

FORSCHEN in Jülich



ENERGIE

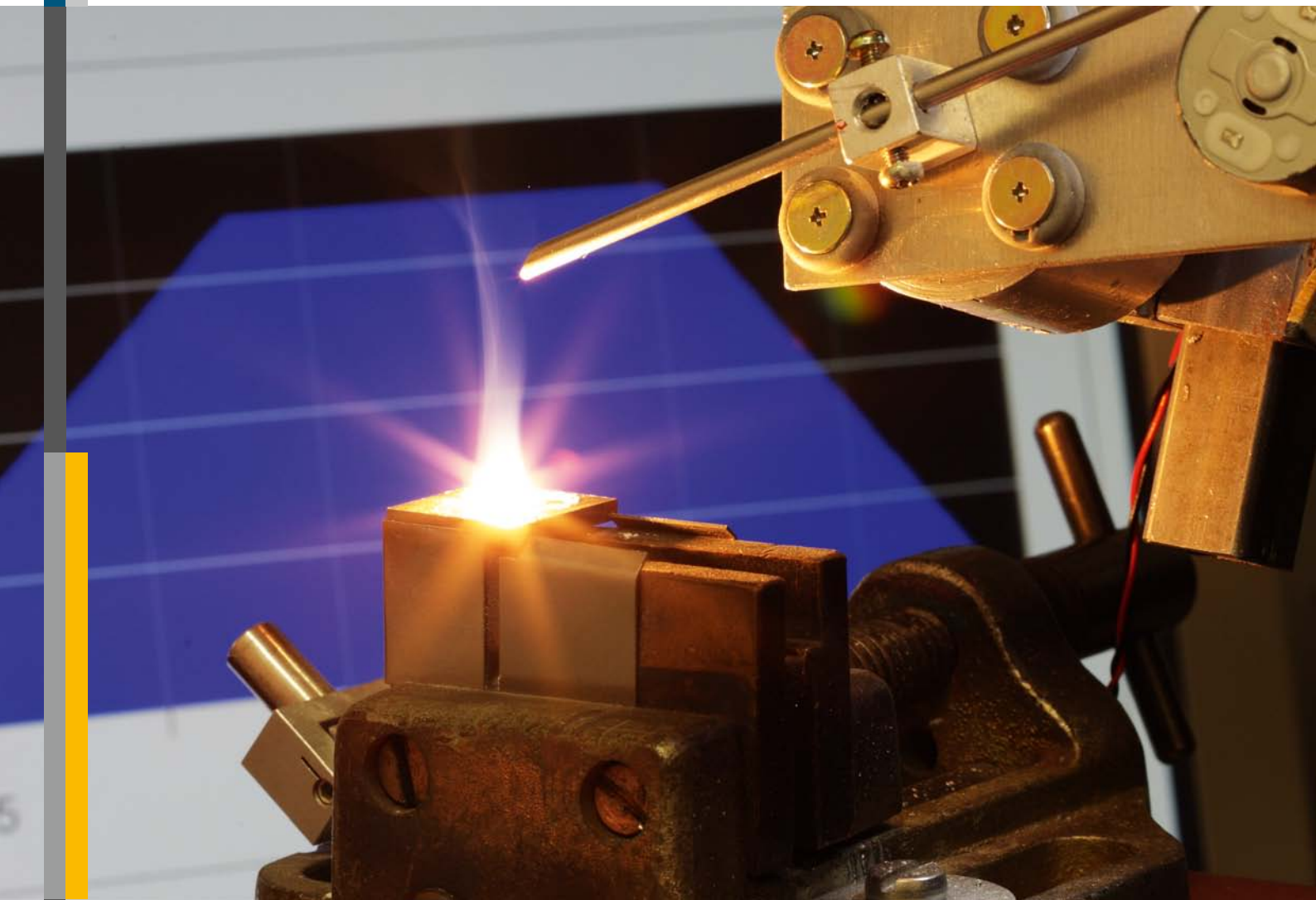
:: SUPERMATERIAL FÜR SOLARZELLEN

:: MEMBRANEN GEGEN DIE GLOBALE ERWÄRMUNG

:: ENERGIESPAREN IM TREIBHAUS

FORSCHEN in Jülich

Das Magazin aus dem Forschungszentrum



Eine Probe aus gläsernem Füge- und Dichtmaterial für Hochtemperatur-Brennstoffzellen wird mit einem unsichtbaren Laserstrahl geschmolzen.

Titelbild: Erstarrte gläserne Tropfen, aus denen Dichtungsmaterial für Festoxidbrennstoffzellen (SOFC) hergestellt wird.



Wege zu einer nachhaltigen Energieversorgung

Um das Ziel einer nachhaltigen Energieversorgung zu erreichen, ist ein grenzübergreifendes Umdenken notwendig. Die Internationale Energieagentur IEA bestätigt zwar, dass es in der Energieerzeugung erste positive Entwicklungen gibt, der weltweite Energieverbrauch und die Emissionen von Kohlendioxid (CO₂) jedoch weiter steigen.

Die Grundlage für einen nachhaltigen Wandel in der Erzeugung und dem Umgang mit Energie bildet innovative Forschung. Das Forschungszentrum Jülich nimmt in diesem Prozess eine Schlüsselrolle ein und hat die Energieforschung zu einem der drei Schwerpunktbereiche in seinem Forschungsportfolio gemacht. Im Fokus steht dabei die Suche nach Umsetzungsmöglichkeiten für eine umweltverträgliche, aber auch sichere und bezahlbare Energieversorgung. Gleichzeitig untersuchen wir die Mechanismen und Stellschrauben der globalen Erwärmung und entwickeln energieeffiziente Großgeräte wie den europaweit führenden Supercomputer QPACE.

Um über bestehende Strukturen hinaus neue Lösungen und Ansätze zu entwickeln, ist ein fachübergreifender Dialog zu den zentralen Fragen der Energieversorgung notwendig. Wir bündeln deshalb in Zukunft unsere Aktivitäten in diesem Bereich unter einem gemeinsamen Dach: dem Institut für Energie- und Klimaforschung (IEK). In ihm forschen Wissenschaftler des früheren Instituts für Energieforschung (IEF) zusammen mit Atmosphärenforschern des ehemaligen Instituts für Chemie und Dynamik der Geosphäre (ICG-1 und ICG-2), – insgesamt gut 600 Mitarbeiter –, mit dem gemeinsamen Ziel, das Optimum für unsere Zukunft zu gewährleisten.

Dennoch wird keine Institution allein das Energieproblem lösen können. Deshalb ist es notwendig, grenzübergreifende Kooperationen aufzubauen, um

gemeinsam neue Wege in der Energieforschung zu gehen. Mit dem führenden Forschungszentrum in den USA, dem Oak Ridge National Laboratory, verbindet uns bereits seit Jahrzehnten eine funktionierende Forschungspartnerschaft. In direkter Nachbarschaft pflegen wir seit 2007 ein einzigartiges Kooperationsmodell mit der RWTH Aachen, die Jülich Aachen Research Alliance (JARA). In der Sektion JARA-Energy erforschen wir gemeinsam Themen wie dezentrale Energieversorgung und -speicher, Kraftwerkstechnologien und Fragen der nuklearen Entsorgung.

Dabei beschränken wir uns nicht auf eine Technik. Unsere Forscher arbeiten an verschiedenen Lösungen, das Energieproblem anzugehen. In diesem Heft möchten wir Ihnen unter anderem vorstellen, wie innovative Materialien konventionelle Kraftwerkstechniken umweltfreundlicher und erneuerbare Energien wirtschaftlich machen, und wie sie ein Herzstück bei der Realisierung von Zukunftstechniken wie der Kernfusion werden. Wir stellen Ihnen außerdem vor, wie sich durch neuartige Ideen Energie in Treibhäusern sparen lässt, Brennstoffzellen in Lkw eingesetzt werden können und welche Konzepte Forscher entwickeln, um Reststoffe aus der Kerntechnik einzulagern.

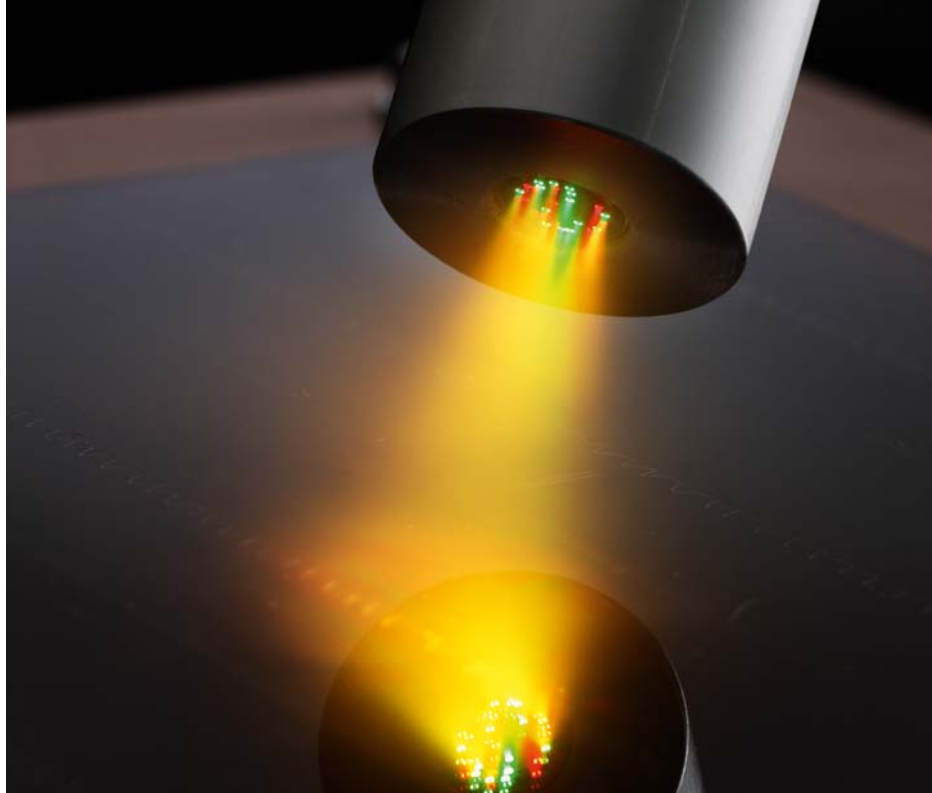
Eine anregende Lektüre wünschen Ihnen



Prof. Dr. Achim Bachem
Vorstandsvorsitzender des
Forschungszentrums Jülich



Prof. Dr. Harald Bolt
Mitglied des Vorstands



10

:: SUPERMATERIAL FÜR SOLARZELLEN

In speziellen Tests beweisen Jülicher Solarzellen, die eine neue hochtransparente Fensterschicht besitzen, dass sie das gesamte Spektrum der natürlichen Sonnenstrahlung besonders gut ausnutzen.



16

MEMBRANEN GEGEN DIE GLOBALE ERWÄRMUNG

Jülicher Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler entwickeln Membranen, die das Treibhausgas Kohlendioxid aus den Abgasen von Kohlekraftwerken abtrennen und somit helfen, das Klima zu schützen.



32

ENERGIESPAREN IM TREIBHAUS

Tomaten, Paprika und Co. wachsen besser, wenn das Gewächshaus mit einer neuen Glas-Folien-Kombination eingedeckt wird, die besonders viel natürliches Licht durchlässt. Mit ihr lässt sich zudem beim Anbau von Pflanzen sehr viel Energie einsparen.

IN DIESER AUSGABE

3 Editorial

:: SCHNAPPSCHÜSSE AUS JÜLICH

6 Forschung im Überblick

Ein Kaleidoskop von Bildern zeigt Höhepunkte aus der Jülicher Forschung – vom Aufbruch in eine neue Computer-Ära über die Entwicklung eines Spürgerätes für gefährliche Flüssigkeiten bis hin zu einer neuen Behandlungsmethode gegen Tinnitus.

:: SCHWERPUNKT

9 Materialien im Brennpunkt

10 Supermaterial für Solarzellen

Neue Baustoffe machen die klima- und umweltfreundliche Fotovoltaik effizienter und preisgünstiger.

13 Auf dem Weg zum internationalen Fusionsreaktor

Jülicher Forscher sind weltweit gefragte Experten, wenn es um Material und Konstruktion der Innenwände von Fusionsanlagen geht.

16 Membranen gegen die globale Erwärmung

Mithilfe von Membranen zur Trennung von Gasen sollen Kohlekraftwerke künftig klimafreundlicher werden.

18 Hitzeschutz in der Turbine

Neue keramische Wärmedämmschichten für Turbinen erhöhen die Effizienz von Kraftwerken.

20 Schön und rätselhaft

Bilder aus der Jülicher Forschung

:: HIGHLIGHTS

22 Der Energiemix der Zukunft

Interview mit Dr. Thom Mason, Direktor des US-amerikanischen Oak Ridge National Laboratory

24 Diesel besser nutzen

Brennstoffzellen-Systeme werden womöglich bald umweltfreundlich den Strom erzeugen, der im Lastwagen für Heizung und Klimaanlage benötigt wird.

27 Simulieren für die Fusion

In Jülich steht ein Supercomputer, mit dem das Wissen aus bisherigen Fusionsexperimenten auf künftige größere Anlagen übertragen wird.

28 Fahren ohne Benzin

Know-how aus der Brennstoffzellenforschung hilft bei der Entwicklung leistungsfähiger Batterien für Elektroautos.

30 Forschung für die Eine-Million-Jahre-Sicherheit

Jülicher Wissenschaftler untersuchen, was passiert, wenn abgebrannte Brennelemente in Kontakt mit Wasser kommen.

32 Energiesparen im Treibhaus

Glas-Folien-Kombination statt Einfachglas: So können Gartenbauer den Energieverbrauch im Gewächshaus senken.

34 Nachrichten rund um die Energie- und Umweltforschung

Über die Studie „Energietechnologien 2050“, den energieeffizientesten Supercomputer der Welt und Höhenflüge für das Klima.

AUFBRUCH IN NEUE RECHNER-ÄRA

In den nächsten zehn Jahren soll die Rechenleistung von Supercomputern um den Faktor 1000 gesteigert werden – auf ein Exaflop/s, also eine Trillion Rechenoperationen pro Sekunde. Dazu gründeten das Forschungszentrum Jülich und IBM ein „Exascale Innovation Center“. Auch Intel und ParTec unterzeichneten mit dem Forschungszentrum einen Vertrag über ein gemeinsames „ExaCluster Laboratory“. Dabei bestätigte Kirk Skaugen, Vice President der Intel Data Center Group: „Jülich hat eine führende Rolle, um die Forschung im Bereich Supercomputing in Europa voranzutreiben.“

ENERGIEEFFIZIENTE COMPUTER-CHIPS

Forscher der Jülich Aachen Research Alliance (JARA) haben ein neues Schaltungskonzept für einen speziellen Chip verwirklicht. Damit wird der Weg zu einem leistungsfähigen Computer von übermorgen geebnet, der wenig Energie verbraucht. Bei den sogenannten Memristor-Chips kann der Widerstand programmiert werden und bleibt anschließend gespeichert. Die Forscher lösen mit ihrer Schaltung ein fundamentales Problem dieser Bauelemente: Deren Speichergröße war bislang extrem begrenzt, weil sich bei ihrem Betrieb eine Informationsüberlagerung zwischen benachbarten Einheiten – das Übersprechen – nicht vermeiden ließ.

HILFE BEI TINNITUS

Der Neurostimulator T30CR zur Behandlung von chronischem Tinnitus hat die EU-Zulassung erhalten. Entwickelt von der Firma Adaptive Neuromodulation GmbH (ANM), basiert das kleine Gerät auf Forschungsergebnissen aus dem Forschungszentrum Jülich. Der Neurostimulator bekämpft das lästige Klingeln im Ohr, das nach Schätzungen drei Millionen Deutschen zu schaffen macht, durch gezielte akustische Impulse. Mit ihnen unterbricht er den krankhaften Gleichtakt von Nervenzellverbänden im Gehirn, die für das permanente Ohrgeräusch verantwortlich sind.

