenergie konzentrieren. Wir sind nicht so gesegnet, dass wir auf irgendeine Energietechnik verzichten können.

Interview: Frank Frick

> Wie kann das gelingen?

Durch Energieforschung, die wir noch forcieren müssen. Beispielsweise gilt es, Hochtemperatur-Materialien zu entwickeln und zu testen. Hier leisten Jülicher Wissenschaftler hervorragende Arbeit. Eine andere Frage ist: Betreiben wir künftig weiter Großkraftanlagen oder wenden wir uns einer dezentralen Versorgung zu? Dezentral lässt sich die Energie zwar besser ausnutzen, weil man in größerem Maße Strom und Wärme gemeinsam erzeugen kann, aber es gibt auch einen Nachteil: Die Emissionen entstehen dann da, wo sich die Menschen aufhalten.

> Die Brennstoffzelle gilt als Hoffnungsträger für eine solche dezentrale Versorgung. Teilen Sie die Erwartungen?

Die Brennstoffzelle ist eine sehr intelligente Methode der Energieumwandlung. Allerdings kann sie ihre Stärke erst dann voll ausspielen, wenn man den als Brennstoff benötigten Wasserstoff aus regenerativen Energieträgern wirtschaftlich herstellen kann. Es lohnt sich jedenfalls, die Brennstoffzelle weiter zu entwickeln. Wegen ihrer geringen Emissionen vor

Ort wird sie in näherer Zukunft beispielsweise für das Transportwesen in den Innenstädten Bedeutung erlangen. Und sie wird auch eine wichtige Rolle für die unterbrechungsfreie Stromversorgung spielen. Heute stören noch die hohen Anschaffungskosten und die Reparaturanfälligkeit.

> Könnte man die Forschung an effizienteren Kraftwerken und an Brennstoffzellen nicht der Industrie überlassen?

Die Unternehmen würden nur soweit forschen, wie es das jeweilige Projekt erfordert. Andere, grundsätzlichere Aspekte würden sie ausblenden. Außerdem ist es öffentlichen Forschungseinrichtungen möglich, qualifizierte Wissenschaftler auszubilden und langfristig zu beschäftigen.

> Noch nicht gesprochen haben wir über die Möglichkeit, Strom aus Sonnenlicht zu gewinnen. Ihr Urteil über diese Zukunftstechnologie?

Man wird sich die Photovoltaik nur leisten können, wenn die Kosten weiterhin deutlich sinken. Gleichzeitig muss auch bei dieser Technik die Effizienz noch steigen.

> Zur Person:

Prof. Dr. Otto Hasenkopf, geboren 1937, war von 2001 bis 2003 Technischer Vorstand der EnBW Kraftwerke AG. Trotz aktuellen „Unruhestandes“ bleibt er der Energie Baden-Württemberg AG, einem der größten deutschen Energieunternehmen, in verschiedenen Funktionen verbunden.

Hasenkopf absolvierte zu Beginn seines Berufslebens eine Werkzeugmacherlehre und danach ein Ingenieurstudium sowie ein Maschinenbaustudium, das er mit der Promotion abschloss. 1972 begann er seine erfolgreiche Laufbahn in der Energiewirtschaft. Von 1993 bis 1996 war er Vorstandsmitglied bei den Technischen Werken der Stadt Stuttgart. In dieser Position war er danach auch für die Neckarwerke Stuttgart tätig, die 2003 in die EnBW AG aufgingen.

Eine Antwort auf die Entsorgungsfrage

Jährlich werden weltweit etwa 9500 Tonnen Kernbrennstoff abgebrannt. Der dabei entstehende radioaktive Abfall enthält Elemente, die Hunderttausende Jahre lang zu einer Gefahr werden können, falls ihr Endlager nicht von der Umwelt abgeschottet bleibt. Jülicher Wissenschaftler erforschen einen alternativen Brennstoffkreislauf, bei dem die Radioaktivität des anfallenden Atommülls schon nach 1000 Jahren auf das Niveau einer natürlichen Uranerzlagerstätte fällt.

Radioaktiver Abfall enthält zwei Arten von Stoffen: Die eine entsteht im Reaktor durch den Beschuss von Neutronen, der die Atomkerne des Brennstoffs spaltet. Diese Spaltprodukte zerfallen vergleichsweise schnell. Manche Atomkerne des Brennstoffs haben dagegen Neutronen eingefangen und sind dabei gleichsam dicker geworden. „Die vier so entstandenen Elemente Neptunium, Plutonium, Americium und Curium sind für das langfristige Gefährdungspotenzial des nuklearen Abfalls entscheidend“, erläutert Prof. Reinhard Odoj, Leiter des Bereichs „Nukleare Entsorgung“ im Institut für Sicherheitsforschung und Reaktortechnik. Sein Team ist überzeugt, dass sich der hochradioaktive Abfall in Edelstahlbehältern und Keramiken 1000 Jahre lang sicher einkapseln lässt. „Ist nach diesem Zeitraum die Radioaktivität so weit abgeklungen, dass sie der von natürlich vorkommenden Uranerzen entspricht, so ist die Endlagerung unabhängig von den Bedingungen des Endlagerstandorts risikolos“, sagt Odoj.

Es gibt ein Konzept, wie sich die gefahrlose Endlagerung verwirklichen lässt. Die Wiederaufarbeitungstechnik in den französischen und englischen Anlagen trennt aus abgebrannten Brennelementen heute bereits Plutonium und Uran ab, die dann erneut als Kernbrennstoff eingesetzt werden. Künftig könnte man, so die Idee, noch Neptunium, Americium und Curium – so genannte „Minore Actinoide“ – von den Spaltprodukten abtrennen und dann kernphysikalisch umwandeln. Fachleute nennen die Abtrennung „Partitioning“ und den anschließenden Umwandlungsprozess „Transmutation“.

Erfolgreiche Trennung

Probleme beim Partitioning machen nur die Lanthanoide, die rund einen Drittel der Spaltprodukte ausmachen. Sie sind den Minoren Actinoiden chemisch sehr ähnlich. Entsprechend lösen sie sich normalerweise auch nahezu gleich gut in verschiedenen Extraktions- und Lösungsmitteln, was die so genannte Flüssig-Flüssig-Extraktion schwierig macht. Dieses Trennverfahren wird häufig eingesetzt, um Bestandteile aus Substanzgemischen herauszulösen. Gemeinsam fanden der Chemiker Dr. Giuseppe Modolo und Odoj vor einigen Jahren jedoch ein Extraktionsmittelgemisch, in dem sich die Minoren Actinoide ansammeln, Lanthanoide jedoch nicht.

Auf Grundlage dieses Extraktionsmittels entwickelten sie einen Prozess, dem sie den Namen ALINA gaben – nach Giuseppe Modolos Tochter. Offiziell allerdings steht ALINA für „Actinoide-Lanthanoide Intergroup separation in Acidic medium“. Mit diesem Verfahren gelang es den Forschern, beispielsweise 99,91 Prozent des Americium aus einer in Säure gelösten, lanthanoidhaltigen Substanzmischung zu extrahieren.





In solchen Apparaturen, die in der Fachsprache „Mixer-Settler“ heißen, laufen die Jülicher Experimente zur Trennung von Neptunium, Americium und Curium von den Lanthanoiden ab.



Solche Zentrifugalextraktoren ermöglichen die Flüssig-Flüssig-Extraktion auch dann, wenn die Dichteunterschiede zwischen den beiden Lösemitteln gering sind.

„Weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sind notwendig, um die Trennraten zu verbessern und den ALINA-Prozess reif für einen großtechnischen Einsatz zu machen“, sagt Odoj. Grundsätzlich jedenfalls erscheint es durchaus machbar, zunächst Minore Actinoide und Lanthanoide gemeinsam von den übrigen Spaltprodukten im hochaktiven Abfall der Wiederaufarbeitungsanlage abzutrennen und dann Americium, Curium und Neptunium mit Hilfe des ALINA-Verfahrens zu extrahieren. Ist das Partitioning erst geschafft, könnte man sich an die Transmutation, die Umwandlung, machen. Um die extrahierten Actinoide in Stoffe umzuwandeln, die vergleichsweise schnell zerfallen, benötigt man Neutronen. Diese könnten in speziellen Transmutationsanlagen erzeugt werden. Dort prasseln stark beschleunigte Protonen auf ein Schwermetall. Dessen Atomkerne zersplittern daraufhin und senden dabei Neutronen aus. Auf Grund des Bauprinzips kann es in solchen Transmutationsanlagen niemals zu einer Kettenreaktion kommen. Die Neutronenemission ist sofort zu Ende, wenn die Protonenquelle abgeschaltet wird.

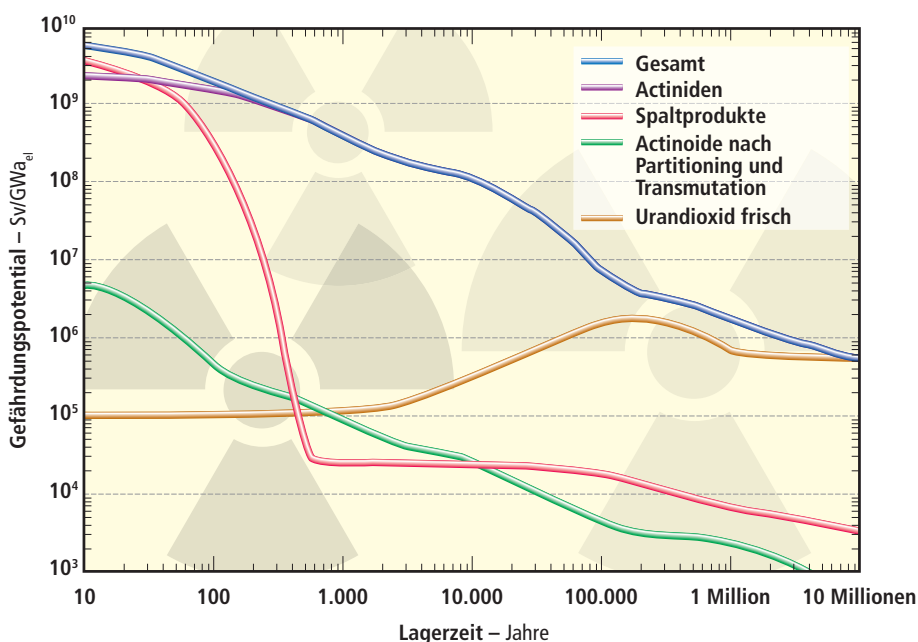
Ziel: Gefahrlose Endlagerung

Derweil erforschen die Jülicher Wissenschaftler Möglichkeiten, die Masse der anfallenden Minoren Actinoide und des Plutoniums von vorneherein zu verringern. „Bestehende Leichtwasserreaktoren lassen sich für den schnellen Einstieg in eine Strategie nutzen, die Partitioning und Transmutation umfasst und auf eine gefahrlose Endlagerung zielt“, sagt Prof. Peter-W. Phlippen. „Denn die sich weltweit

ansammelnden Plutoniummassen wachsen jährlich um 100 Tonnen und erfordern ein schnelles Handeln.“ Als Brennstoff für solche Reaktoren dienen bisher meist wiederaufbereitete Mischoxid-Brennelemente, die Plutonium sowie – als Trägermaterial – Uran enthalten. Die Jülicher Wissenschaftler schlagen vor, das Trägermaterial durch Thoriumoxide zu ersetzen. Beim Abbrand solcher Brennelemente werden bis zu 55 Prozent des eingesetzten Plutoniums verbraucht – gegenüber höchstens 30 Prozent bei den herkömmlichen uranhaltigen Mischoxid-Elementen. Auch werden weniger Minore Actinoide gebildet.

Berechnungen mit Computerprogrammen zur „neutronenphysikalischen Reaktorauslegung“ zufolge beeinträchtigen die alternativen Brennstäbe die Sicherheitseigenschaften der Reaktoren nicht. „Auf unsere Initiative hin wurden im inzwischen abgeschalteten Leistungsreaktor Obrigheim und im niederländischen Hochflussreaktor Petten Bestrahlungsexperimente durchgeführt, die äußerst vielversprechend verlaufen sind“, berichtet Phlippen.

Frank Frick



Die Radioaktivität der Spaltprodukte von Brennelementen ist nach weniger als 1000 Jahren so weit abgeklungen, dass sie der von natürlich vorkommenden Uran-Erzen (siehe braune Kurve) entspricht. Für die langfristigen Gefahren, die von nuklearem Abfall ausgehen, sind vor allem die Actinoide verantwortlich. Ihre Abtrennung – Fachsprache: Partitioning – und ihre anschließende kernphysikalische Umwandlung – Transmutation – würde die Risiken der Endlagerung minimieren.

Fossil und fortschrittlich

Solarenergie und Windkraft stehen schon in den Startlöchern. Trotzdem werden Kohle und Erdgas noch einige Zeit die Grundlage der weltweiten Energieproduktion bleiben. Um so wichtiger ist es, Kraftwerke zu entwickeln, die effizient Strom und Wärme erzeugen und zugleich wenig Treibhausgase freisetzen. Für solche Kraftwerke werden hitzefeste, mechanisch belastbare und langlebige Materialien benötigt. Jülicher Wissenschaftler entwickeln sie.

Informationen zu sammeln, ist für Journalisten ein Teil des Jobs. Es gibt Orte, da fällt das leichter als am Institut für Werkstoffe und Verfahren der Energietechnik in Jülich. Nicht, dass die Wissenschaftler dort nichts zu erzählen hätten. Doch bei manchen Fragen bleiben sie eine Antwort schuldig. Was ihnen den Mund verschließt, ist ihre enge Zusammenarbeit mit der Industrie und die Forschung auf einem Gebiet, bei dem auch kleine Wissensvorsprünge viel Geld wert sein können.