SHAMPOOS UND SCHERKRÄFTE

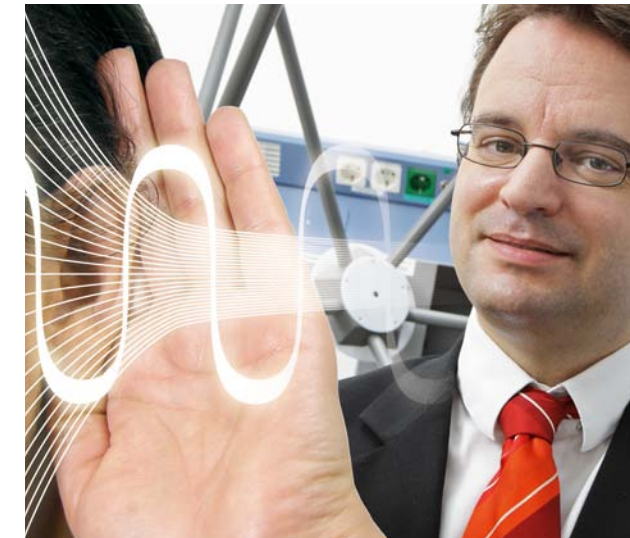
Alltägliche Produkte wie Shampoos und Plastik sind eine Mischung aus komplexen Zutaten, etwa Polymeren und anderen langkettigen Molekülen. Zu hoher Druck oder zu starkes Rühren bei der Produktion trennen oftmals Flüssigkeiten wieder aus der Mischung ab. Dabei spielen die Scherkräfte an den Behälterwänden eine große Rolle. Wissenschaftler aus Jülich und Lyon haben nun erstmals experimentell nachweisen können, wie ein unsichtbarer Gleitprozess zu stabileren Flüssigkeiten führt. Mit ihren Erkenntnissen kann das Fließverhalten von komplexen Flüssigkeiten künftig besser vorhergesagt werden.

Forschung im Überblick

Die Jülicher Energie- und Umweltforschung steht im Mittelpunkt dieses Magazins. Jülicher Wissenschaftler sind aber auch auf anderen Forschungsgebieten aktiv und erfolgreich.

LINKTIPP

www.fz-juelich.de/portal/kurznachrichten

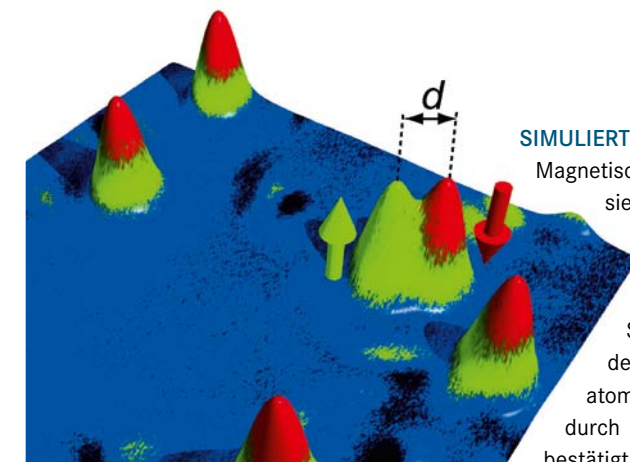


SPÜRGERÄTE FÜR GEFÄHRLICHE FLÜSSIGKEITEN

Jülicher Physiker haben den Prototypen eines Detektors vorgestellt, der zuverlässig und blitzschnell beispielsweise zwischen Flüssigsprennstoff und harmlosen Substanzen unterscheiden kann. Künftig könnte er als Kontrollgerät am Flughafen eingesetzt werden und so das weitgehende Mitnahmeverbot von Flüssigkeiten und Gelen – dazu zählen Erfrischungsgetränke, viele Kosmetika und Medikamente – unnötig machen. Die Forscher stehen mit Industrieunternehmen in Kontakt, deren Part es sein soll, den Prototypen zu einem marktfähigen Produkt weiterzuentwickeln.

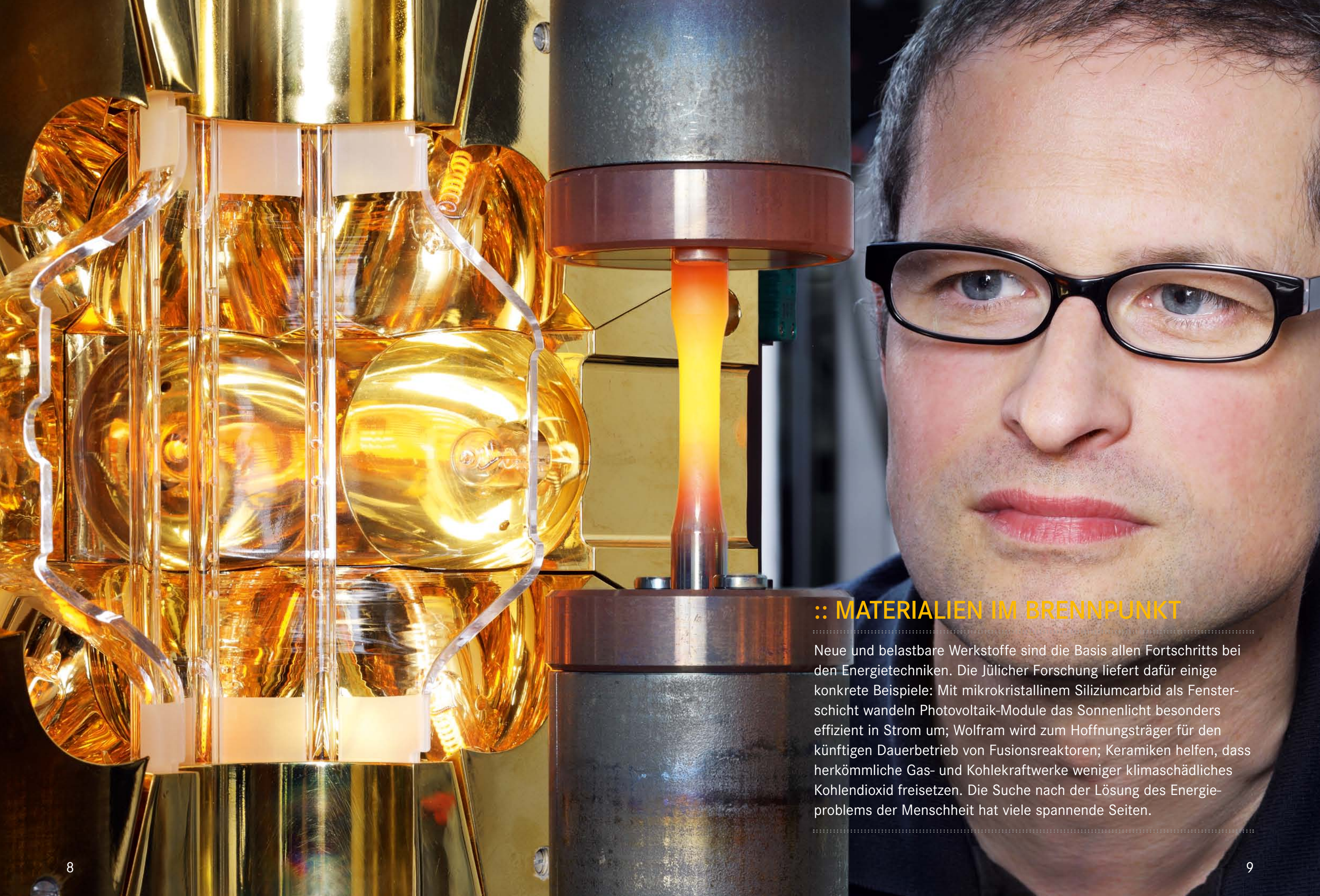
EXZELLENTER NACHWUCHS

Die Forschung von Dr. Sebastian Feste und Dr. Dörte Gocke könnte unterschiedlicher kaum sein: Er befasst sich mit der Herstellung und Analyse von Silizium-Bauelementen für die Nanoelektronik – sie sich mit Enzymen, die unter anderem zur Produktion von Ausgangsstoffen für Pharmazeutika eingesetzt werden können. Gemeinsam ist den Jülicher Nachwuchswissenschaftlern, dass sie mit ihren Ideen ihrem Forschungsgebiet entscheidende Impulse gaben: Dafür erhielten sie den Exzellenzpreis 2010 des Forschungszentrums, der mit jeweils 5000 Euro dotiert ist.



SIMULIERTE ELEMENTARMAGNETE

Magnetische Atome verhalten sich wie winzige Kompassnadeln, deren Magnetisierung aber nur zwei Einstellungen kennt, entweder nach oben oder nach unten. Jülicher Wissenschaftler haben nun mit dem Supercomputer JUGENE das Verhalten von einzelnen Kobaltatomen auf einer Platinoberfläche simuliert und bestimmt, wie sich die elementaren Stabmagnete in ihrer Ausrichtung gegenseitig beeinflussen. Das detaillierte Wissen über diese magnetische Kopplung kann helfen, atomare Datenspeicher zu entwickeln. Das Simulationsergebnis wurde durch experimentelle Messungen von Forschern der Universität Hamburg bestätigt.



:: MATERIALIEN IM BRENNPUNKT

Neue und belastbare Werkstoffe sind die Basis allen Fortschritts bei den Energietechniken. Die Jülicher Forschung liefert dafür einige konkrete Beispiele: Mit mikrokristallinem Siliziumcarbid als Fenster-schicht wandeln Photovoltaik-Module das Sonnenlicht besonders effizient in Strom um; Wolfram wird zum Hoffnungsträger für den künftigen Dauerbetrieb von Fusionsreaktoren; Keramiken helfen, dass herkömmliche Gas- und Kohlekraftwerke weniger klimaschädliches Kohlendioxid freisetzen. Die Suche nach der Lösung des Energie-problems der Menschheit hat viele spannende Seiten.

Supermaterial für Solarzellen

Jülicher Forscher entwickeln neue Baustoffe für Solarzellen, die diese umwelt- und klimafreundliche Energietechnologie preisgünstiger und effizienter machen sollen.

Verschiedenfarbige Leuchtdioden werfen ihr Licht auf die schwarze Fläche einer Solarzelle. Die Anordnung dient dazu herauszufinden, welche Teile des Sonnenlicht-Spektrums die Solarzelle besonders gut nutzt.

Immer mehr schwarz-glänzende Dächer in Stadt und Land zeigen: Fotovoltaik ist ein Wachstumsmarkt. Die Verwandlung von Sonnenlicht in Strom ist eine unerschöpfliche, saubere Energiequelle und eine Industrie, die Arbeitsplätze schafft. Allein in Deutschland waren 2008 rund 57.000 Menschen in der Fotovoltaikbranche beschäftigt. Noch allerdings sind die Herstellungskosten für Solarzellen relativ hoch. Wirtschaftlicher könnten die glänzenden Stromerzeuger werden, wenn es gelingt, sie aus möglichst dünnen Schichten zu bauen: Das spart kostspieliges Material ein und senkt den Energieaufwand für die Produktion.

Dünnschicht-Solarzellen auf Basis eines Silizium-Materials, bei dem die atomaren Bausteine nicht in Kristallgittern angeordnet sind, werden bereits produziert. Zellen, bei denen das Halbleitermaterial in einer stärker geordneten Struktur vorliegt, könnten höhere Wirkungsgrade erreichen. Speziell für die der Sonne zugewandte Fensterseite der Solarzellen ist kristallines Material besser geeignet. Einen besonders vielversprechenden Stoff hierfür entwickelt ein Team um Dr. Friedhelm Finger: Am Jülicher Institut für Energie- und Klimaforschung (IEK) stellen die Solarenergie-Forscher mikrokristallines Siliziumcarbid her – ein

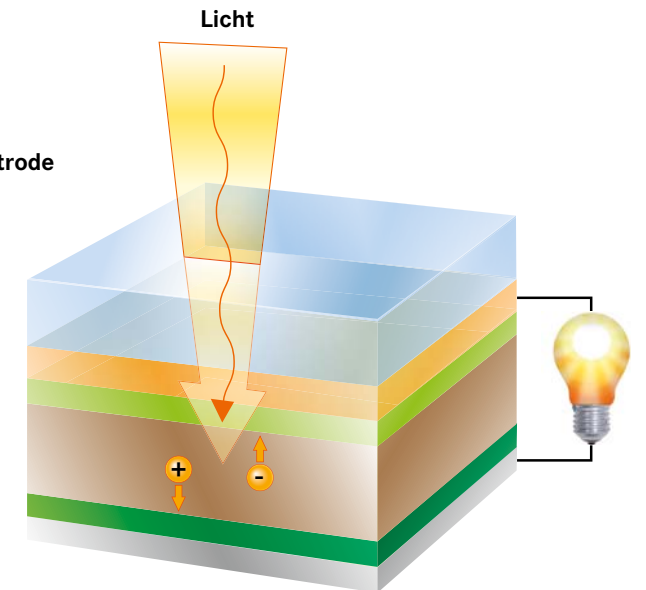
Aufbau in Schichten – die Solarzelle

Schließt man einen elektrischen Leiter an die Kontakte einer Solarzelle, so fließen wie bei einer Batterie Elektronen, also Strom, vom Minus- zum Pluspol. Damit das möglich ist, müssen in der Solarzelle Elektronen und frei bewegliche positive Ladungsträger – Atome, die ein Elektron abgegeben haben – zunächst erzeugt und dann voneinander so getrennt werden, dass sie sich an den Kontakten ansammeln. Die Energie für diese Vorgänge stammt aus den Lichtteilchen, die in der Solarzelle eingefangen wurden.

Solarzellen basieren auf bestimmten Materialien, den Halbleitern. Halbleiter wie etwa Silizium werden bei Zufuhr von Wärme oder Licht elektrisch leitend. Indem man sie gezielt verunreinigt – Wissenschaftler sprechen von „dotieren“ –, kann man die Zahl der beweglichen Ladungsträger in der Solarzelle und damit auch die Stromausbeute erhöhen.

Der Aufbau einer Solarzelle, wie sie in Jülich erforscht wird, ist hier schematisch abgebildet: Zwei Elektroden – die Kontakte – umschließen ein Paket aus drei verschiedenen Halbleiterschichten. Die obere Elektrode ist lichtdurchlässig, damit die Lichtteilchen bis in die Halbleiter-

-  Glas
-  transparente Elektrode
-  n-dotiertes mikrokristallines Siliziumcarbid
-  i-Schicht
-  p-dotiertes mikrokristallines Silizium
-  reflektierender Rückkontakt



schichten durchdringen. Die obere Elektrode kann Lichtteilchen, die übers Ziel hinausgeschossen sind, zurück in die Halbleiterschichten reflektieren (reflektierender Rückkontakt). So wird alles einfallende Sonnenlicht optimal ausgenutzt. Eine Glasschicht schützt die Solarzelle. Das Halbleiter-Sandwich im Inneren der Solarzelle besteht aus einer undotierten i-Schicht in der Mitte, die zwei unterschiedlich dotierte Schichten miteinander verbindet: die sogenannte n- und die

p-dotierte Schicht. In die n-dotierte Schicht (n für negativ) schleusen die Forscher Fremdatome, die mehr Elektronen mitbringen als das Ausgangsmaterial. In die p-dotierte Schicht (p für positiv) werden Atome eingefügt, die weniger Elektronen besitzen als ihre Nachbarn. Diese Schicht leitet positive Ladungen. Die Kombination der drei Halbleiter-Schichten bewirkt, dass Elektronen und positive Ladungsträger systematisch getrennt werden.

Material aus vielen kleinen Kristallen, die je zur Hälfte aus Silizium- und Kohlenstoffatomen bestehen.

DURCHSCHEINEND UND DAUERHAFT

„Das ist einfach ein Supermaterial“, sagt Finger. Denn mikrokristallines Siliziumcarbid bietet viele Vorteile, von denen Materialforscher in der Solartechnik träumen: Ladungsträger sind darin gut beweglich, es ist äußerst stabil, und es ist durchscheinend. „Kristallines Siliziumcarbid lässt sich daher als ideale Fensterschicht für Dünnschicht-Solarzellen verwenden“, erläutert Finger. Die Fensterschicht ist die Seite, von der das Sonnen-

licht auf eine Solarzelle trifft. Dabei verringert Siliziumcarbid auch noch die Lichtreflexion. Diese „Entspiegelung“ und die hohe Transparenz führen dazu, dass das Licht besonders gut ausgenutzt wird.