Weniger Brennstoff verbrauchen

Die Forscher suchen, verbessern und prüfen Werkstoffe für die nächste Generation von Dampfkraftwerken und Gasturbinen. „Bis zum Jahr 2020 müssen in Deutschland 40 Prozent der kohle- oder erdgasgefeuerten Kraftwerke wegen Überalterung ersetzt werden“, sagt Prof. Lorenz Singheiser. „Parallel dazu investieren Länder wie China enorm viel Geld in die Kraftwerkstechnik, um ihren stark wachsenden Energiehunger zu stillen.“ Die neuen Dampfkraftwerke und Gasturbinen sollen dabei bei höheren Temperaturen betrieben werden als die heutigen und dadurch einen höheren Wirkungsgrad erreichen. Oder anders aus-

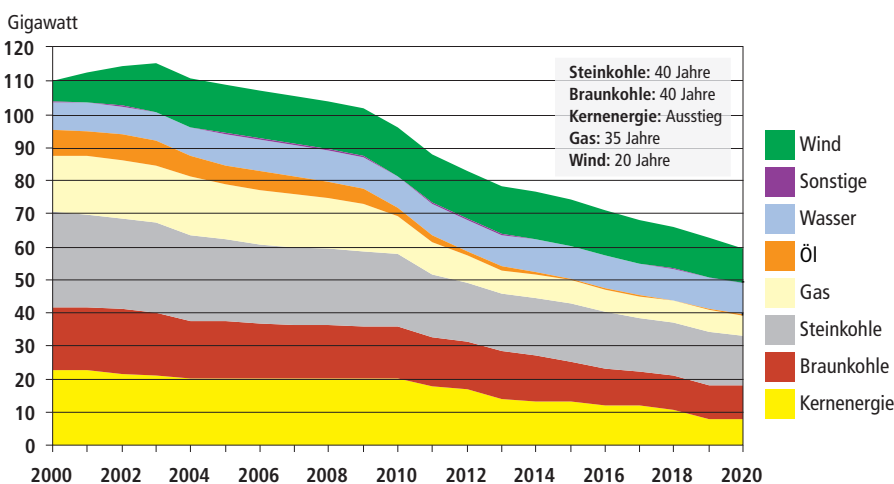
gedrückt: Für jede Kilowattstunde Energie, die sie in Form von Strom erzeugen, würden sie weniger fossilen Brennstoff verbrauchen als die derzeitigen Anlagen. Das spart den Energieunternehmen und den Kunden Kosten. Geringerer Brennstoffverbrauch heißt aber automatisch auch, dass weniger Treibhausgas Kohlendioxid freigesetzt würde.

Der Dampf in älteren, in Betrieb befindlichen Kraftwerken ist rund 540 Grad Celsius heiß und hat einen Druck von 185 bar. Könnte die Temperatur auf 650 Grad und der Druck auf 300 bar gesteigert werden, würde der Brennstoffverbrauch und damit der Kohlendioxid-Ausstoß um rund ein Viertel sinken. Das Problem: Die Materialien im Kraftwerk müssen diesen Bedingungen lange genug Stand halten: „Üblicherweise werden Dampfkraftwerke auf bis zu 200 000 Betriebsstunden ausgelegt, in denen die Werkstoffe ihre Funktion erfüllen müssen“, erläutert Singheiser.

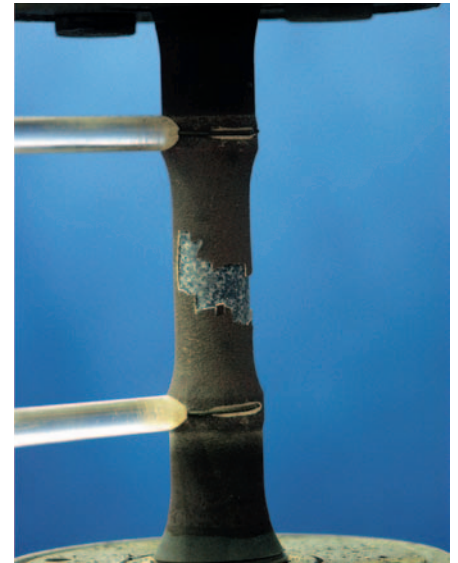
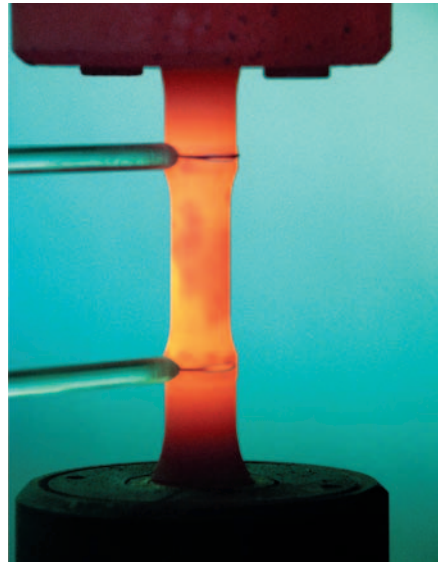
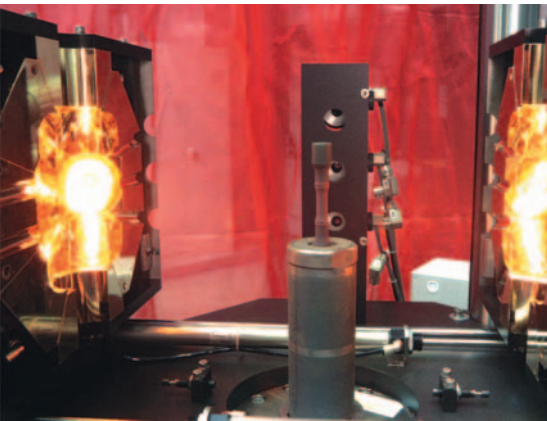
Als bislang beste Materialien für Dampfturbine und Dampfkessel werden bestimmte Hochleistungsstähle eingesetzt, die neun bis elf Prozent Chrom enthalten. „Wichtig ist, dass sie ausreichend kriechfest sind, um sie bei Betriebstemperaturen bis zu 620 Grad einzusetzen“, so Singheiser. Das heißt: Auch unter hohen Temperaturen halten sie dem Kessel- druck stand und verformen sich kaum. Ihr Nachteil ist noch, dass sie durch den heißen Wasserdampf im Kesselinnern schnell rosten – sie korrodieren.

Um die Korrosion bei den Stählen besser zu verstehen, erhitzen die Wissenschaftler um Dr. Willem J. Quadackers die Stahlbleche im Labor mehrere Tausend Stunden lang in wasserdampfhaltiger Atmosphäre. Mit dem

Auch Kraftwerke kommen in die Jahre. Mit den üblichen Betriebslaufzeiten ergäbe sich folgende Prognose: Im Jahre 2020 sind nur noch Anlagen für rund 60 Gigawatt Strom am Netz – heute gibt es noch Kapazitäten für 110 Gigawatt. Die Konsequenz: Neue Kraftwerke müssen gebaut werden.

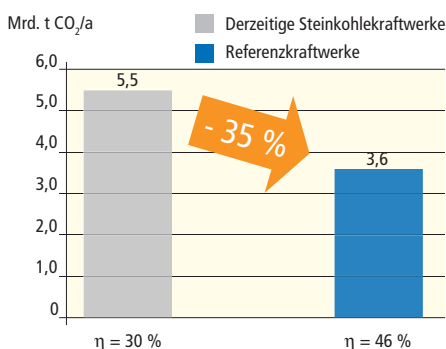


FZJ-STE 2004



Beschichtete Turbinenwerkstoffe absolvieren aufwändige Prüfungen, um ihre Tauglichkeit zu beweisen. Per Strahlenheizung (linkes Bild) aufgewärmt und außerdem mechanisch belastet, müssen sie vielen Zyklen wechselnder Temperatur und wechselnder Zugspannung überstehen. Die Probe, die im mittleren Bild zu sehen ist, wurde 620 mal von 350 auf 1050 Grad aufgeheizt, wobei die Höchsttemperatur jeweils zwei Stunden gehalten wurde. Dass sie danach (rechtes Bild) Anzeichen „thermomechanischer Ermüdung“ (Fachsprache) zeigte, wundert nicht.

Elektronenmikroskop und mit spektroskopischen Verfahren untersuchen sie dann die Oberfläche. Eines der Ergebnisse: „An der Oberfläche der Stähle bilden sich im Wasserdampf dicke und kompliziert aufgebaute Schichten, die überwiegend aus Eisenoxid bestehen und viele Poren und Risse haben. Das ist ein ganz anderes Verhalten als an heißer Luft: Dort entstehen dünne, einheitliche Schichten aus Chromoxid, die den Stahl sehr gut vor weiterer Korrosion schützen“, so



Bei einem vollständigen Ersatz der weltweit bestehenden Steinkohlekraftwerke (mittlerer Wirkungsgrad ca. 30 Prozent) durch Anlagen nach dem neuesten Stand der Technik (Wirkungsgrad 46 Prozent) ließe sich der jährliche Kohlendioxid-Ausstoß von 5,5 auf 3,6 Milliarden Tonnen reduzieren.

Quadackers. Die dicken Oxidschichten dagegen platzen vergleichsweise leicht ab. Außerdem leiten sie die Wärme schlechter als das ursprüngliche Material, so dass das Bauteil leicht überhitzt. Beides führt dazu, dass Kraftwerkskomponenten zu früh versagen.

Um die Lebensdauer der Stähle unter den Betriebsbedingungen eines Kraftwerkes schon im Voraus abschätzen zu können, haben die Jülicher Wissenschaftler Computermodelle entwickelt, in die ihre langjährigen Praxiserfahrungen eingeflossen sind. „Man will ja nicht erst nach 200 000 Stunden feststellen können, wie sich ein Material verändert hat. Sondern man will schon nach einigen Tausend Teststunden wissen, ob der Stahl für Kraftwerkskomponenten geeignet ist“, so Singheiser. Solche Lebensdauermodelle aus Jülich setzen einige Anlagenbauer und Energieversorger bereits bei ihren Planungen ein.

Kriechfest und korrosionsbeständig

Aber in Jülich wird nicht nur getestet: Gemeinsam mit Wissenschaftlern des Max-

Planck-Instituts für Eisenforschung haben die Jülicher einen neuen Hochleistungsstahl mit 12-prozentigem Chromgehalt entwickelt. Nach den bisherigen 10 000-Stunden-Prüfungen zeichnet er sich durch die hohe Kriechfestigkeit eines „Neunprozenters“ aus, ist dabei aber weit korrosionsbeständiger. Die „geheimen“ Zutaten, die das möglich machen, sind Tantal und Mangan. Sie stabilisieren die Strukturen aus Chrom, Eisen und ihren Oxiden. „Der neue Stahl bildet eine Basis für die Entwicklung von Werkstoffen, die in künftigen Dampfkraftwerken zwischen 620 und 650 Grad Celsius verwendet werden könnten“, freut sich Singheiser über den Erfolg seiner Arbeitsgruppe.

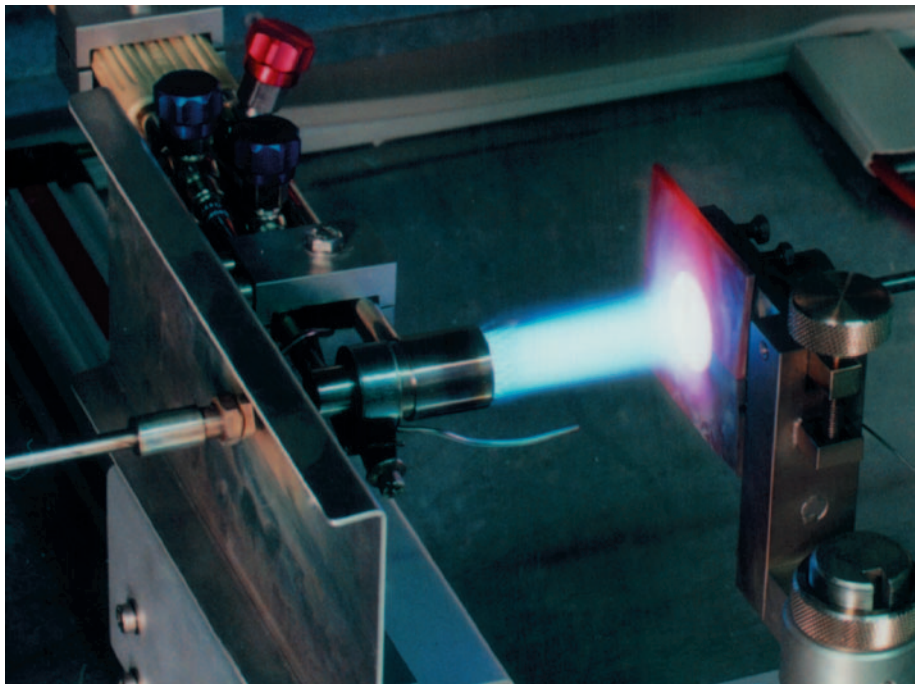
Für viele Experten scheint damit die Grenze für die Hochleistungsstähle erreicht. Doch mit anderen Metallen – komplexen Legierungen auf Nickel-Basis (NB-Legierung) – peilt Singheiser inzwischen die 700-Grad-Grenze an. Diese auch Superlegierung genannten Werkstoffe bestehen aus rund einem Dutzend verschiedener Elemente und haben komplizierte, aber sehr stabile Kristallstrukturen.

Das Jülicher Team beteiligt sich an internationalen Forschungsarbeiten, indem es die Stabilität sowie die temperatur- und zeitabhängige Verformung dieser Legierungen prüft. Die Jülicher Forscher sind als europaweit führende Analytik-Experten begehrte Partner der Industrie und verfügen über eine ganze Palette an ausgereiften Prüfstationen. Die durchgeführten Untersuchungen sind sehr wichtig für die Entwicklung von Hochtemperaturwerkstoffen – anders als bei Alltagsprodukten. „Die Werkstoffe zum Beispiel in einem Auto verändern ihre Struktur und damit ihre Eigenschaften im Betrieb nicht, während sich der Aufbau von Materialien bei hohen Temperaturen meist sehr stark wandelt“, erläutert Singheiser.

NB-Legierungen sind aber teuer und aufwändig zu verarbeiten. Deshalb forschen die Jülicher mit beiden Metallsorten: Die NB-Legierung würde nur dort eingesetzt, wo Spitzentemperaturen herrschen. An den „kühleren“ Stellen der Kraftwerke bekämpfen die Chromstähle aus Kostengründen weiterhin den Vorzug.



Mit der Fackel eines Plasmabrenners trägt man Schutzschichten auf. Ihr wird ein keramisches Pulver beigelegt, das schmilzt und sich dann auf dem Werkstück absetzt.



Hitzeschutz aus Keramik

Robustere Stahlsorten sind aber nur eine Strategie, die Jülicher Forscher verfolgen, um Dampfkraftwerke bei Temperaturen von 700 Grad betreiben zu können. Die andere ist es, sehr kriechfeste Materialien korrosionsbeständiger zu machen, indem man diese mit Schutzschichten aus Keramik überzieht. Mit Erfolg: Das Jülicher Team hat bereits in Zusammenarbeit mit einem Turbinenhersteller einen neuen Korrosionsschutz entwickelt.

Korrosionsschutzschichten haben sich besonders für den Einsatz in Gasturbinen bewährt. Deren heißen Abgase nutzen anschließend auch nachgeschaltete Dampfkraftwerke zur Stromproduktion. Durch das Tandem von Gas- und Dampfturbinen lässt sich der Gesamtwirkungsgrad auf bis zu 58 Prozent steigern. Ziel der Jülicher und weltweiter Forschung ist es, bis 2020 die Effizienz auf 65 Prozent hochzuschrauben.