Indes ist das „Supermaterial“ nicht leicht in der gewünschten Qualität herzustellen. Versucht habe man das seit den Achtzigerjahren, schildert Finger die Vorgeschichte. Doch scheiterten die frühen Versuche mit den Ausgangsstoffen Silan und Methan daran, dass die Forscher nicht das richtige Mengenverhältnis von Silizium und Kohlenstoff hinbekamen. Nur wenn sich beide Elemente im Verhältnis 1:1 verbinden, entstehen transpa-

rente Kristalle mit hoher Leitfähigkeit. Auch erforderte die Herstellung Temperaturen weit über 1000 Grad Celsius. Übliche Trägermaterialien, wie etwa Glasplatten, halten solchen Bedingungen nicht stand. Zudem brauchen Hochtemperaturverfahren viel Energie und sind sehr teuer – nichts für die preiswerte Massenproduktion von Solarzellen also.

Inzwischen aber nutzt man in Jülich ein neues Verfahren, die sogenannte Hot-Wire-Technik (hot wire = engl. „heißer Draht“). Ausgangssubstanz ist dabei Monomethylsilan, eine gasförmige Verbindung aus je einem Kohlenstoff- und einem Siliziumatom, an die jeweils drei



Da gilt es, den Durchblick zu behalten: eine der Anlagen, mit denen Jülicher Forscherinnen und Forscher die dünnen Schichten einer Solarzelle herstellen.

Wasserstoffatome gebunden sind. Kohlenstoff und Silizium sind also von vornherein im gewünschten Verhältnis 1:1 verbunden. Wird dieses Gas in eine Kammer mit einem heißen Draht aus Wolfram oder Tantal gebracht, spaltet sich Wasserstoff ab und das entstehende Siliziumcarbid schlägt sich bei 300 Grad auf einer Substratfläche nieder. Auf diese Weise lassen sich mikrokristalline Schichten hoher Qualität herstellen, die zwischen 10 und 60 Nanometer (millionstel Millimeter) dick sind. Solarzellen mit einer solchen Fensterschicht erreichen bereits einen Wirkungsgrad von 9,6 Prozent. „Ein Spitzenwert!“, freut sich Finger.

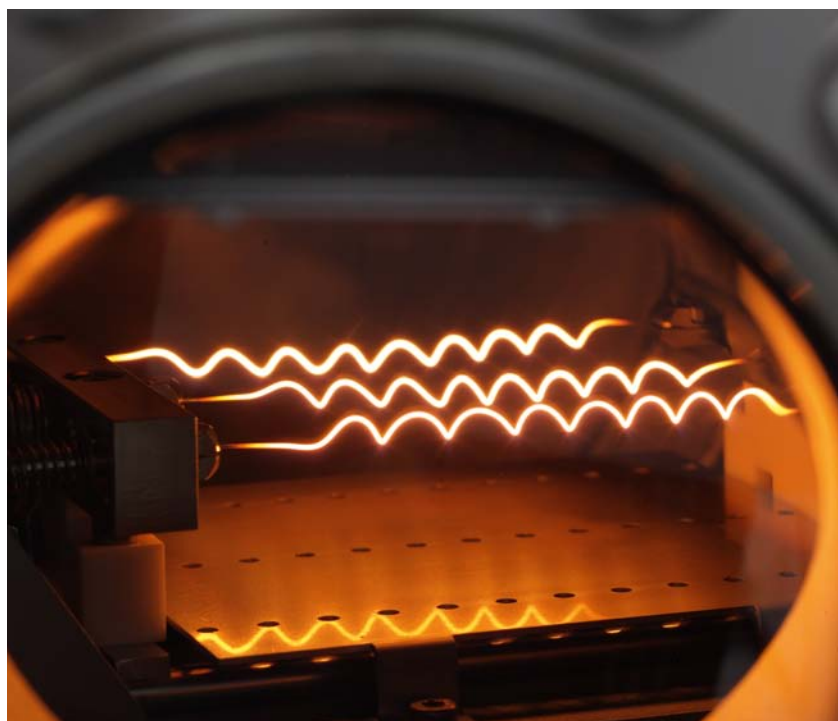
Doch die Forscher wollen noch mehr. „Die Schichten, die wir so erzeugen, haben zwar eine hohe Leitfähigkeit. Doch aus Gründen, die wir noch nicht völlig verstehen, leitet das Material vorwiegend freie Elektronen, ist also n-leitfähig“, berichtet Finger. Damit lassen sich zwar auch Solarzellen bauen – das Licht muss dann von der Seite mit der n-leitfähigen Schicht kommen.

Für die besonders effektiven Tandem-Solarzellen, wie sie in Jülich entwickelt werden, ist jedoch p-leitfähiges Siliziumcarbid erforderlich. Die Jülicher Forscher können es erzeugen, indem sie Aluminium-Atome in das Material einbauen. Diese „Dotierung“ erzeugt im Siliziumcarbid positive Ladungen (siehe Kasten „Aufbau in Schichten – die Solarzelle“, S. 11). „Wir verwenden dafür Trimethyl-

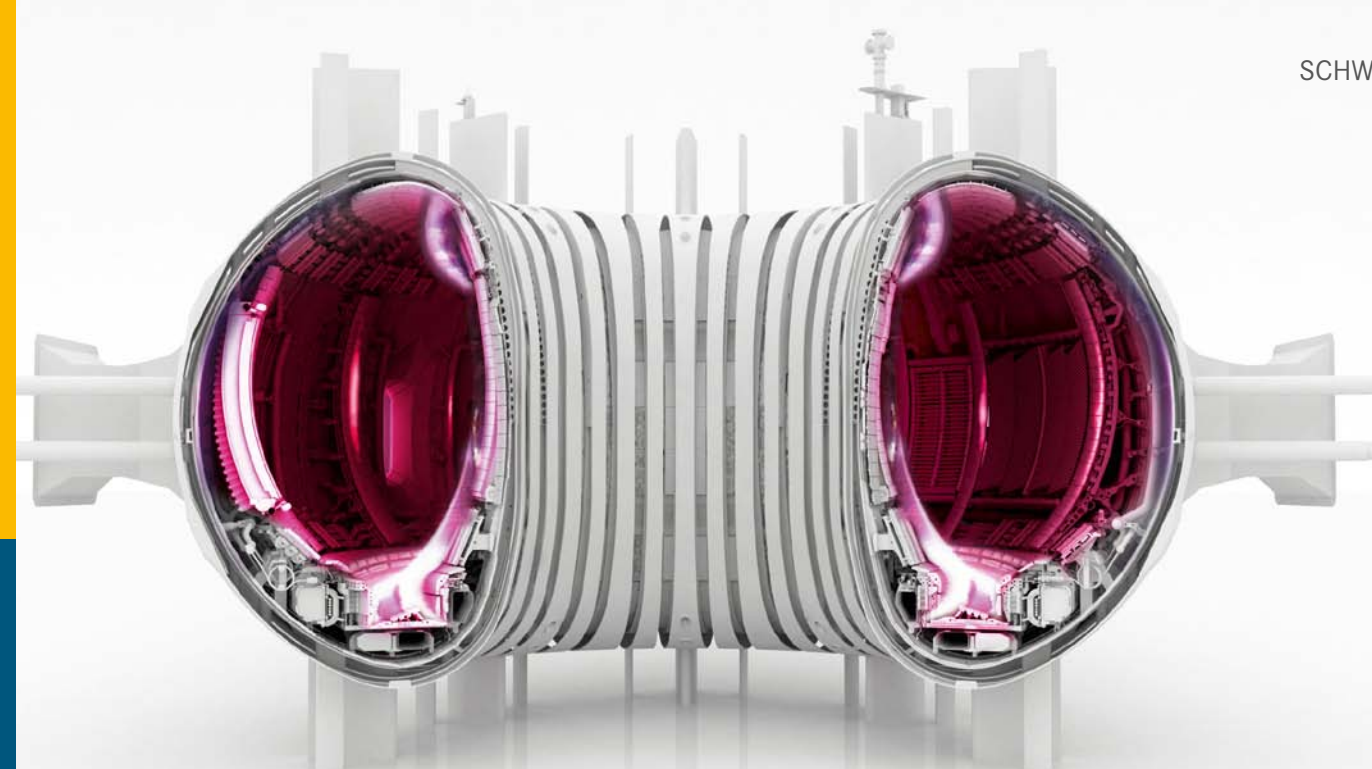
Aluminium, wie es beispielsweise auch in der Leuchtdioden-Herstellung Verwendung findet“, erläutert Finger. Allerdings stört die „Verunreinigung“ mit Aluminium-Atomen die Kristallisation, es entsteht ein weniger transparentes Material. Doch auch hier konnten die Jülicher Forscher Abhilfe schaffen: Wenn sie in der Reaktionskammer den Druck erhöhen, entstehen wieder schön kristalline, transparente Schichten. „Im Prinzip funktioniert das Verfahren“, berichtet Finger, „aber bis zur Praxisreife muss noch einiges optimiert werden.“ So gilt es beispielsweise zu verhindern, dass nicht verbrauchte Ausgangsgase beim Herstellungsprozess kondensieren.

Bei der Weiterentwicklung der Produktionsprozesse arbeitet das IEK mit dem Fraunhofer-Institut für Schicht- und Oberflächentechnik in Braunschweig zusammen, das große Erfahrung mit der Heißdrahttechnik besitzt. Mittels zahlreicher in Jülich verfügbarer Methoden, von der Elektronenmikroskopie über Infrarot- bis zur Raman-Spektroskopie, analysieren die Forscher dann immer wieder, wie das Siliziumcarbid sich durch verschiedene Eingriffe verändert – damit das Supermaterial bald praxistauglich wird und die umweltfreundliche Solarenergie auch künftig weiter wachsen kann.

Wiebke Rögner



Ein heißer Draht glüht in dieser Kammer, in der gasförmiges Monomethyl-Silan zersetzt wird. Dabei entstehen Schichten von Siliziumcarbid mit Eigenschaften, die für Solarzellen besonders vorteilhaft sind.



Auf dem Weg zum internationalen Fusionsreaktor

In Südfrankreich haben die Bauarbeiten für den internationalen Fusionsreaktor ITER begonnen, der 2019 in Betrieb gehen soll. Ob er ein Erfolg wird und die Hoffnung auf eine nahezu unerschöpfliche sowie saubere Energiequelle anfährt, hängt wesentlich von dem Material und der Konstruktion seiner Innenwände ab. Bei diesem Forschungsthema verfügen Jülicher Wissenschaftler über besondere Kompetenz, die sie bei Kernfusionsexperimenten weltweit einbringen und stärken.

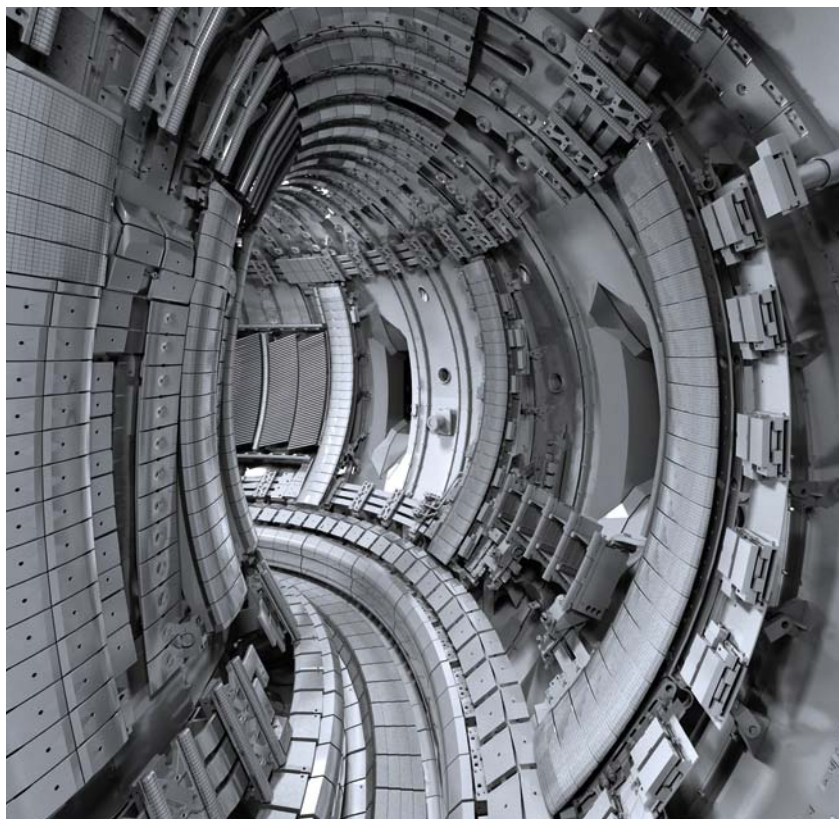


So soll die internationale Fusionsanlage ITER im südfranzösischen Cadarache einmal aussehen (oben).

Ganz oben: Ein ebenfalls virtueller Blick in die Brennkammer des Joint European Torus (JET) im britischen Culham.

Moderne Wissenschaft setzt auf den internationalen Austausch. Doch es gibt nur wenige Forschungsrichtungen, bei denen die globale Zusammenarbeit so ausgeprägt ist wie bei der Fusionsforschung. Die weltweit verstreute wissenschaftliche Gemeinde eint das ehrgeizige Ziel, nach dem Prinzip des Sonnenfeuers (siehe „Sonnenfeuer auf der Erde“, S. 15) ab etwa 2050 in großem Maßstab Energie zu gewinnen. Gelänge das, reichten die als Brennmaterial eingesetzten Rohstoffe aus, um die Menschheit mindestens für Zehntausende von Jahren mit Energie zu versorgen.

Auch die Jülicher Plasmaphysiker am Institut für Energie- und Klimaforschung treibt diese Vision an. Einer von ihnen ist Dr. Sebastijan Brezinsek. Er ist Experte für die sogenannte Plasma-Wand-Wechselwirkung, also dafür, wie sich das mehr als 100 Millionen Grad heiße Fusionsplasma und die Innenwand eines Fusionsreaktors gegenseitig beeinflussen. Am heimischen Fusionsexperiment TEXTOR, das zusammen mit Partnern aus Belgien und den Niederlanden betrieben wird, ist er jedoch nur wenige Monate im Jahr anzutreffen. Häufiger hält er sich in Culham auf. In diesem britischen Dorf –



In der Fusionsanlage JET wird ab 2011 der sogenannte Divertorbereich am unteren Ende der Fotomontage vollständig aus Wolfram-Strukturen bestehen, die in Jülich entwickelt worden sind.

rund 100 Kilometer westlich von London – ist die weltweit größte und bislang erfolgreichste Fusionsanlage angesiedelt, der „Joint European Torus“ oder kurz JET. Der Jülicher Brezinsek arbeitet hier als „Deputy Task Force Leader“, berufen von der EFDA (European Fusion Development Agreement) – einer Organisation, die JET laut einer Vereinbarung zwischen der Europäischen Kommission und den europäischen Fusionsforschungseinrichtungen betreibt.

Während das Plasma in der Jülicher Maschine TEXTOR ein Volumen von sieben Kubikmetern hat, umschließt JET ein Plasma von 100 Kubikmetern. „Die Energiemenge, die man in einer Fusionsanlage gewinnen kann, steigt mit dem Plasmavolumen an“, erläutert Sebastijan Brezinsek. Damit man letztlich mit einer Anlage mehr Energie gewinnen kann, als man benötigt, um das Plasma zu erzeugen, ist eine Mindestgröße notwendig, die selbst JET noch nicht ganz erreicht. „Doch wir können mit JET bereits sehr gut das Gesamtkonzept testen und weiterentwickeln, das für ITER vorgesehen ist“, so Brezinsek. ITER (latei-

nisch für „der Weg“) ist eine gemeinschaftliche Anlage von Europa, USA, Russland, China, Indien, Japan und Südkorea. Bei diesem – so der französische Ex-Präsident Jacques Chirac – „größten Wissenschaftsprojekt seit der Internationalen Raumstation“ soll aus dem Plasma mit seinem Volumen von 830 Kubikmetern mehr als acht Minuten lang zehnmal mehr Leistung freigesetzt werden als benötigt wird, um es zu erzeugen und zu stabilisieren: insgesamt etwa 500 Millionen Watt.