Durch die modernen Gasturbinen strömen über 1200 Grad heiße Gase. Damit die Schaufeln der Turbine solche Temperaturen dauerhaft aushalten können, fertigen die Hersteller sie heute aus drei verschiedenen Materialien:

Auch auf solchen Versuchsständen loten die Jülicher Wissenschaftler aus, wo die Hitzebeständigkeit neuer Keramiken an Grenzen stößt.

Auf einer NB-Legierung ist eine Korrosionsschutzschicht sowie ein Hitzeschutz aus Keramik aufgebracht. Durch diesen Aufbau „fühlt“ die Legierung nur 900 Grad – eine Temperatur, die sie in trockener Atmosphäre noch dauerhaft aushalten kann. Quadackers und seine Arbeitsgruppe „Hochtemperatur-Korrosion“ haben die Rezeptur des Haftvermittlers, wie der Korrosionsschutz auch genannt wird, weiterentwickelt. Die maßgeschneiderte Schutzschicht platzt auch unter den extremen Betriebsbedingungen nicht ab. Die keramische Schicht erfüllt nun in den Turbinen des Herstellers Siemens zuverlässig seine Aufgabe.

Auch den Hitzeschutz selbst haben Jülicher Forscher im Visier. Meist wird er durch so genanntes Plasmaspritzen aufgetragen. Dabei injiziert man ein keramisches Pulver in die sehr heiße Fackel eines Plasmabrenners, wo es schmilzt und beschleunigt wird. Ein Roboter fährt mit dem Brenner wie mit einem Pinsel die Oberfläche der Turbinenschaufel ab und trägt so die Wärmedämmschicht auf. Je nach Brenner, Pulverdurchsatz, Trägergasstrom,



Temperaturen des Plasmas und der Schaufel entstehen aus einem einzigen Keramikpulver unterschiedlich aufgebaute Schichten mit unterschiedlichen Eigenschaften.

„Günstig ist es, wenn die Schicht Mikrorisse und feine Poren aufweist: Dann hält sie die Spannungen am besten aus, die auftreten, weil sie sich bei Hitze nicht so stark ausdehnt wie die Superlegierung darunter“, erläutert Dr. Robert Vaßen, der in Jülich Wärmedämmschichten entwickelt. Er und sein Team versuchen den komplizierten Prozess des Plasmaspritzens so zu kontrollieren und zu steuern, dass sich wiederholbar Schichten mit einer vorteilhaften Mikrostruktur bilden. Dazu nutzen die Wissenschaftler diagnostische Methoden, mit denen sie die Geschwindigkeit der Teilchen und die Temperatur im Heißgasstrom bestimmen.

„Auf diese Weise haben wir herausgefunden, wie sich besonders dauerhafte Wärmedämmschichten aus Yttriumoxid-teilstabilisiertem Zirkonoxid (YSZ) herstellen lassen: Beispielsweise indem der Roboter mit dem Brenner möglichst häufig über jede zu beschichtende Stelle fährt, er dabei aber pro Durchgang

immer nur sehr wenig Material abscheidet“, so Vaßen. Dank eigener Computermodelle, die aus jahrelanger Forschung entstanden sind, weiß sein Team inzwischen sogar meist im Vorfeld, wie Mikrorisse entstehen und wie sie sich auf die Lebensdauer der Wärmedämmschichten auswirken.

1350 Grad: Kein Problem

Die neueste Entwicklung aus Vaßens Labor, ein doppelagiger Hitzeschutz, kann sogar 1350 Grad dauerhaft verkraften – rund 100 Grad mehr als die herkömmlichen Wärmedämmschichten aus YSZ. Ein Flugzeugturbinen-Hersteller, der ungenannt bleiben möchte, testet diesen Hitzeschutz zurzeit. Und derweil erforschen die Jülicher Wissenschaftler schon wieder neue Materialklassen. „Worum es sich handelt, würde ich ungern verraten“, so Vaßen. Was nur eines bedeuten kann: Die ersten Tests sind viel versprechend und die Industrie ist mit im Spiel.

Frank Frick

Solche Computersimulationen helfen den Jülicher Wissenschaftlern, schon frühzeitig die möglichen Schwachpunkte beschichteter Turbinenwerkstoffe aufzudecken. Die Farben geben an, wie sich die Zugspannung in vertikaler Richtung verteilt.

Manchmal hinterlassen die Hitzetests an den Keramiken deutliche Spuren (rechtes Bild), manchmal nicht (linkes Bild).



Im Brennpunkt: Kohlendioxid

Kohle und Gas bleiben noch viele Jahre lang die Basis einer wirtschaftlichen und sicheren Energieversorgung. Wenn diese fossilen Energieträger verbrannt werden, entsteht jedoch das Treibhausgas Kohlendioxid (CO₂). Ein möglicher Ausweg aus dem Dilemma ist es, CO₂ am Kraftwerk abzutrennen, um es anschließend zum Beispiel in wasserführenden Gesteinsschichten zu speichern. Die Jülicher Forscher analysieren und bewerten diese Zukunftstechnik.

Es ist zweifellos schwierig, eine neue Energietechnik zu bewerten. Gilt es doch, sehr unterschiedliche Fragen zu beantworten: Ist die Technik im Vergleich zu anderen Alternativen konkurrenzfähig? Welche Auswirkungen hat es auf die Umwelt, wenn sie eingesetzt wird? Was sind die Folgen und Chancen für die Gesellschaft, und wird die Gesellschaft die Energietechnik mitsamt möglicher Risiken akzeptieren?

Komplizierte Analysen

Wenn es sich um eine Technik handelt, die noch einen mehr oder weniger langen Weg zur Marktreife zurückzulegen hat, wird alles noch komplizierter. Dann muss nicht nur ihr Reifegrad in den Analysen berücksichtigt werden. „Auch die Randbedingungen für die Einführung der neuen Technologie verändern sich laufend – beispielsweise die Brennstoffpreise, der Entwicklungsstand der konkurrierenden Technologien oder die öffentliche Haltung zum Thema Klimaschutz“, erläutert Jürgen-Friedrich Hake, Leiter der Programmgruppe Systemforschung und Technologische Entwicklung in Jülich, kurz STE.

All diese Unwägbarkeiten gelten ebenso für die sich entwickelnde Technologie der CO₂-Abtrennung am Kraftwerk. Aber gesellschaftlicher und politischer Wille treiben die Forschung voran. So empfahl die Enquête-Kommission „Nachhaltige Energieversorgung“ 2002 dem Bundestag und der Bundesregierung, die nationalen Treibhausgasemissionen um 40 Prozent bis 2020 und um 80 Prozent bis 2050 zu reduzieren – gemessen an der Emission von 1990. Die Meßlatte hängt hoch: Der CO₂-Ausstoß von Kohle- und Gaskraftwerken lässt sich nach Experten-Schätzungen durch effizientere Energieumwandlung, also

durch die Steigerung des Wirkungsgrades, allenfalls noch um 25 Prozent verringern.

Drei Abtrennverfahren

Weiteren CO₂-Ausstoß könnte man am Kraftwerk abtrennen, will man die Vorgaben einhalten. Prinzipiell lässt sich CO₂ auf drei verschiedene Weisen abscheiden:

Nach der Stromerzeugung in einem herkömmlichen Kraftwerk wird das CO₂ aus dem Rauchgas abgetrennt – mit einem chemischen Waschverfahren ähnlich wie bei der Entschwefelung. Dieses Verfahren kommt auch für die Nachrüstung bestehender Anlagen in Frage, doch wird die CO₂-Abtrennung mit hohen Einbußen beim Wirkungsgrad erkaufte. Einfacher wäre es, das CO₂ mit Membranen aus dem Rauchgas abzutrennen – gleichsam wie mit einem Sieb.