GELENKTES PLASMA

Das heiße Plasma wird zwar von Magnetfeldern eingeschlossen und wärmeisoliert, doch an manchen Stellen soll es gezielt auf die Brennkammerwand des Fusionsreaktors treffen, um Heliumkerne daraus entfernen zu können. Denn ähnlich wie zu viel Asche in einem Heizofen die Flamme erstickt, lässt Helium – die „Fusionsasche“ – das Plasma erlöschen. Die Wandbereiche, die in gewolltem Kontakt mit dem Plasma stehen und daher besonders hitzebeständig sein müssen, heißen Divertor.

Entsprechend seiner Rolle als direkter Vorläufer zu ITER wird JET derzeit umgerüstet und erhält eine Wand, die in puncto Materialien und Eigenschaften derjenigen entspricht, die für die entscheidende Betriebsphase von ITER vorgesehen ist. „Während der Umrüstung von JET werden die Versuche detailliert geplant, die dann ab Mitte 2011 in der runderneuten Anlage mitsamt ihrer ITER-ähnlichen Wand durchgeführt werden“, berichtet Brezinsek. Die Experimente sollen letztlich klären, ob ITER einmal so betrieben werden kann, dass eine Wand aus den Metallen Wolfram und Beryllium der extrem hohen Belastung über Jahre hinweg standhält. Denn insbesondere im Divertor von ITER sind Wärmeflüsse zu erwarten, die zehnmal größer sind als diejenigen in einer Flugzeugturbine oder an den Brennstäben eines Kernkraftwerkes. „Allenfalls in den Booster-Triebwerken von Ariane-Trägerraketen treten solche Wärmeflüsse auf, doch die müssen ihren Dienst nur höchstens zehn Minuten lang verrichten – danach werden sie abgetrennt“, erläutert Dr. Jochen Linke, Jülicher Experte für Fusionsmaterialien. Als Folge von Instabilitäten im Plasma kann es in ITER für Bruchteile von Sekunden sogar zu Wärmepulsen kommen, die noch wesentlich höhere Leistungsdichten haben. Außerdem müssen die Materialien auch noch der Neutronenstrahlung trotzen, die bei der Fusion entsteht.

Sonnenfeuer auf der Erde

Die Kernfusion soll es ermöglichen, aus zwei Litern Wasser und 250 Gramm Gestein so viel Energie zu gewinnen wie aus 1000 Litern Öl. Das Wasser enthält Deuterium – „schweren Wasserstoff“ – und das Gestein Lithium, aus dem im Fusionsreaktor Tritium entsteht, das auch als „überschwerer Wasserstoff“ bezeichnet wird.

Bei der Kernfusion werden die Atomkerne von Deuterium und Tritium verschmolzen. Damit wird ein Prozess nachgeahmt, der auch in der Sonne abläuft. In deren Zentrum allerdings herrscht nicht nur eine Temperatur von rund 15 Millionen Grad Celsius, sondern auch ein Druck, der mindestens dem 200-Milliardenfachen des Erdatmosphärendrucks entspricht. Da weder dieser Druck noch das riesige

Volumen der Sonne im Labor erreichbar sind, wird in Kernfusionsreaktoren zum Ausgleich eine Temperatur von 100 Millionen Grad benötigt. Dass Materialien dem heißen Fusionsplasma überhaupt standhalten können, ist auf dessen äußerst geringe Dichte zurückzuführen: Der Werkstoff spürt zwar die hohe Energie



aufprallender Plasmateilchen, doch er wird nur von relativ wenigen Teilchen getroffen.

Wie bei Kohle-, Gas- oder Kernkraftwerken wird auch bei einem künftigen Fusionsreaktor die letztlich als Wärme frei werdende Energie mittels Turbinen und Generatoren in Strom umgewandelt. Im Gegensatz zur Kernkraft entfällt bei der Kernfusion die umstrittene Endlagerung von hochradioaktiven Abfallprodukten: Das radioaktive Tritium wird im Reaktor verbraucht und das Endprodukt der Kernfusion, Helium, ist nicht radioaktiv. Außerdem sind bei der Kernfusion keine nuklearen Kettenreaktionen möglich. Eine Störung im Reaktor führt schlimmstenfalls zum Erlöschen des Fusionsprozesses.

BAHN FREI FÜR WOLFRAM

Lange Zeit haben die Fusionsforscher weltweit Graphit als Material für die Divertoren favorisiert, weil er selbst bei hohen Temperaturen nicht schmilzt und weil der Kohlenstoff, aus dem er besteht, dem Fusionsfeuer vergleichsweise wenig schadet, wenn er als Verunreinigung ins Plasma gelangt. Doch für den Dauerbetrieb in einem Fusionsreaktor wäre Graphit weniger geeignet, weil sich darin radioaktives Tritium anreichert – ein nicht tolerierbares Sicherheitsproblem. Wolfram dagegen – das Element mit dem höchsten Schmelzpunkt (3415 Grad Celsius) – war zwar unter den Fusionsforschern schon lange im Gespräch, galt aber gleichsam als Gift für das Plasma. Denn selbst im heißen Plasma bleiben einige Elektronen am Wolfram-Atomkern gebunden und kühlen es ab, indem sie laufend Energie aufnehmen und als Licht abstrahlen. „Inzwischen haben wir und

andere Wissenschaftler jedoch mit Hilfe vieler Experimente gelernt, wie man die Plasmen behandeln muss, wie man die Verunreinigungen entfernt und wie man die Wärmebelastung besser verteilen kann – daher rückte Wolfram in den Mittelpunkt des Forschungsinteresses“, erläutert Brezinsek. So hat etwa das Team um Jochen Linke den mikroskopischen Aufbau von unterschiedlich hergestelltem Wolfram untersucht und zahlreiche Belastungsprüfungen durchgeführt – auch mit Hilfe von spezialisierten Testeinrichtungen in sogenannten heißen Zellen. Dort können Materialien, die nach Neutronenbeschuss radioaktiv sind, fernbedient untersucht werden.

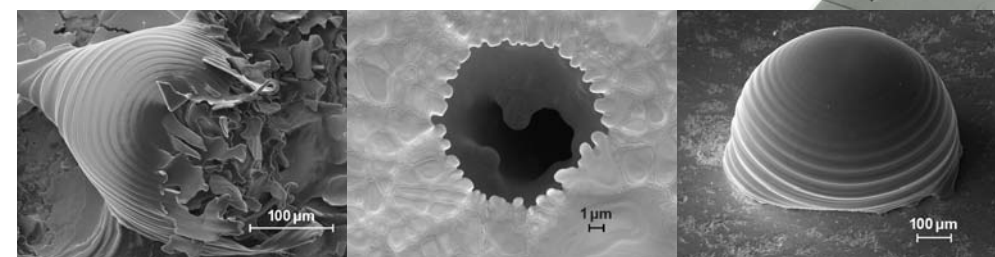
Jülicher Know-how ist speziell in den Divertor eingeflossen, der beim runderneuten JET zum Einsatz kommen wird. „Das Teilstück dieses Divertors, das den

höchsten Wärmeflüssen standhalten muss, besteht aus massivem Wolfram und wurde hier im Forschungszentrum mitentwickelt und getestet“, sagt Brezinsek. Er gehört zu denjenigen, die vor Ort in Culham miterleben dürfen, wie sich dieses Stück Jülich im Sonnenfeuer bewährt.

Frank Frick

Die Schönheit des Wolframs: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen zeigen das Metall, nachdem es verschiedenen Belastungen ausgesetzt wurde (links).

Unten: Wolfram-Lamellen für den JET-Divertor.



Membranen gegen die globale Erwärmung

Kohlekraftwerke und Klimaschutz – das scheinen unvereinbare Gegensätze zu sein. Doch Jülicher Forscher entwickeln Membranen, die das Treibhausgas Kohlendioxid aus den Abgasen von Kohlekraftwerken abtrennen. Damit soll die Nutzung fossiler Brennstoffe künftig klimafreundlich werden.

Die Erdatmosphäre heizt sich gefährlich auf. Wesentliche Ursache sind die vom Menschen freigesetzten Treibhausgase, allen voran Kohlendioxid, kurz CO₂, das bei der Verbrennung von Kohle, Öl und Erdgas entsteht. Die Internationale Energieagentur sagt voraus, dass der Anteil dieser fossilen Energieträger am weltweiten Energieverbrauch sogar noch steigen wird.

Der Ausweg scheint simpel: Wenn CO₂ aus den Abgasen der Kraftwerke abgetrennt und – beispielsweise in erschöpften Öllagerstätten – dauerhaft unterirdisch eingesperrt würde, ließen sich Kohle und Erdgas nutzen, ohne das Klima ungebührlich zu belasten. Tatsächlich gibt es bereits Kohlekraftwerke, bei denen CO₂ aus dem Rauchgas mittels Laugen ausgewaschen wird. Aber die Technik ist komplex, benötigt so viel Platz wie ein Fußballfeld und mindert den Wirkungsgrad des Kraftwerks um mehr als zehn Prozentpunkte.

DIE DREI KRAFTWERKSKONZEPTE

Geringere Energieverluste versprechen sich Wissenschaftler von einer Trennung der Gasgemische mittels Membranen. „Es gibt dabei prinzipiell drei Möglichkeiten“, erläutert Dr. Wilhelm Meulenberg vom Jülicher Institut für Energie- und Klimaforschung. So kann man nach der Verbrennung die Abgase über eine CO₂-durchlässige Membran schicken, die das Treibhausgas gewissermaßen aussiebt. Sie bewirkt also das, was bisher die Waschlauge leistet. Da das CO₂ erst nach der Verbrennung entfernt wird, spricht man vom Post-Combustion-Verfahren.

Schon früher setzt das sogenannte Pre-Combustion-Verfahren an. Hier wird Kohle mit reinem Sauerstoff umgesetzt, wobei ein Gas entsteht, das reich an Wasserstoff und Kohlenmonoxid ist. Letzteres wird mit Wasserdampf weiter zu Kohlendioxid umgesetzt, wobei sich noch mehr Wasserstoff bildet. Membranen



trennen das CO₂ vom Wasserstoff, so dass am Ende fast reiner Wasserstoff für die Gasturbine zur Verfügung steht.

Die dritte Alternative ist die Oxyfuel-Technologie. Hier trennt eine Membran den Sauerstoff aus der Luft ab. Er wird dann mit CO₂ „verdünnt“, damit die

Verbrennungstemperaturen nicht gar zu hoch steigen. Mit diesem Gasgemisch wird die Kohle verbrannt, das Endprodukt ist hochkonzentriertes Kohlendioxid.

„Nur das Post-Combustion-Verfahren wird heute schon flächendeckend eingesetzt“, erläutert Meulenberg. Es besteht hier auch die Möglichkeit, bestehende Kraftwerke mit einer CO₂-Abtrennung nachzurüsten. „Die anderen beiden Verfahren haben allerdings ein höheres Potenzial, CO₂ einzusparen, und können den Wirkungsgradverlust geringer halten. Bei ihnen gibt es aber noch mehr offene Fragen.“ Diese möglichst rasch zu beantworten, ist das Ziel der Helmholtz-Allianz MEM-BRAIN, die von Prof. Detlev Stöver vom Forschungszentrum Jülich koordiniert wird. Ihr gehören neben weiteren Forschungseinrichtungen Universitäten im In- und Ausland sowie Industrieunternehmen an. Auch in der Jülich Aachen Research Alliance JARA spielt die Entwicklung klimafreundlicher Kohlekraftwerke eine herausragende Rolle.

Neben den technischen Merkmalen der Membranen muss ihr ganzer Lebenszyklus untersucht werden. Dabei geht es etwa um Fragen nach der Entsorgung der Komponenten oder nach den Kosten, die inklusive Transport und Speicherung des Kohlendioxids anfallen. Die Jülicher Programmgruppe Systemforschung und Technologische Entwicklung (STE) erkundet darüber hinaus, wie die Öffentlichkeit die Kraftwerke mit den eingebauten Membranen akzeptieren würde.

Doch am Anfang steht die Herstellung geeigneter Materialien. Für Temperaturen

bis etwa 200 Grad können Polymere – gleichsam hoch spezialisierte Plastikfolien – für die CO₂-Abtrennung verwendet werden. Die Abtrennung von Wasserstoff oder Sauerstoff benötigt dagegen Temperaturen von 400 bis 900 Grad Celsius – hier kommen Keramik-Membranen infrage, wie sie im Jülicher Institut für Energie- und Klimaforschung vorrangig entwickelt werden.

LEISTUNGSFÄHIGE KERAMIK

Ein interessantes Membranmaterial, an dem Jülicher Forscher arbeiten, firmiert unter dem Kürzel BSCF. Es gehört zu einer Gruppe von Mineralien, die nach dem russischen Mineralogen Lew Alexejewitsch Perowski (1792 – 1856) als Perowskite bezeichnet werden. BSCF eignet sich besonders gut dazu, Sauerstoff aus der Luft abzutrennen. So stellte die Allianz MEM-BRAIN auf der Hannover Messe einen Demonstrator mit einer BSCF-Membranfläche von 0,2 Quadratmetern vor. Er konnte bisher in 1600 Betriebsstunden bei einer Temperatur von 800 bis 850 Grad und einem Sauerstoffdurchfluss von 2,5 Litern pro Minute rund 300 Kilogramm reinen Sauerstoff erzeugen.

Bei mehreren Hundert Grad Celsius trennt eine solche Membran Sauerstoff aus der Luft ab. Rechts daneben ein noch unfertiges Exemplar: Zu sehen ist das poröse Trägermaterial, das der Membran mechanische Stabilität verleiht.

Eine Wissenschaftlerin des Forschungszentrums Jülich misst, wie gut eine keramische Membran Sauerstoff durchlässt (links).

Ganz links: Die Apparatur, die sie dazu benutzt, in der Nahansicht.

Geräte für die Tests solch neuer Materialien gibt es nicht von der Stange. „Wir bauen Prüfstände, in die Membranen eingespannt und unter kontrollierten Bedingungen getestet werden können“, berichtet Ingenieur Dr. Michael Butzek von der Jülicher Zentralabteilung Technologie (ZAT). Wie verhält sich eine Membran bei mehreren 100 Grad? Wie verändert sich der Gasdurchstrom bei unterschiedlichem Druck? Wie rasch altert das Material? „Wir müssen die Apparaturen ständig den wechselnden Aufgaben anpassen“, so Butzek.

Materialentwicklung, Praxistauglichkeit, politische und energiewirtschaftliche Randbedingungen – vielfältige Faktoren bestimmen mit, wie Verfahren der Kohlendioxid-Abtrennung sich durchsetzen. „Welcher Weg am Ende gegangen wird, kann heute noch niemand sagen“, erklärt Meulenberg. „Wir arbeiten daran, die bestmögliche Entscheidungsgrundlage zu schaffen.“

Wiebke Rögener



Hitzeschutz in der Turbine

Wo es in Kraftwerksturbinen richtig heiß wird, sind Keramiken im Einsatz. Doch auch der beste dieser Werkstoffe widersteht nicht dauerhaft Temperaturen über 1200 Grad Celsius. Jülicher Forscher wollen das ändern, damit die Turbinen weniger Treibhausgase freisetzen und den Brennstoff effizienter nutzen können.

Je höher die Temperatur, bei der eine Kraftwerksturbine betrieben wird, umso mehr Strom holt sie aus jedem Kubikmeter Erdgas heraus. Dünne Wärmedämmschichten aus Keramik schützen dabei die metallischen Turbinenschaufeln vor der zerstörerischen Wirkung des heißen Brenngases. „Yttriumoxid-teilstabilisiertes Zirkonoxid, von uns kurz YSZ genannt, ist für diesen Einsatz im Moment das Nonplusultra. Diese Keramik ist sehr zäh und widersteht Spannungen sehr gut“, sagt Prof. Robert Vaßen vom Jülicher Institut für Energie- und Klimaforschung. Für ihn ist derzeit kein Material in Sicht, das YSZ komplett ersetzen könnte, obwohl auch dieser Werkstoff seine Schwächen hat: Bei Temperaturen über 1200 Grad Celsius verkrustet die poröse innere Struktur der Keramik – Fachleute sprechen hier von „versintern“. Dadurch verliert sie ihre Dehnungsfähigkeit und platzt ab.