Beim so genannten Oxyfuel-Prozess verbrennen Kohle und Gas nicht mit Luft, sondern mit reinem Sauerstoff. Die entstehenden Abgase enthalten dadurch einen hohen Anteil CO₂. Wird das CO₂ anschließend in die Verbrennung zurückgeführt, lässt es sich weiter aufkonzentrieren und dann direkt entsorgen. Die Jülicher Forschung entwickelt zur Zeit Membranen, die den nötigen Sauerstoff aus der Luft abscheiden (siehe auch Kasten „Membranen sollen trennen“). Dies verspricht eine höhere Wirtschaftlichkeit als bisherige Verfahren wie zum Beispiel die Tieftemperatur-Luftzerlegung. Schließlich gibt es noch die Möglichkeit, den Energieträger vor der Verbrennung in CO₂ und Wasserstoff zu überführen. Während das brennbare Wasserstoff zur Energieerzeugung in die Turbine geleitet wird, lässt sich das CO₂ in dieser Phase günstig abfangen. Auch hierfür wären Membranen geeignet, die diesmal Wasserstoff vom CO₂ trennen – wiederum Gegenstand von Jülicher Entwicklungsarbeiten.





Unscheinbare Hoffnungsträger: Der Jülicher Prototyp einer keramischen Membran, die Gase effizienter voneinander trennt als chemische Verfahren.

„Bei der Technikbewertung muss man alle drei Verfahren untereinander, aber auch mit ganz anderen Möglichkeiten der CO₂-Reduktion vergleichen, beispielsweise mit Windparks oder Energiesparmaßnahmen wie verstärkter Wärmedämmung“, sagt Hake. Deshalb haben die Jülicher Wissenschaftler immer das gesamte verzweigte deutsche Energiesystem im Blick: Energieträger, Umwandlungstechniken und Energieverbraucher werden in Computermodellen ebenso berücksichtigt wie politische und wirtschaftliche Voraussetzungen. So lässt sich das zukünftige Potential der CO₂-Abscheide-Technik abschätzen. Solche „Energiesystemmodelle“ im Computer verfolgen allerdings nicht den gesamten Lebensweg der Stoffe, die beispielsweise zur Erzeugung einer bestimmten Strommenge nötig sind und ermitteln nicht deren Umweltwirkung. Eine

solche lebenswegorientierte Bilanzierung – Fachjargon: Life Cycle Assessment – nehmen die Experten für ausgewählte Prozessketten modellgestützt ebenfalls vor.

Die Abscheidung kostet

Auch wenn noch viel Arbeit vor den Wissenschaftlern liegt, so kann Dr. Peter Markewitz, bei STE Leiter des Teams „Energiewirtschaftliche Strategien“, doch bereits eine Reihe von Detailergebnissen präsentieren. Beispielsweise wird den Berechnungen zufolge 2020 die Erzeugung einer Kilowattstunde Strom in einem konventionellen Braunkohlekraftwerk, das 6000 Stunden im Jahr läuft, rund drei Cent kosten. „Unter der Annahme, dass das abgetrennte CO₂ 200 Kilometer durch Pipelines transportiert und anschließend in einer wasserführenden Gesteinsschicht gespeichert wird, werden dagegen bei einem entsprechenden Kraftwerk mit CO₂-Abscheidung die Kosten für eine Kilowattstunde Strom je nach Abtrenungsverfahren bei 5 bis 6 Cent liegen“, so

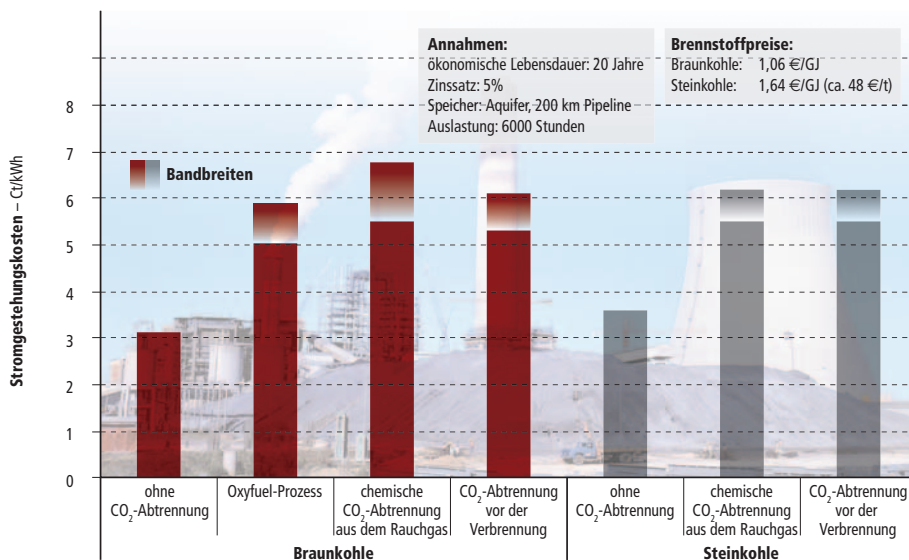
Markewitz. Die Frage, ob der Gesellschaft der Umweltschutz soviel wert sein wird, kann aber auch Markewitz nicht beantworten.

Frank Frick

Membranen sollen trennen

> 2004 startete das Projekt „CO₂-Abtrennung bei fossilen Kraftwerken“, bei dem Forscher aus mehreren Jülicher Instituten zusammenarbeiten. Internationale Gutachter hatten die Durchführung dieses so genannten „Additional Funding“ Vorhabens in Jülich empfohlen – mit diesem Begriff belegt die Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren innovative und strategisch bedeutsame Forschungsprojekte.

Die Aufgabe dreier Arbeitsgruppen im Jülicher Institut für Werkstoffe und Verfahren der Energietechnik ist es, Membranen zu entwickeln, mit denen Gase wie Wasserstoff und CO₂ oder Sauerstoff und Stickstoff voneinander getrennt werden können, diese zu testen und letztlich in das Gesamtsystem Kraftwerk zu integrieren. Die Zentralabteilung für Technologie nutzt ihr langjähriges Know-How, um spezielle Prüf- und Messapparaturen für die neue Technik zu bauen. Die Programmgruppe Systemforschung und Technologische Entwicklung nimmt schließlich eine umfassende energiewirtschaftliche und umweltseitige Bewertung (siehe Haupttext) vor. Das Zusammenspiel in Sachen CO₂- Abtrennung steht beispielhaft für die multidisziplinäre Vorgehensweise der Jülicher Forschung. Mehr zum Projekt unter www.co2separation.de.