Das Team um Vaßen arbeitet daran, die erfolgreichen YSZ-Wärmedämmschichten noch zu verbessern und hitzebeständiger zu machen. Die Forscher verfolgen dabei die Strategie, den Anteil an feinen Poren in der Schicht zu erhöhen. Denn Luftporen reflektieren Wärmestrahlung und erhöhen die Isolation – je mehr Poren, desto besser die Wärmedämmung. Die Stellschraube für mehr Porosität ist der Herstellungsprozess, bei dem Keramikpulver in die 3000 Grad heiße Flamme eines Plasmabrenners injiziert wird, wo es schmilzt und beschleunigt wird. Ein computergesteuerter Roboterarm fährt mit dem Plasmabrenner die Oberfläche der Schaufel ab und trägt so die keramische Wärmedämmschicht auf.

Um eine porösere Keramik zu erhalten, experimentieren die Wissenschaftler mit der Korngröße des Pulvers. Je feiner das Pulver, desto feiner die Poren, so die Theorie. Allerdings darf das Pulver in der Praxis nicht zu klein gemahlen sein. Sonst klumpt es und fließt nicht gleichmäßig in die Plasmaflamme nach. Vaßen und seine Mitarbeiter fanden einen Ausweg aus dem Dilemma: Sie mischen sehr

Prof. Robert Vaßen (unten) mit Pulvern, aus denen er und sein Team Wärmedämmschichten für Turbinen herstellen.

Nächste Seite links: Eine Mixtur aus Keramikpulver und Wasser oder Ethanol wird in die Fackel eines Plasmabrenners injiziert und beschleunigt. Das Ergebnis (Mitte) ist eine dünne keramische Schutzschicht auf dem Werkstück.

Rechts: An einem Versuchsstand wird die Hitzebeständigkeit neuer Keramiken getestet.



feines Keramikpulver, das allein nicht fließfähig ist, mit Wasser oder Ethanol. Diese Suspension schicken sie durch ein neu entwickeltes Zerstäuberventil in den Plasmabrenner. Das Ergebnis: viele feine Poren in einer sehr stabilen Keramikschicht. „Die so erzeugten Wärmedämmschichten zeigen ein exzellentes Streuvermögen – bis zu 95 Prozent der Wärmestrahlung wird zurückgeworfen“, freut sich Vaßen.

Um die YSZ-Keramik gegenüber mechanischen Lasten noch widerstandsfähiger zu machen, verlegen die Wissenschaftler den Herstellungsprozess in ein Vakuum. Die heißen Gase des Plasmabrenners finden unter solchen Bedingungen keinen Gegendruck und dehnen sich extrem weit aus. „Leitet man dann Partikel in das aufgeweitete Plasma ein, schmelzen sie nicht nur, sondern verdampfen. So erhalten wir stäbchenförmige Strukturen, die extremen mechanischen Anforderungen genügen“, sagt Vaßen.

AUF BIEGEN UND BRECHEN

Doch die Forscher wollen noch mehr und streben Betriebstemperaturen für die Gasturbinen von 1450 Grad an. Deshalb ist eines der zentralen Forschungsfelder im Institut für Energie- und Klimaforschung die Entwicklung komplett neuer Wärmedämmschichten aus völlig neuartigen Keramiken. Diese sollen dann wie ein

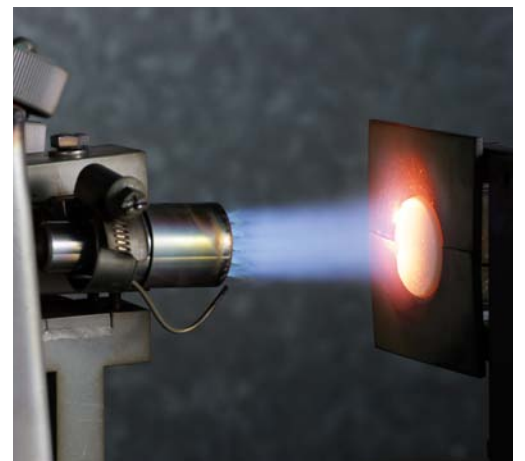
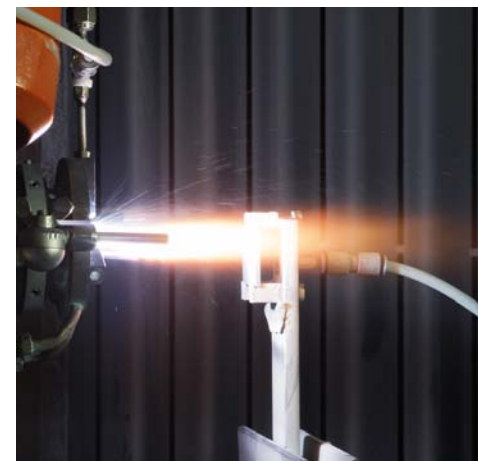
Schutzpanzer auf das YSZ aufgetragen werden. Ob die neuen, von Vaßen und seinen Mitarbeitern entwickelten Doppel-lagen halten, was sich die Wissenschaftler von ihnen versprechen, prüft Prof. Tilmann Beck. Er verfügt in den Labors für „Werkstoffstruktur und -eigenschaften“, die ebenfalls im Institut für Energie- und Klimaforschung angesiedelt sind, über zwei weltweit einzigartige Prüfstände. „Das Besondere daran ist, dass wir in diesen Öfen durch eine Einzelansteuerung der hitzeerzeugenden Halogenlampen rasche und extreme Temperaturschwankungen nachstellen können, die auch in der Praxis bedeutsam sind“, nennt Beck die Vorteile. Ein hydraulisches System umfasst die Proben von oben und unten und setzt sie zyklisch unter Druck- und Zugbelastung. Denn auf die Keramiken in Kraftwerksturbinen wirken Fliehkräfte, die einer Gewichtskraft von mehreren Tausend Kilogramm pro Quadratzentimeter entsprechen. Schließlich drehen sich die Schaufeln in einer Kraftwerksturbine mit 3000 Umdrehungen pro Minute.

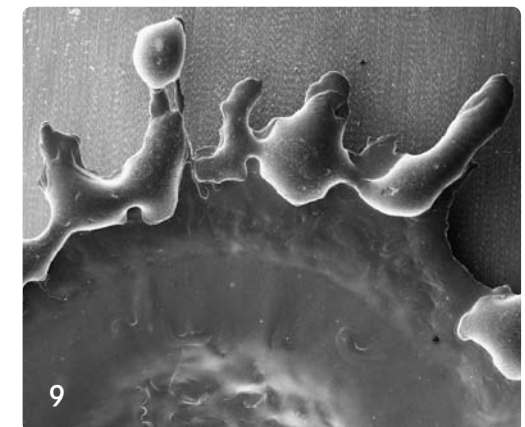
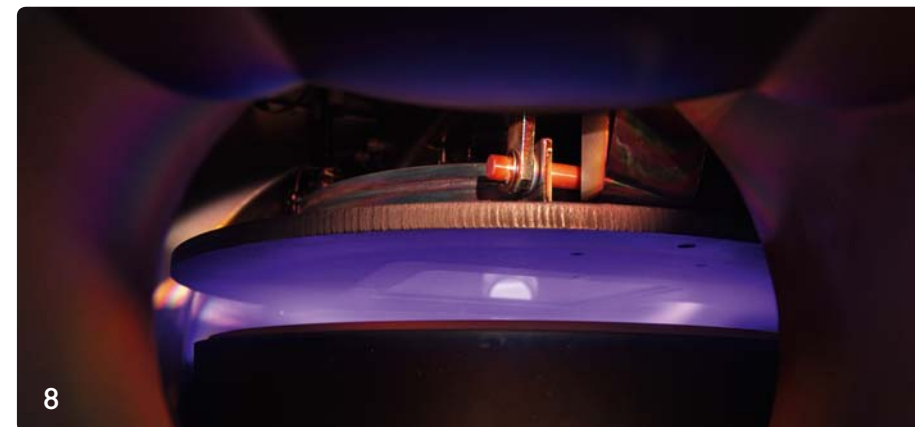
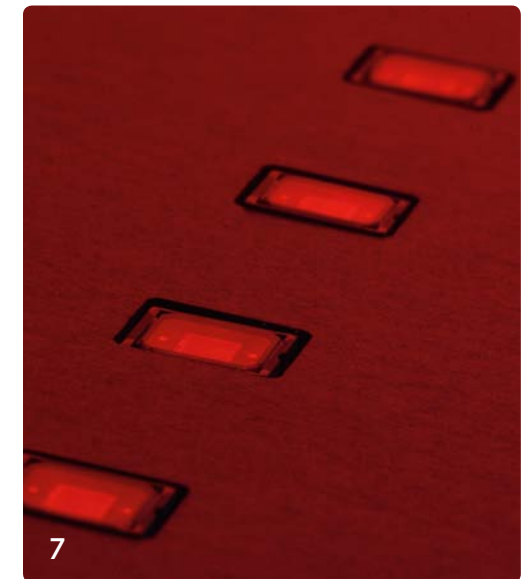
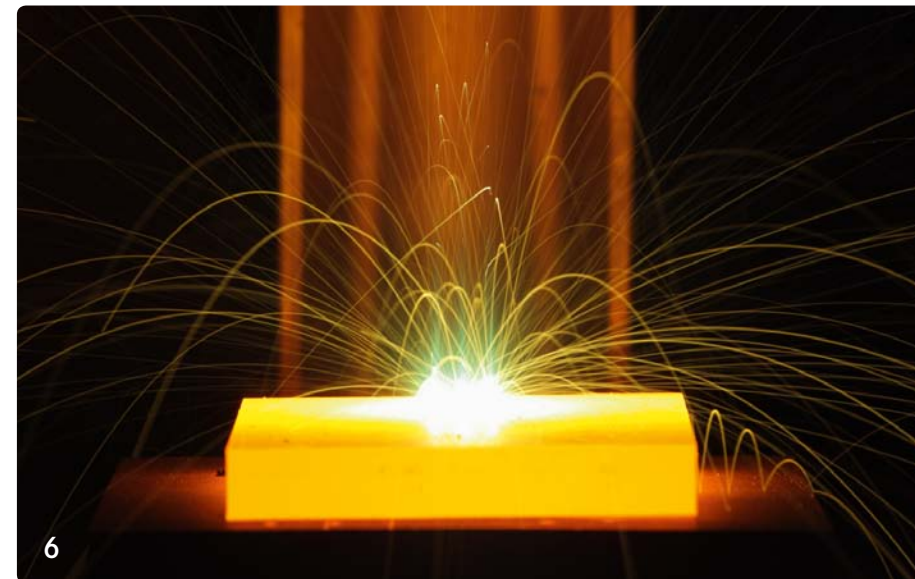
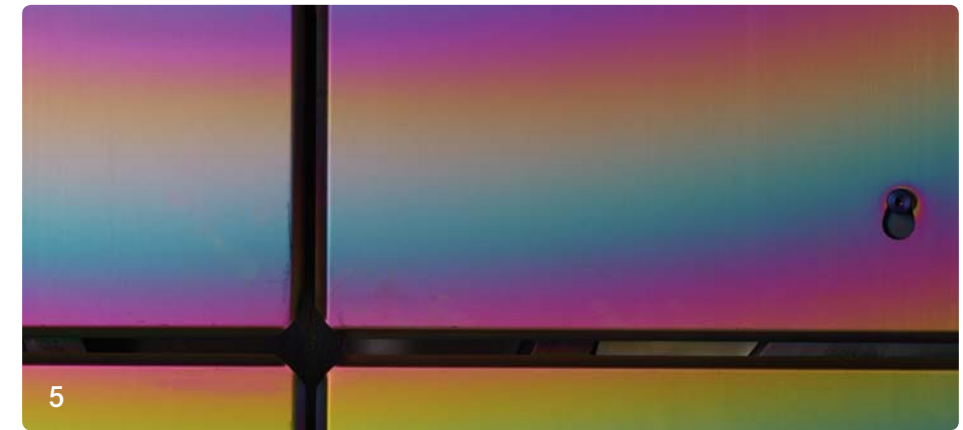
Um die Entstehung von Rissen und Brüchen genau zu verstehen, entwickeln die Forscher detektivischen Spürsinn: Mittels sogenannter Schallemissionsanalyse hören die Forscher schon während des Versuchs, wo sich ein Riss im System ausbreitet. Später kommt eine Infrarot-

kamera zum Einsatz. Nach einem Blitzlichtimpuls wird mit ihr das Abklingen der Wärmeleitung in der Probe beobachtet. Vom metallischen Grundwerkstoff abgelöste Schichtbereiche sind mit dieser Methode schon ab einem halben Millimeter Durchmesser erkennbar. „Die Position der Schädigung ist für uns somit exakt lokalisierbar“, sagt Beck. Genau an dieser Stelle suchen er und seine Mitarbeiter dann per Elektronenmikroskopie nach den physikalischen und chemischen Ursachen des Schadens.

Von den Ergebnissen profitiert zunächst das Team um Vaßen, das durch die präzise Fehleranalyse seine Herstellungsprozesse für die Keramiken weiter verbessern kann. Ferner fließen die Ergebnisse in Modellrechnungen ein, mit denen man relativ rasch belastbare Vorhersagen zur Stabilität neuer Schichtsysteme erhalten kann. An solchen Prognosen ist auch die Industrie interessiert. Neue Wärmedämmsysteme, die alle Prüfungen bestehen, nutzen letztlich den Energieunternehmen und ihren Kunden ebenso wie dem Klima. Denn wenn ein 240-Megawatt-Gasturbinenkraftwerk zwei Prozent mehr Strom aus der gleichen Menge Erdgas herausholt, so produziert es diesen Strom preiswerter und setzt jährlich 24.000 Tonnen weniger Kohlendioxid frei.

Brigitte Stahl-Busse





Schön und rätselhaft

Beim Begriff Energietechnik hat man schnell Windräder, Hochspannungsmasten und Kraftwerksschlote vor Augen. Dass er auch andere Facetten hat – ästhetische und geheimnisvolle –, zeigen diese Bilder aus der Jülicher Energieforschung.

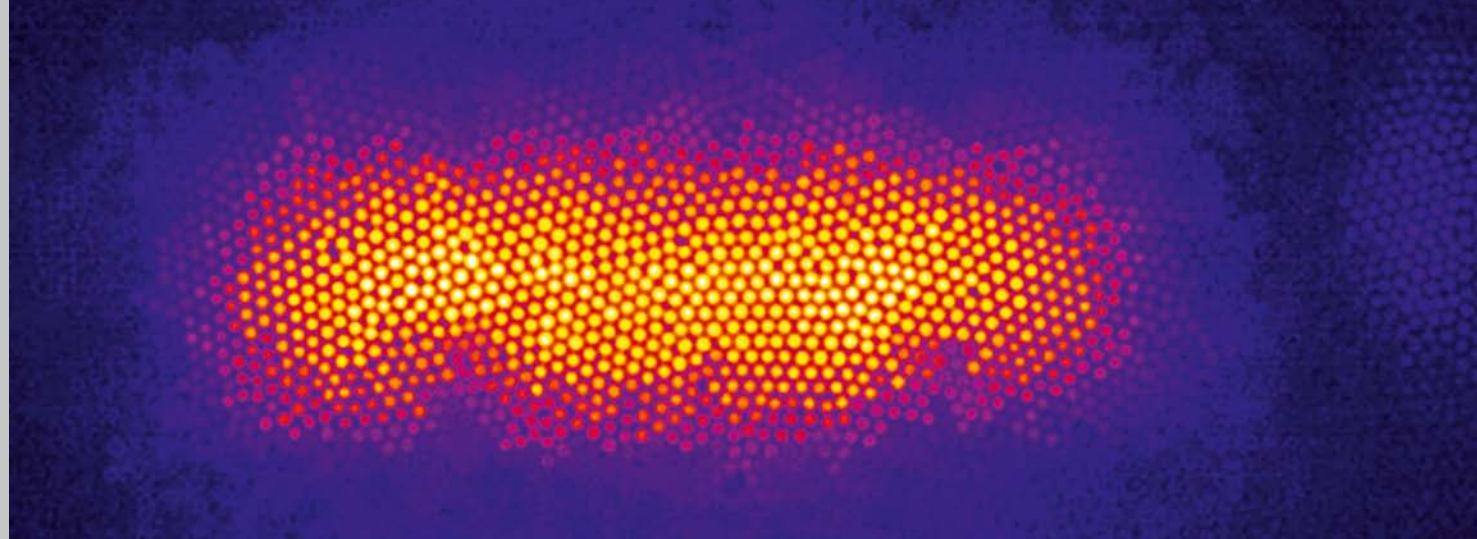
- 1 Erstarrende gläserne Tropfen, aus denen Dichtungsmaterial für Festoxidbrennstoffzellen (SOFC) hergestellt wird.
- 2 Blick durch eine Solarzelle auf das Ende eines Lichtwellenleiters. Dieser gehört zu einem neuen Messsystem, mit dem bestimmt werden kann, wie empfindlich eine Solarzelle für die verschiedenen Spektralbereiche des Sonnenlichts ist.
- 3 Ein Glaspfen beim Austritt aus dem rund 1500 Grad heißen Induktionsschmelzofen der Jülicher Zentralabteilung für Technologie.

- 4 Proben von Materialien für Festoxidbrennstoffzellen, die mittels Laserstrahl zusammengefügt wurden. Sie werden beispielsweise auf Dichtigkeit und Festigkeit hin untersucht.
- 5 Die Wand einer Elektronenstrahl-Schweißkammer in der Jülicher Zentralabteilung für Technologie. Ist die Anlage in Betrieb, werden darin äußerst hitzebeständige Werkstoffe für die Energietechnik dauerhaft verbunden.
- 6 Eine Materialprobe wird mit einem unsichtbaren Elektronenstrahl aufgeschmolzen.

- 7 Teil einer Messanordnung, mit der bestimmt werden kann, wie gleichmäßig das Licht eines sogenannten Sonnensimulators ist. Dieser erzeugt Licht, dessen Spektrum dem natürlichen Sonnenlicht möglichst nahekommt – wichtig für Tests von Solarzellen.
- 8 Der Blick durch ein Schauglas in eine Anlage, mit der Schichten für Solarzellen hergestellt werden. Mit Hilfe eines Plasmas (lila)

werden darin gasförmige Moleküle aufgebrochen. Die dabei entstehenden Stoffe scheiden sich auf einer Unterlage ab.

- 9 Diese rasterelektronenmikroskopische Aufnahme zeigt den Schmelzkrater von Edelstahl, wenn das Material innerhalb von Millisekunden bis zum Schmelzpunkt aufgeheizt wird. Dies wäre der Fall, wenn es mit dem Plasma in einer Fusionsanlage in Kontakt käme.



Thom Mason im Gespräch

Der Energiemix der Zukunft

Energie ist die Basis für den hohen Lebensstandard der Industrienationen. Schwindende fossile Ressourcen, die globale Klimaerwärmung und Umweltkatastrophen wie die Ölpest im Golf von Mexiko zeigen: So wie bisher kann es nicht weitergehen. Dr. Thom Mason, Direktor des US-amerikanischen Oak Ridge National Laboratory, äußert sich zu den kurz- und langfristigen Möglichkeiten, den Energiehunger der Welt zu stillen.



Dr. Thom Mason

Frage: Worauf konzentrieren sich die Arbeiten im Bereich Energieforschung in Oak Ridge?

Mason: Ein Fokus liegt bei uns auf Forschungsfeldern und Technologien, die eine Zukunft mit sauberen Energien ermöglichen. Unsere Arbeiten decken dabei einerseits die Grundlagenforschung ab; andererseits arbeiten wir auch an anwendungsorientierten Themen wie erneuerbaren Energien, Netzwerk- und Kraftwerkstechnologien oder dem Endverbrauch. Der Schlüssel, um echte Fortschritte zu erzielen, ist jedoch das Verknüpfen von Grundlagenforschung und Praxis. Denn selbst wenn wir den Einsatz neuartiger Energietechnik noch beschleunigen könnten, würde das nicht ausreichen, um die Ziele in puncto Kohlendioxid-Emissionen und Versorgungssicherheit kurzfristig zu

erreichen. Wir brauchen wirklich fundamentale Durchbrüche – deshalb ist die Wissenschaft gefordert.

Frage: Welchen Effekt hat dabei eine Kooperation zwischen zwei Institutionen wie dem Oak Ridge National Laboratory und dem Forschungszentrum Jülich?

Mason: Die Probleme sind außerordentlich schwierig – und niemand wird sie allein lösen können. Letztlich kommt es auf die Wissenschaftler an, die sich austauschen, gemeinsame Interessen finden und diese in Durchbrüche verwandeln – wie zum Beispiel eine kostengünstige Kohlendioxid-Abtrennung, oder dass wir gemeinsam die Solarenergie an einen Punkt bringen, an dem sie sehr einfach in jedes Gebäude integriert werden kann.

Protonen aus einem Hochenergie-Beschleuniger treffen in der Neutronenquelle SNS – einer bedeutsamen Forschungsanlage des Oak Ridge National Laboratory – auf einen Zielkörper aus Schwermetall.

Frage: Sie haben gerade ein wichtiges gemeinsames Projekt angesprochen: Keramische Filter, die ein kohlendioxid-freies konventionelles Gas- oder Kohlekraftwerk ermöglichen sollen. Bleibt da nicht das Problem, wie und wo wir das Kohlendioxid speichern?

Mason: Ja. Wenn wir einen kostengünstigen Weg finden, das Kohlendioxid etwa mit Hilfe von Membranen abzutrennen, dann bleibt immer noch die Frage nach der Lagerstätte. Hier ist es unbedingt erforderlich, dass wir die Biogeochemie besser verstehen. Denn es wäre sinnlos, das Kohlendioxid im Untergrund zu lagern, wenn es nach zehn oder zwanzig Jahren wieder herauskommt. Es liegt noch einige Arbeit vor uns, um die richtige geologische Formation zu finden. Diese Frage müssen wir parallel zu der Abtrennungsaufgabe lösen.

Frage: Was halten Sie von der Forderung, alle Fördergelder nur noch in erneuerbare Energiequellen zu investieren?

Mason: Nein, davon halte ich nichts – nur ein Energiemix bringt uns weiter. Nehmen wir Dänemark, das heute schon 20 Prozent seiner elektrischen Energie aus Windkraftwerken bezieht. Nimmt der Wind aber um einen Meter pro Sekunde ab, dann entspricht der Energieverlust der Kapazität eines ganzen Kohlekraftwerks. Bei 20 Prozent kann man das noch in den Griff bekommen, aber darüber hinaus wird die Sache zu einer echten Herausforderung. Ich glaube, dass hier durch intelligente Netze noch Verbesserungen möglich sind, aber das ändert nichts daran, dass wir eine Grundversorgung sicherstellen müssen. Meiner Meinung nach haben wir – zumindest bis die Fusion verfügbar ist – hierfür zwei Optionen: Konventionelle Kraftwerke und Kernenergie. Die Ölkatastrophe im Golf von Mexiko erinnert die Menschen daran, dass offensichtlich jede Energiequelle Risiken birgt. Und egal, ob man einen Fluss aufstaut, im Meer nach Öl bohrt

Das Oak Ridge National Laboratory (ORNL)

Das ORNL mit seinen mehr als 4600 Mitarbeitern und das Forschungszentrum Jülich arbeiten seit vielen Jahren zusammen. Bereits 1969 vereinbarten beide Partner den Austausch von Wissenschaftlern. Seitdem bestehen enge Beziehungen zwischen den beiden Institutionen, etwa in der Energie- und Materialforschung. 2008 und 2010 wurden die über Jahrzehnte gewachsenen Kooperationen mit verbindlichen Verträgen gefestigt.



oder weite Landstriche mit Windrädern versieht – jede Art der Energieversorgung hat einen Einfluss auf die Umwelt. Man muss also stets diese Konsequenzen dem Nutzen gegenüberstellen, den sie hat. Dazu zählt etwa der Beitrag, den sie zum Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit unserer Industrie oder zur Wahrung unseres Lebensstandards leistet.

Frage: Neben der Solar- und Windenergie konzentrieren sich viele Hoffnungen auch auf den Einsatz von Brennstoffzellen. Teilen Sie diese Hoffnungen?

Mason: Autos werden in Zukunft ziemlich sicher elektrisch fahren. Ob sie dabei mit Batterie oder einer Brennstoffzelle angetrieben werden, ist meiner Meinung nach nicht klar. Beide Technologien haben noch Hürden zu überwinden – gerade in Bezug auf Kosten und Energieeffizienz. Da zurzeit völlig offen ist, welche Technologie das Rennen machen wird, muss man gleichermaßen an beiden arbeiten.

Frage: Die Fusionsforschung ist ein Paradebeispiel für eine großangelegte internationale Zusammenarbeit. Laien haben trotzdem den Eindruck, es gehe nur langsam voran. Brauchen wir die Fusion überhaupt?

Mason: Die Fusion ist die einzige potenzielle Energieform, bei der es keinerlei Nachschubprobleme für den Brennstoff geben wird – als Option für künftige Generationen müssen wir daran arbeiten. Denn so oder so werden wir unsere Kohlenstoffreserven aufbrauchen. Auch bei der Kernspaltung ist man von den verfügbaren Uranreserven abhängig, selbst wenn man den Brennstoff wiederaufarbeitet. Für unsere augenblicklichen Probleme ist Fusion keine Lösung, aber wenn unser Planet mit zehn Milliarden Menschen bewohnbar bleiben soll, brauchen wir sie. Ich denke, dass sich die Investitionen lohnen.

Brigitte Stahl-Busse

Diesel besser nutzen

Jülicher Forscher haben Brennstoffzellen-Systeme, die mit Diesel betrieben werden, so verbessert, dass ihr Einsatz in Lastwagen in greifbare Nähe rückt. Dort könnten die Aggregate den Strom, der unter anderem für Heizung und Klimaanlage benötigt wird, effizienter und umweltfreundlicher erzeugen als der Verbrennungsmotor.



Unter den Fahrern von US-amerikanischen Trucks ist es gang und gäbe, den Motor ihres Fahrzeugs während einer Parkpause laufen zu lassen, vor allem, um so den Energiebedarf von Heizung oder Klimaanlage zu decken. Im Leerlauf holt der Motor aber besonders wenig nutzbare Energie aus jedem Liter Diesel heraus und setzt viele klimaschädliche Abgase frei. „Der Markt giert nach einer Energiehilfseinheit für Lkw, in die Diesel rein und Strom rauskommt, deren Energieausbeute aber nicht nur bei fünf bis zehn Prozent liegt“, weiß der Jülicher Wissenschaftler Dr. Robert

Steinberger-Wilckens. Als ein solcher zusätzlicher Energielieferant eignen sich besonders Festoxidbrennstoffzellen (SOFC, Solid Oxide Fuel Cell), eine von mehreren Varianten der Brennstoffzellen, an denen im Jülicher Institut für Energie- und Klimaforschung gearbeitet wird. Denn gegenüber den meisten Niedertemperatur-Brennstoffzellen, die nur mit reinem Wasserstoff laufen, haben die SOFCs den Vorteil, dass sie zusätzlich Methan und Kohlenmonoxid als Kraftstoff oder „Brenngas“ verwenden können. Ein vorgeschaltetes Aggregat, der Reformer, kann den Diesel, den Lkw tanken, in diese drei Brenngase umwandeln.

BALD MARKTREIF

Steinberger-Wilckens, der die Jülicher SOFC-Aktivitäten koordiniert, rechnet damit, dass dieser Brennstoffzellentyp in weniger als vier Jahren marktreif sein

wird: „Bis dahin müssen wir noch erreichen, dass die Zellen das x-malige Ein- und Ausschalten während ihrer Lebenszeit unbeschadet überstehen.“ Schwierigkeiten bereitet die hohe Betriebstemperatur von mehr als 700 Grad Celsius. Sie ist notwendig, damit das keramische Material, aus dem der Elektrolyt besteht, für Sauerstoffionen gut durchlässig wird (siehe Grafik, S. 25). Dabei ist nicht die hohe Temperatur selbst das eigentliche Problem – denn im Dauerbetrieb laufen die SOFCs bereits sehr zuverlässig –, sondern die Temperaturänderung beim Ein- oder Ausschalten. Die führt dazu, dass sich die Metall- und Keramikmaterialien in der Zelle unterschiedlich stark ausdehnen oder zusammenziehen.

Besonders stark beansprucht wird dadurch das Dichtungsmaterial, das unter anderem dafür sorgt, dass sich Luft und

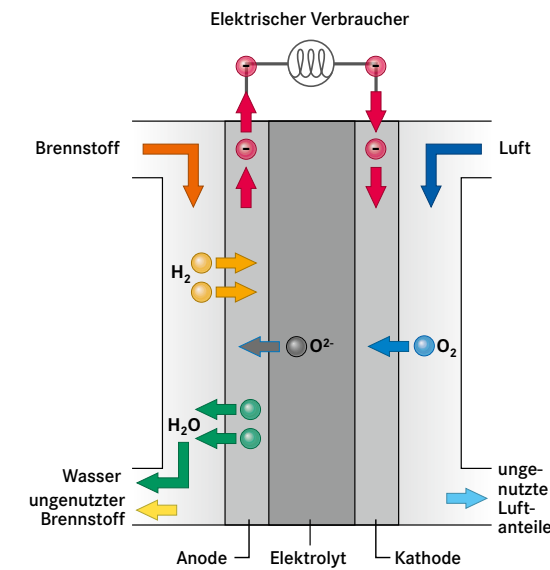
Brenngase nicht miteinander vermischen. „Wenn wir eine Metalledichtung nehmen könnten, wäre das Problem schnell gelöst“, sagt Mihaly Pap. Der Ingenieur von der Jülicher Zentralabteilung Technologie weiter: „Aber unser Dichtungsmaterial muss Bedingungen erfüllen, die Metall nicht bieten kann – beispielsweise muss es elektrisch isolieren.“ Paps Gruppe ist es in langjähriger Arbeit gelungen, Glas-

dichtungen zu entwickeln, die zumindest das Herunterfahren der SOFC auf eine Stand-by-Temperatur von etwa 350 Grad Celsius gut verkraften. Für den Betrieb in einem täglich genutzten Lkw wäre das durchaus akzeptabel. Denn wenn man die SOFC abends ausschaltet, könnte man sie bis zum nächsten Morgen auf dieser Stand-by-Temperatur halten. „An der idealen Dichtung, die ein mehrmaliges vollständiges Abkühlen unbeschadet übersteht, beißen sich Wissenschaftler weltweit noch die Zähne aus“, so Pap.

Umso wichtiger wäre es, defekte Dichtungen reparieren zu können. Denn bisher muss man einen teuren „Stack“, der aus mehreren hintereinandergeschalteten Brennstoffzellen besteht, wegwerfen, wenn die Dichtung an nur einer einzigen Stelle fehlerhaft ist. Doch wie soll man von außen an undichte Stellen im Innern des Stacks herankommen, ohne den Stack auseinanderzuberechnen? Die Lösung: „Ähnlich wie Ärzte bei der

Effiziente Wandler chemischer Energie

So funktioniert eine Brennstoffzelle, hier in der SOFC-Variante, die mit Wasserstoff oder Kohlenwasserstoffen betrieben wird: Am Pluspol der Zelle, der Kathode, wird Luft eingelassen. Deren Sauerstoffmoleküle (O_2) nehmen Elektronen vom Kathodenmaterial auf und wandern als negativ geladene Ionen durch den Elektrolyten zur Anode, dem Minuspol. Dort reagieren sie mit dem Wasserstoff (H_2) zu Wasser (H_2O). Die überschüssigen Elektronen werden dabei abgegeben und als elektrischer Strom genutzt.

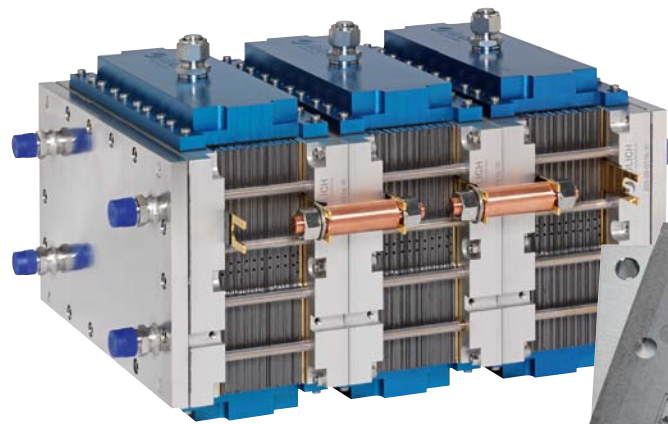


Die Herstellung der dünnen Elektrolytschicht einer Brennstoffzelle durch Tauchbeschichtung. Dabei wird ein Trägermaterial zunächst in eine Flüssigkeit, das „Sol“, eingetaucht und dann mit konstanter Geschwindigkeit herausgezogen.