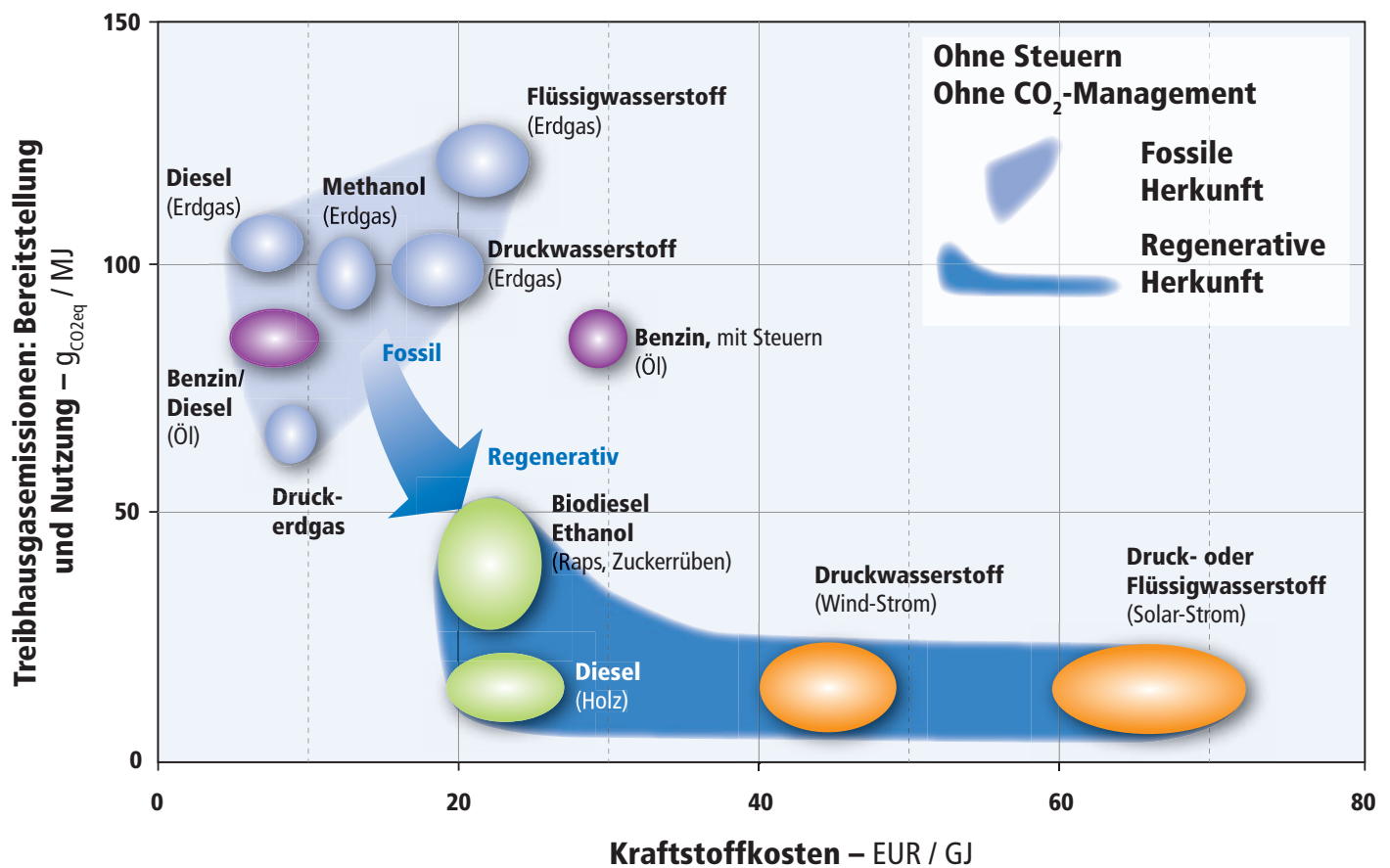
Klimaschutz gibt es nicht zum Nulltarif. Jülicher Forscher haben berechnet, dass der so genannte Oxyfuel-Prozess (siehe Text) eine vergleichsweise wirtschaftliche Abtrennung des Kohlendioxids ermöglicht.

Wege in die Wasserstoffwelt

Wasserstoff, das häufigste Element im Universum, setzt bei seiner Verbrennung kein klimaschädliches Kohlendioxid oder sonstige Schadstoffe frei – nur Wasserdampf und Wärme. Jülicher Wissenschaftler analysieren, unter welchen Umständen Wasserstoff eine Brücke zu einer nachhaltigen Energiewirtschaft sein kann.

Es klingt einfach paradiesisch: Sonne, Erdwärme, Wind, Wasser und Gezeiten liefern dank modernster Technologie den Strom, um Wohnungen, Büros und Fabriken zu versorgen. Und Wasserstoff – mit Hilfe dieses Stroms aus Wasser erzeugt – dient als klimaschonender und lebensfreundlicher Treibstoff zum Beispiel für Autos. Außerdem speichert er die erneuerbare – regenerative – Energie, die im tatsächlichen wie im sprichwörtlichen Sinne „in sonnigen Zeiten“ überschüssig produziert wird, um sie bei besonders starker Nachfrage zu liefern.

Paradiesische Zustände lassen sich, wie schon die einfache Lebenserfahrung lehrt, auf Erden nur schwer realisieren. Nicht erstaunlich also, dass auch Experten darüber diskutieren, welche Wege am schnellsten in eine rosige Zukunft führen. „Die entscheidende Frage ist, wie sich der Übergang in eine Wasserstofforientierte Energiewirtschaft realisieren lässt“, formuliert Prof. Bernd Höhlein, der am Institut für Werkstoffe und Verfahren der Energietechnik den Bereich Verfahrens- und Systemanalyse leitet. Denn die Wasserstoff-Welt wird nicht



Zwei Welten: Während fossile Treibstoffe heute billig sind, aber viel Kohlendioxid bei ihrer Nutzung anfällt, erzeugen regenerative Energieträger wenig Treibhausgas, sind aber noch teuer. Aus der Sicht der Jülicher Forscher könnten Linienbusse mit Brennstoffzellenantrieb und andere Nischenanwendungen die Brücke zu billigen und umweltfreundlichen Treibstoffen schlagen.

schlagartig entstehen, sondern es bedarf einer langfristigen Strategie und einer Zeit der allmählichen Umstellung.

Wasserstoff muss hergestellt werden

Um die Analysen und Diskussionen der Experten zu verstehen, muss man wissen: Wasserstoff kann man nirgendwo abbauen oder fördern. Er ist somit, wie es in der Fachsprache heißt, ein Sekundärenergieträger. Für seine Herstellung werden fossile Primärenergieträger – Kohle, Öl, Erdgas –, Kernenergie oder eben regenerative Energie benötigt. „Das bedeutet: Wasserstoff kann hinsichtlich klimaschädlicher Emissionen bestenfalls so gut sein wie der verwendete Primärenergieträger“, sagt Prof. Detlef Stolten, Leiter des Instituts für Werkstoffe und Verfahren der Energietechnik. Oder anders ausgedrückt: Bei der Umwandlung eines fossilen Primärenergieträgers in Wasserstoff, kann das Treibhausgas Kohlendioxid (CO₂) entstehen – was man bei jeder seriösen Betrachtung nicht vergessen darf.