Strahlentherapie die Strahlung auf einen Tumor fokussieren, ohne das durchstrahlte gesunde Gewebe zu schädigen, fokussieren wir einen Laserstrahl auf die defekte Stelle“, erläutert Pap. Dadurch wird das gebrochene Glasdichtungsmaterial aufgeschmolzen. Beim Abkühlen erstarrt das Material und dichtet die geschädigte Stelle wieder vollständig ab. Das Unglaubliche dabei: Das Verfahren gelingt, obwohl der Laser metallisches Material der SOFC durchdringen muss. Paps Abteilung hat diese Methode, an deren Entwicklung Doktoranden beteiligt waren, kürzlich zum Patent angemeldet.

ENORMER FORTSCHRITT

Hilfreich für ein längeres „Überleben“ des Dichtungsmaterials wäre es, wenn die Betriebstemperatur der SOFCs nicht ganz so hoch wäre. Deshalb arbeiten Dr. Frank Tietz und seine Kollegen daran, die Sauerstoffionendurchlässigkeit der Elektrolytschicht bei niedrigeren Temperaturen zu verbessern. „Wir können seit kurzem Zellen bauen, die bei etwa 550 Grad Celsius die gleiche Leistungsfähigkeit haben, für die wir vor 15 Jahren noch eine Temperatur von 950 Grad benötigt haben“, sagt Tietz. Diesen enormen Fortschritt konnten die Forscher durch eine Verdünnung der Elektrolytschicht auf



Dieser 25 mal 35 mal 50 Zentimeter große Brennstoffzellen-Stack (links) besteht aus drei Modulen zu je zehn einzelnen Brennstoffzellen (unten, im Vordergrund) der HT-PEFC-Variante.

ein bis zwei tausendstel Millimeter erreichen. „Weltweit sind wir die Einzigen, die solch dünne Schichten bei zehn mal zehn Quadratzentimeter großen Elektrolyten herstellen können“, freut sich Tietz. Die Wissenschaftler konnten diesen Erfolg für sich verbuchen, indem sie unter anderem die sogenannte Sol-Gel-Technik für ihre Zwecke optimierten, die beispielsweise auch zur Entspiegelung von Brillengläsern eingesetzt wird. Sollte man die SOFCs

jedoch auch in Zukunft bei 650 Grad betreiben wollen, dann würde durch die dünne Elektrolytschicht die Leistungsfähigkeit der SOFCs bei dieser Temperatur verdoppelt. Für diese hohe Betriebstemperatur spricht, dass die Zellen dann Methan ohne vorgeschalteten Reformer nutzen können.

Um weitere Fortschritte zu erzielen, untersuchen die Forscher auf mikroskopischer Ebene, wie sich die Materialien während des Betriebs der Brennstoffzelle verändern. Dazu nutzen sie die vielfältigen Analysewerkzeuge in ihrem hochmodernen Labor, das sie im November 2008 in Betrieb genommen haben. Auf diese Weise kommt nicht nur die SOFC voran. Denn die Forscher arbeiten auch an einer Alternative, der sogenannten Hochtemperatur-Polymer-elektrolyt-Brennstoffzelle oder kurz HT-PEFC. „Der entscheidende Vorteil ist, dass die HT-PEFC nur drei Minuten lang aufgewärmt werden muss. Die SOFC braucht dagegen 20 bis 30 Minuten, bis sie betriebsbereit ist“, sagt Dr. Bernd Emonts, der im IEK die Forschungsaktivitäten zu den Niedertemperaturbrennstoffzellen koordiniert. Das „HT“ trägt die HT-PEFC im Namen, weil sie eine

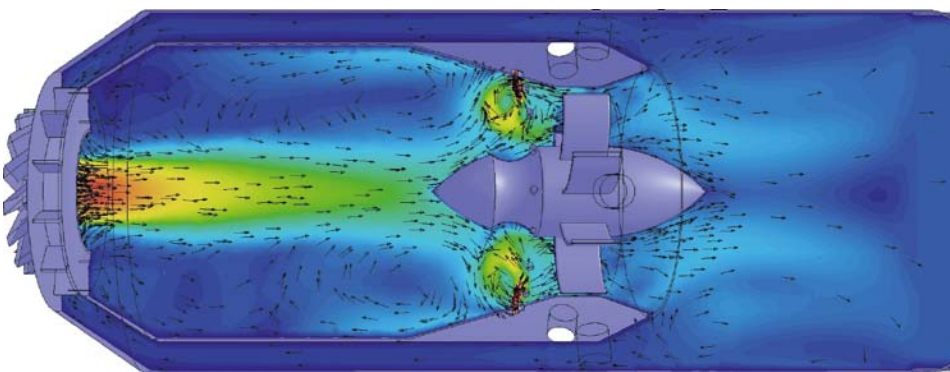
„hei-Be“-Version der schon älteren PEFC ist, die bei 90 Grad arbeitet. Die Betriebstemperatur der HT-PEFC beträgt dagegen 160 bis 180 Grad. „Sie hat den Vorteil, dass der Wasserstoff, den sie schluckt, nicht so hochrein zu sein braucht. Und damit sind wir wieder beim Diesel oder auch Kerosin“, erläutert Emonts. Denn die gemäßigte Forderung an die Reinheit des Wasserstoffs ermöglicht es, ihn in einem vorgeschalteten Reformer aus Diesel herzustellen.

REFORMER MIT HILFE VON JUGENE VERBESSERT

Entscheidend für die Effizienz eines solchen Reformers ist es, dass der Diesel gut mit Luft und Wasser durchmischt wird. Um das zu erreichen, haben Forscher um Prof. Ralf Peters die Ströme der Gase und Flüssigkeiten, die in die Misch-

kammer eines Reformers für eine 5-Kilowatt-HT-PEFC eingespritzt werden, mit dem Jülicher Supercomputer JUGENE berechnet. Außerdem haben sie die Ströme mit farbigen Flüssigkeiten in einem Reformer-Modell aus Glas simuliert. Auf diese Weise konnten sie die Form der Mischkammer so optimieren, dass anfänglich 99,999 Prozent des Diesels genutzt werden – und selbst nach 1000 Betriebsstunden sind es noch 99,7 Prozent. Aufgrund dieses Erfolges vertraute Peters' Team den Berechnungen des Supercomputers so sehr, dass sie ihn die Mischkammer eines größeren Reformers für eine 50-Kilowatt-Brennstoffzelle allein konstruieren ließen – ohne weiteren Abgleich mit realen Reformer-Modellen. Die ersten Tests des großen Reformers stehen zwar noch aus, doch die Forscher haben keinen Zweifel daran, dass „Kollege“ Supercomputer wieder eine erstklassige Arbeit abgeliefert hat.

Axel Tillemans



Computersimulation der Strömungsgeschwindigkeiten im Reformer, der den Wasserstoff für die HT-PEFC-Brennstoffzelle aus Diesel gewinnt. Die Geschwindigkeit nimmt von Rot (100 Meter pro Sekunde) über Gelb und Grün nach Blau hin ab.

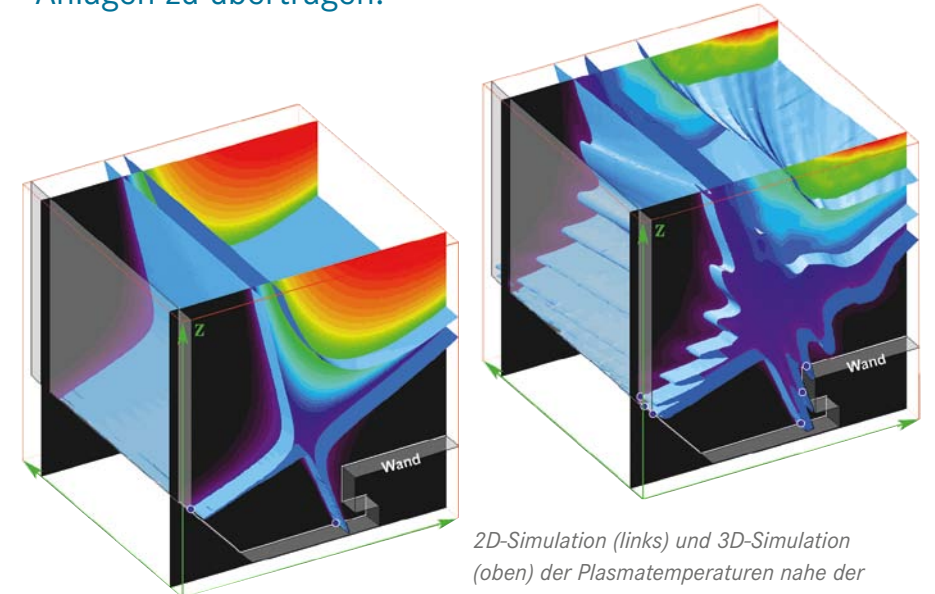


Simulieren für die Fusion

Das Jülich Supercomputing Centre betreibt den ersten Superrechner speziell für die europäische Fusionsforschung, den HPC-FF. Dessen Rechenleistung von rund 100 Teraflop/s – 100 Billionen Rechenoperationen pro Sekunde – wird benötigt, um das Wissen aus bisherigen Fusionsexperimenten auf künftige größere Anlagen zu übertragen.

Wer Fusionsanlagen (siehe auch S. 15 „Sonnenfeuer auf der Erde“) entwirft, kämpft mit einem besonderen Problem. Ein Seitenblick auf die Konstruktion von neuen Sportgeräten, Flugzeugen oder Brücken verdeutlicht es: Diese sehr unterschiedlich großen Objekte werden in Windkanälen etwa auf Luftwiderstand oder Stabilität getestet. Die Windkanäle haben daher auch sehr unterschiedliche Ausmaße, wobei ihre Windströmungen statt realer Testobjekte häufig maßstabgerechte Modelle umfließen. Prinzipiell kein Problem: Die Ingenieure können die Testergebnisse an andere Größenverhältnisse anpassen. „Anders als bei Windkanalexperimenten ist das für den wichtigen Übergangsbereich zwischen Plasma und Innenwand einer Fusionsanlage nicht möglich“, sagt Prof. Detlev Reiter vom Jülicher Institut für Energie- und Klimaforschung. Und weiter: „Das heutige Wissen über die physikalischen Vorgänge am Rande des Plasmas kann nur mit Hilfe von Computersimulationen auf künftige größere Fusionsanlagen oder gar auf ein Fusionskraftwerk extrapoliert werden.“

Tatsächlich spielen nahe der Innenwand einer Fusionsanlage sehr viele und sehr unterschiedliche physikalische Prozesse eine Rolle, die in einem extrem



2D-Simulation (links) und 3D-Simulation (oben) der Plasmatemperaturen nahe der Innenwand einer Fusionsanlage (ganz oben). Die Temperaturen nehmen von Rot über Grün nach Hellblau ab.

komplizierten Zusammenhang aufeinander einwirken. Daher ist der Aufwand für die Berechnungen enorm. „Erst mit der jetzigen Generation von Supercomputern und speziell mit dem HPC-FF ist es möglich geworden, alle drei Dimensionen einer Fusionsanlage in die Simulation einzubeziehen“, erläutert Reiter, der das Jülicher Team „Computersimulation für die Fusion“ leitet. Vorher hatte man nur den Querschnitt der Anlage als Grundlage für die Simulation benutzt, davon ausgehend, dass er repräsentativ für die ganze Anlage ist – ähnlich der Annahme, dass die Schnittfläche eines Ringes Fleischwurst überall gleich aussieht, egal an welcher Stelle der Wurst sie sich befindet. Doch die Simulationen auf dem HPC-FF unter

Einbeziehung der dritten Dimension deckten auf, dass sich der Plasmarand in experimentell schwer zugänglichen Bereichen nicht so symmetrisch wie angenommen verhält.

Da dies auch Konsequenzen für den Kontakt zwischen Plasma und Wand im internationalen Experimentalreaktor ITER haben könnte, der 2019 den Betrieb aufnehmen soll, wurde das Jülicher Team federführend mit entsprechenden Berechnungen beauftragt – und setzte sich damit in einem weltweiten Wettbewerb durch.

Frank Frick

Fahren ohne Benzin

Das chemische und technologische Know-how, das Jülicher Wissenschaftler in der Brennstoffzellenforschung erworben haben, hilft ihnen bei der Entwicklung leistungsfähiger Batterien für Elektroautos. Daneben untersuchen die Forscher, inwieweit man die Elektromobile als Zwischenspeicher für Überschuss im Stromnetz nutzen könnte. Außerdem haben sie schon jetzt die Frage im Blick, welche Folgen die neuen Antriebskonzepte für die Atmosphäre haben.



Elektroautos schonen die Umwelt, wenn sie Strom nutzen, der aus erneuerbaren Energiequellen gewonnen wurde. Zusätzlich könnten sie als Zwischenspeicher für überschüssigen Strom dienen.

Um die Abhängigkeit vom Öl zu verringern und den Ausstoß von klimaschädlichem Kohlendioxid einzudämmen, fördert die Bundesregierung alternative Kraftstoff- und Antriebskonzepte für Fahrzeuge. Fatal wäre es, wenn man dabei den Teufel mit dem Beelzebub austreiben würde, indem man statt des Kohlendioxids andere Stoffe in die Atmosphäre entließe, die den Treibhauseffekt noch mehr antreiben. Deshalb untersucht Dr. Cornelia Richter vom Jülicher Institut

für Energie- und Klimaforschung (IEK) die Wirkung von Wasserstoff, der in Brennstoffzellen als Fahrzeugtreibstoff zum Einsatz kommt. Dabei ist es unvermeidlich, dass ein geringer Teil dieses Wasserstoffs beispielsweise während seiner Speicherung verloren geht und ungenutzt in die Atmosphäre gelangt.

Wasserstoff greift zwar selbst nicht aktiv in den Strahlungshaushalt ein. „Doch er konkurriert mit Methan um sogenannte Hydroxyl-Radikale“, erläutert

Richter. Diese nennt man auch das „Waschmittel der Atmosphäre“, weil sie sehr effektiv viele Substanzen aus der Lufthülle der Erde entfernen, darunter auch Methan, dessen Treibhauswirkung mehr als zwanzigmal stärker ist als die von Kohlendioxid.

ENTWARNUNG BEI WASSERSTOFF

„Ein Hydroxyl-Radikal, das schon mit Wasserstoff reagiert hat, steht für eine Reaktion mit Methan nicht mehr zur Verfügung“, sagt Richter. Mehr Wasserstoff bedeutet also, dass weniger Methan aus der Atmosphäre entfernt wird. Die Physikerin und Meteorologin hat nun berechnet, welche Folgen ein Einstieg der Europäischen Union in die Wasserstoffwirtschaft hätte. Dabei hat sie erstmals auch die Konzentrationsänderungen anderer Luftschadstoffe berücksichtigt, die zum Teil für eine Zunahme der Hydroxyl-Radikale sorgen. Das Ergebnis: Global würde die Konzentration des atmosphärischen Waschmittels durchschnittlich um etwa ein Prozent sinken. Andererseits würde man aber durch die Nutzung von Wasserstoff als Energieträger Kohlendioxid einsparen, falls man den



Um die Klimaerwärmung zu stoppen, muss der Kohlendioxid- und Methananteil in der Atmosphäre möglichst gering gehalten werden.

Wasserstoff zum Beispiel mittels erneuerbarer Energien gewinnt. „Insgesamt überwiegt in diesem Fall der positive Effekt für das Klima“, so Richter.