Für einfache Brennstoffzellen

Nach dem Szenario der Jülicher Experten wird Wasserstoff zunächst – wie auch heute schon üblich – überwiegend erdgasbasiert hergestellt werden. Später dann wird der Wasserstoff elektrolytisch zunehmend mittels Strom erzeugt, der aus regenerativen Energiequellen stammt. Dabei ist allerdings stets zu prüfen, ob möglicherweise der energetisch günstige direkte Einsatz dieses nichtfossilen Stroms im Netz sinnvoller ist. „Mittel- bis langfristig wird die Speicherung und Nutzung von CO₂-freiem Strom in Form von Wasserstoff eine wichtige Rolle im Energiesystem spielen“, so Höhle. Doch schon zuvor kann es durchaus richtig sein, Wasserstoff einzusetzen – selbst wenn er aus fossilen Quellen stammt: „Wasserstoff

führt zu sehr einfachen Brennstoffzellensystemen, die Energie besonders effizient nutzen können. Damit beschleunigt Wasserstoff als Energieträger die Markteinführung dieser viel versprechenden Technologie“, sagt Dr. Bernd Emonts, der in Jülich den Bereich Niedertemperatur-Brennstoffzellen koordiniert. Außerdem können auch besondere regionale Verhältnisse die Verwendung von Wasserstoff rechtfertigen: beispielsweise um den Ausstoß umwelt- und gesundheitsbelastender Emissionen lokal zu senken. Solche Gesichtspunkte rücken immer stärker in den Focus der gesellschaftlichen Diskussionen. Zunehmend wird der Einsatz fossiler Energieträger wie Kohle und Gas mit der Abtrennung und Endlagerung von Kohlendioxid einhergehen (siehe auch „Im Brennpunkt: Kohlendioxid“, S. 30).

In der Umstellungsphase ist am Wasserstoff vorteilhaft, dass er auf verschiedenen Wegen hergestellt werden kann und dass er sich gleichzeitig für herkömmliche Verbrennungsmotoren wie auch für neue Energieumwandlungssysteme mit Brennstoffzellen nutzen lässt. Anfänglich, so die Prognose der Jülicher Wissenschaftler, wird Wasserstoff über Nischen in den Markt eingeführt: beispielsweise in Brennstoffzellen, die als Akkuersatz tragbare elektronische Geräte lange und ohne Unterbrechung mit Energie versorgen, oder als Brennstoff für Linienbusse und Fahrzeugflotten im Stadtverkehr. Erst mittel- bis langfristig würde die Wasserstoffnutzung im Energiemarkt bedeutende infrastrukturelle Maßnahmen erforderlich machen – beispielsweise ein dichtes Versorgungsnetz und flächendeckende Tankstellen.

Die Wissenschaftler in Jülich sind überzeugt, dass eine ständige Analyse aller Prozesse im



Erste Wasserstoff-Tankstellen gibt es in Deutschland bereits. Doch ein dichtes und flächendeckendes Versorgungsnetz bedarf noch großer wirtschaftlicher Anstrengungen und gesellschaftlichen Willens.
Foto: Linde AG

System nötig ist – von der Energiequelle bis zum Energieverbraucher. Nur so kann für eine zu versorgende Region sichergestellt werden, dass das veränderte Energieträgersystem tatsächlich zu einem geringeren Primärenergiebedarf und zu einem geringeren Ausstoß von Treibhausgas führt. Eines muss dabei jedem klar sein: „Der Weg zu treibhausgasfreien Energieträgern wird zu einem höheren Kostenniveau führen“, betont Höhle. Das Paradies hat seinen Preis.

Frank Frick

Der Weg in die Zukunft

Gas- und Kohlekraftwerke, Solarstromanlagen, Brennstoffzellen und Fusionsreaktoren: Jede dieser Energietechnologien wird im Forschungszentrum Jülich weiterentwickelt. Doch sie benötigen sehr unterschiedliche Zeitspannen, um alltägliche Technik zu werden.

Heute sind Gas- und Kohlekraftwerke das Rückgrat unserer Stromversorgung. Dabei holen Kraftwerke, die derzeit neu errichtet werden, mehr Strom aus den fossilen Brennstoffen als Kraftwerke, die heute in Betrieb sind. Denn immer hitzestabilere und langlebigere Werkstoffe ermöglichen immer höhere Verbrennungstemperaturen und Wirkungsgrade – ein Trend, der dank intensiver Forschungsarbeit auch künftig anhalten soll.

Mehr Stromausbeute heißt gleichzeitig auch weniger Ausstoß an Treibhausgas. Beliebig verringern lassen sich die Emissionen auf diese Weise jedoch nicht. Deshalb erforschen Jülicher Wissenschaftler eine Technologie, mit der in den Kraftwerken der übernächsten Generation Kohlendioxid abgetrennt werden kann. Diese Generation wird voraussichtlich ab dem Jahre 2020 gebaut.

Mit der Photovoltaik wurde 2004 in Deutschland ein Umsatz von 1,7 Milliarden Euro gemacht – ein beachtlicher Erfolg. Dennoch

deckten Solaranlagen im gleichen Jahr nur rund 0,1 Prozent des deutschen Strombedarfs. Damit sich der Anteil des Solarstroms künftig deutlich erhöht, muss die Photovoltaik leistungsfähiger und vor allem billiger werden. Die Jülicher Forscher sind überzeugt: Die Kosten für ihre Dünnschicht-Solarzellen lassen sich stärker senken als diejenigen für die heute üblichen kristallinen Solarzellen. Module dieser neuen Bauart könnten ab 2010 auf den Markt drängen.

Brennstoffzellen für Wohnhäuser und Autos gibt es noch nicht zu kaufen. Doch die Gerätehersteller führen bereits Feldversuche durch, und die Autokonzerne lassen Testflotten über die Straßen rollen. Mit den ersten Serienprodukten wird zwischen 2010 und 2015 gerechnet. Dabei haben sowohl die Hochtemperatur-Brennstoffzelle (SOFC) als auch die Direktmethanol-Brennstoffzelle (DMFC) ihre Berechtigung. Die SOFC ist besonders für die stationäre Strom- und Wärmeversorgung geeignet, während die DMFC eher in portablen Kleingeräten und Fahrzeugen zum Einsatz kommen wird.

Bis das erste Fusionskraftwerk Strom ins Netz einspeist, werden noch mehr als 40 Jahre vergehen. Der nächste Schritt dahin ist zunächst die Fusionsanlage ITER, die derzeit in Frankreich errichtet wird. Wissenschaftler und Techniker aus aller Welt werden dort ein Plasma entfachen, das erstmals mehr Energie liefert als es verbraucht. Jülicher Wissenschaftler tragen mit ihrer Forschung dazu bei, dass ITER ein Erfolg wird.

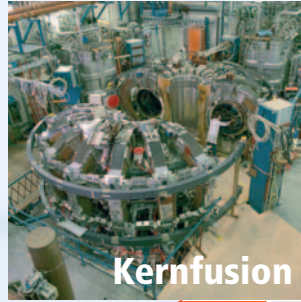
Mit der Forschung auf den verschiedenen Gebieten – von der Fusion bis zur Brennstoffzelle, von den konventionellen Kraftwerken bis zur Photovoltaik – hält das Forschungszentrum Jülich alle Möglichkeiten für eine sichere Energieversorgung in der Zukunft offen. Erst eine vernünftige Mischung wird den künftigen Bedarf an Energie zuverlässig, umweltfreundlich und wirtschaftlich decken können.

2010

2006



Effizientere Kraftwerke



Kernfusion

2050



**Kohlendioxid-
Abtrennung**

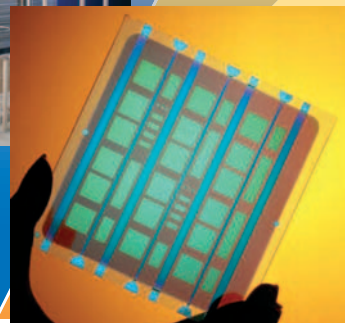
2020



**DMFC-
Brennstoffzelle**



**SOFC-
Brennstoffzelle**



**Dünnschicht-
Solarzellen**



Forschungszentrum Jülich
in der Helmholtz-Gemeinschaft