BATTERIEN DER NÄCHSTEN GENERATION

Doch erneuerbare Energie kann man nicht nur in Form von Wasserstoff speichern, um damit Autos anzutreiben, sondern auch als elektrische Energie in Batterien. Deshalb hat das Forschungszentrum Jülich zusammen mit vier Universitäten und einem Max-Planck-Institut den Kompetenzverbund Nord (KVN) gegründet. Dieser will den „Nationalen Entwicklungsplan Elektromobilität“ unterstützen, der kürzlich von der Bundesregierung beschlossen wurde. Dabei schauen die Wissenschaftler des Verbundes weit nach vorn und haben die nächste und übernächste Batterie-Generation im Blick. „Um mit den heutigen Lithium-Ionen-Batterien 1000 Kilometer fahren zu können, benötigt man ein Batteriegewicht von einer Tonne – hier gibt es erheblichen Verbesserungsbedarf“, sagt der Koordinator des Verbundes, Dr. Hans Peter Buchkremer vom Forschungszentrum Jülich. Die Wissen-

schaftler vom IEK werden dabei vor allem ihre Erfahrungen einbringen, die sie bei der Entwicklung von Brennstoffzellen gewonnen haben – schließlich beruhen Brennstoffzellen und Batterien auf ähnlichen elektrochemischen Prinzipien und sind technologisch miteinander verwandt. Eine Schlüsselrolle kommt neuen Materialien zu, mit denen die Batterien leistungsfähiger, leichter und billiger werden sollen.

Es gibt noch eine weitere wichtige Forderung an die Batterien. „Sie sollen unregelmäßige Auf- und Entladezyklen gut vertragen können“, sagt der Jülicher Wissenschaftler Jochen Linßen, der im IEK das vom Bundeswirtschaftsministerium geförderte Projekt NET-ELAN koordiniert. Dabei geht es um eine vielversprechende Idee: Wäre es möglich, Elektroautos so ins Stromnetz zu integrieren, dass man ihre Batterien als Zwischenspeicher für überschüssigen Strom nutzen kann? Konkret könnte das Konzept folgendermaßen aussehen: Der Besitzer eines Elektromobils schließt mit seinem Stromanbieter einen Vertrag. Immer, wenn er seinen Wagen nicht braucht, schließt er ihn an die Steckdose an. Der Stromversorger entscheidet fort-

während neu, ob er der Autobatterie Strom entnimmt oder ob er sie auflädt, abhängig von Stromangebot und -nachfrage.

Die Aufgabe von NET-ELAN ist es, im Vorfeld mögliche Probleme einer sinnvollen Integration von Elektrofahrzeugen in das Stromnetz aufzuzeigen und Lösungsvorschläge zu unterbreiten. Beispielsweise vertreten Autobesitzer, Stromanbieter, Fahrzeughersteller und der Staat in Hinsicht auf die Elektromobilität verschiedene Interessen. „Diese Interessen müssen koordiniert werden, um eine sinnvolle Entwicklung von Elektromobilität voranzutreiben“, sagt Linßen. „Außerdem brauchen wir zur Verwirklichung solch eines Konzeptes intelligente Stromnetze, die eine automatisierte Steuerung der Auf- und Entladevorgänge möglich machen.“ Eine wichtige Frage ist jedoch bereits geklärt: Den zusätzlichen Strombedarf von einer Million Elektroautos werden die deutschen Stromerzeuger ohne weiteres verkraften. Denn der liegt unter einem Prozent der derzeitigen Stromproduktion Deutschlands.

Axel Tillemans

Forschung für die Eine-Million-Jahre-Sicherheit

Endlager für hochradioaktiven Abfall sind umstritten. Viele Menschen fürchten, dass Wassereinbrüche zu gefährlichen Reaktionen führen könnten und sich dann strahlendes Material in der Umwelt verteilt. Jülicher Wissenschaftler erkunden, was tatsächlich passiert, wenn abgebrannte Brennelemente in Kontakt mit Wasser kommen. Darüber hinaus entwickeln sie Keramiken, die sich eignen, um radioaktive Elemente besonders dauerhaft einzulagern.

Mit Hilfe der Rasterelektronenmikroskopie und mit zahlreichen anderen Analysemethoden untersuchen Jülicher Wissenschaftler die Korrosionsprodukte, die entstehen, wenn abgebrannter Kernbrennstoff mit Wasser in Berührung kommt.

In Deutschland erzeugen derzeit 17 Kernkraftwerke Strom. Dabei verbrauchen sie jährlich Brennelemente mit einem Gewicht von 370 Tonnen. Insgesamt rechnet das Bundesamt für Strahlenschutz auch für den Kernenergieausstieg mit mindestens 10.000 Tonnen hochradioaktivem Abfall, die einmal endgelagert werden müssen. Dabei bestehen die abgebrannten Brennelemente zu rund 95 Prozent aus Uranoxid. Der Rest sind Spaltprodukte und Elemente, deren Atomkerne durch das Einfangen von Neutronen entstanden sind. Die Strahlung dieser Elemente, der Actiniden, ist erst nach einer Million Jahre weitestgehend abgeklungen. So lange sollte daher ein Endlager den radioaktiven Abfall von der Umwelt abschirmen.

„Es ist eine sehr anspruchsvolle Aufgabe, verlässliche Aussagen zur Sicherheit über solche langen Zeiträume zu machen“, sagt Prof. Dirk Bosbach. Dass sie jedoch grundsätzlich zu bewältigen ist, davon ist der Leiter des Bereichs „Nukleare Entsorgung“ vom Jülicher Institut für Energie- und Klimaforschung überzeugt: „Wenn man das Verhalten des radioaktiven Abfalls unter Bedingungen, wie sie in einem Endlager herrschen, bis hinunter auf die Ebene der Moleküle verstanden hat, so kann man für die Sicherheitsanalyse physikalisch-chemische Grundgesetze heranziehen, die auch in Hunderttausenden von Jahren noch genauso gültig sind wie heute.“

DER KONTAKT MIT WASSER

Alle derzeitigen Konzepte sehen vor, den radioaktiven Abfall mehrere Hundert Meter tief in Gesteinsformationen einzulagern, die möglichst kein Wasser durchlassen. Bosbach und sein Team untersuchen, wie sich abgebrannter Kernbrennstoff verhält, falls es trotz aller Vorkehrungen zum Kontakt mit Wasser kommt. Die Forscher setzen dabei auf eine besondere Strategie: Zunächst versuchen sie herauszufinden, welche festen Substanzen in welcher Erscheinungsform – Fachleute sprechen von Phasen – durch den Einfluss des Wassers entstehen. Gleichzeitig untersuchen sie, welche Stoffe sich lösen und dann im Wasser nachweisbar sind. Aufgrund der hohen

Radioaktivität müssen sie diese Korrosionsexperimente samt der nötigen Analysen und Messungen in sogenannten „heißen Zellen“ durchführen – abgeschirmten Versuchsanlagen, in denen die hochradioaktiven Substanzen fernbedient gehandhabt werden.

Doch weil viele notwendige Untersuchungen unter diesen Bedingungen nicht möglich sind, wechseln die Wissenschaftler im nächsten Schritt ins Labor: Dort stellen sie einzeln und in geringsten Mengen die identifizierten Phasen – die Korrosionsprodukte – her, die dann allenfalls schwach radioaktiv sind. Anschließend bestimmen sie Daten, die auf den Naturgesetzen der Thermodynamik beruhen und verlässlich über die Stabilität von Substanzen Auskunft geben. In einem dritten Schritt erkunden sie in verschiedenen deutschen und europäischen Messanlagen, wie in Wasser gelöste Actinide von den Korrosionsprodukten aufgenommen – Fachsprache: sorbiert – werden. Auch hier sind die Proben nur schwach radioaktiv, weil die Forscher mit extrem verdünnten Lösungen arbeiten.

Neben vielen Detailergebnissen hat die Forschung bereits eine Erkenntnis hervorgebracht, die Dirk Bosbach für ganz wesentlich hält, wenn es um die Beurteilung der Langzeitsicherheit von Endlagern geht: „Die Korrosionsprodukte, die entstehen, falls abgebrannte Brennelemente mit Wasser in Berührung kämen, binden nahezu alle zunächst freigesetzten

radioaktiven Atomkerne, so dass diese sich nicht weiter verteilen können“, sagt der Jülicher Mineraloge.

ALTERNATIVE KONZEPTE

Bosbach gehört der Jülich-Aachener Forschungsallianz JARA an und hat den Masterstudiengang „Nuclear Safety Engineering“ mitentwickelt, der ab Ende 2010 von der RWTH Aachen angeboten wird. Seine Arbeitsgruppe beschäftigt sich jedoch nicht nur mit der direkten Endlagerung hochradioaktiven Abfalls, sondern auch mit alternativen Entsorgungskonzepten. Denkbar wäre es beispielsweise, die Brennstäbe wiederaufzubereiten und die besonders gefährlichen Actiniden abzutrennen. Plutonium, Americium, Curium und Neptunium könnten dann in keramische Materialien eingebaut und in dieser Form in ein Endlager eingebracht werden. Der Vorteil: „Solche Keramiken sind chemisch weitaus stabiler als abgebrannte Brennelemente oder ein Glasprodukt: Im Wasser, das mit ihnen bei gemäßigten Temperaturen über Jahre hinweg in Kontakt stand, lassen sich auch mit den empfindlichsten Nachweisverfahren keinerlei gelöste Substanzen finden“, berichtet Bosbach.

Allerdings haben die meisten Keramiken eine Schwäche: Unter dem Einfluss der Teilchen, die beim radioaktiven Zerfall der Actiniden frei werden, verlieren sie teilweise ihren geordneten Aufbau, werden glasartig und dadurch empfind-

Die „heißen Zellen“ im Forschungszentrum Jülich: In solchen Anlagen kann mit hochradioaktiven Stoffen experimentiert werden, ohne die Gesundheit der Wissenschaftler zu gefährden.

Frank Frick



Ein Mitarbeiter präpariert schwach radioaktive Proben, die sich in einem Kasten mit durchsichtigen Wänden, dem Handschuh-Kasten, befinden. Er kann die Proben nur mittels der Handschuhe erreichen.



Energiesparen im Treibhaus

Noch sind viele Gewächshäuser mit handelsüblichem Einfachglas eingedeckt. Besser wäre eine Glas-Folien-Kombination, die in Jülich entwickelt wurde: Sie lässt besonders viel natürliches Licht durch und fördert so das Wachstum und die Qualität von Tomaten, Paprika und Co. Vor allem aber hilft sie, beim Anbau von Pflanzen bis zu 50 Prozent Energie einzusparen.

Robert Stefan zieht Jungpflanzen an – hauptsächlich Salate, Kohl und Kräuter. „Wenn ich das unter normalem Fensterglas tue oder unter einer Polyethylen-Folie und die Jungpflanzen dann ins Freiland setze, machen sie erst mal schlapp“, berichtet er. „Denn sie sind das natürliche Lichtspektrum nicht gewöhnt.“ Wenn Robert Stefan die Pflanzen dagegen unter einer selbstreinigenden Folie anbaut, die im gesamten Lichtspektrum hochtransparent ist, überstehen sie den Freilandschock unbeschadet. Die Pflanzen werden sozusagen im Gewächshaus abgehärtet. Der Salat Lollo rosso bildet zudem unter dieser Spezialfolie eine stärkere Rotfärbung aus, weil sie im Gegensatz zu herkömmlichem Glas auch rund 80 Prozent des UV-B-Anteils der Sonnenstrahlung durchlässt.

Der Gehalt an gesundheitsfördernden Pflanzenfarbstoffen – den Anthozyanen –, Vitaminen, Geschmacksstoffen und ätherischen Ölen wird so in einigen Pflanzen deutlich erhöht.

Robert Stefan ist kein Hobbygärtner, sondern leitet einen Gartenbaubetrieb, der rund 35 Millionen Jungpflanzen pro Jahr produziert und rentabel sein muss. „Was bei den Gartenbauern zählt, sind zusätzliche Produktionsvorteile – nur wenn ein neues Dachmaterial den Pflanzen mehr Licht anbietet und sich zudem die Investition innerhalb von fünf Jahren amortisiert, hat eine neue Dacheindeckung am Markt eine Chance“, betont Dr. Silke Hemming, die an der niederländischen Forschungseinrichtung „Wageningen University and Research“ Teamleiterin im Bereich Gartenbautechnik ist.



Prof. Ulrich Schurr mit der Spezialfolie, die Pflanzen besser wachsen lässt.

Eine leichte Wölbung verrät, welche Dach- und Fensterfronten mit Folie überspannt sind – die eingeschlossene Luft trägt wesentlich zur guten Wärmeisolation des Gewächshauses bei.

Gemeinsam mit dem Besitzer eines der größten niederländischen Tomatenanbaubetriebe besuchte sie vor vier Jahren das heutige Jülicher Institut für Bio- und Geowissenschaften. Besonders interessierte sie sich für die dort neu entwickelten Gewächshäuser. Sie verfügen über ein neuartiges UV-B-durchlässiges Glas mit einer beidseitigen Antireflexbeschichtung. Diese Scheiben steigern die Lichtdurchlässigkeit auf bis zu 97 Prozent für den Teil des Spektrums, den Pflanzen zur Photosynthese benötigen. Der Effekt: Die Pflanzen wachsen kräftiger, sind widerstandsfähiger und produktiver. In den Niederlanden sind mittlerweile rund 250.000 Quadratmeter Gewächshausfläche mit Antireflexglas ausgestattet.

Das Jülicher Team um den Pflanzenphysiologen Prof. Ulrich Schurr, den Ingenieur Gerhard Reisinger und den Gartenbauexperten Prof. Andreas Ulbrich dachte weiter: Wie könnte man zusätzlich Energie sparen? Denn das neue Glas lässt zwar viel Licht ins Gewächshaus, isoliert aber genauso schlecht wie die sonst im Gartenbau eingesetzte Einfachverglasung. Bis zu 80 Liter Erdöl pro Quadratmeter und Jahr verbraucht ein Gewächshaus, in dem zum Beispiel die wärmeliebenden Weihnachtssterne angebaut werden. Zudem hat Glas den Nachteil, dass es leicht verschmutzt und

regelmäßig gereinigt werden muss, damit die Pflanzen immer genügend Licht zur Verfügung haben.

LICHTDURCHLÄSSIG UND ZUGLEICH WÄRMEISOLIEREND

So entstand die Idee einer Glas-Folien-Kombination. Die Jülicher entwickelten eine ganz neue Konstruktion: Bei dieser wird eine hochtransparente, stabile und selbstreinigende Folie über das Antireflex-Glas gespannt und am Rand mit einem speziellen Fensterprofil festgeklemmt. „Wir wählten gezielt eine sogenannte ETFE-Folie, deren Lebensdauer auch unter widrigen Witterungsbedingungen bei mehr als 20 Jahren liegt“, berichtet Gerhard Reisinger, der leitende Ingenieur des Projekts. Der Raum zwischen Glas und Folie wird mit Luft aufgeblasen. Das Ergebnis: „Die neue Glas-Folien-Kombination lässt bei den Wellenlängen, die für die Pflanzen wichtig sind, gleich viel Licht durch wie die bisherigen Gewächshauseindeckungen mit normalem, unbeschichtetem Glas – dabei liegt der Grad der Wärmedurchlässigkeit bei 40 bis 50 Prozent unter dem Wert der konventionellen Einscheibensysteme“, freut sich Schurr. Selbst Schnee stellt in Zukunft kein Problem mehr für die Gartenbaubetriebe dar: Das Luftpolster kann kurzzeitig abgelassen werden, um so die

Wärmeisolation zu verringern. Der Schnee taut ab, und natürliches Tageslicht kann wieder zu den Pflanzen im Gewächshaus vordringen.

Doch die Entwicklung ist noch nicht am Ende: Die Forscher nutzen für ihr aktuellstes Projekt eine sogenannte FEP-Folie aus der Flugzeugindustrie. Diese weist noch bessere Werte für die Lichtdurchlässigkeit auf, ist aber genauso langlebig und selbstreinigend wie die ETFE-Folie. Kürzlich wurde ein 56 Meter langes und 26 Meter breites Gewächshaus im Kompetenzzentrum Gartenbau (KoGa) aufgebaut, das die Jülicher Wissenschaftler gemeinsam mit Bonner Forschern betreiben. Dort kommt dann schon die nächste Generation der Glas-Folien-Kombination zum Einsatz: Auf der gesamten Länge des Gewächshauses wird eine zwei Meter breite FEP-Folienbahn ohne Unterbrechung verspannt, anstatt wie bisher jede Glasscheibe einzeln mit einer Folie zu versehen. Auf diese Weise sollen Transparenz und Wärmedämmung weiter gesteigert werden. Vor allem aber erwarten die Wissenschaftler, dass sich die Fertigungs- und Montagekosten gegenüber der Glas-Folien-Kombination der ersten Generation halbieren.

Brigitte Stahl-Busse

Nachrichten

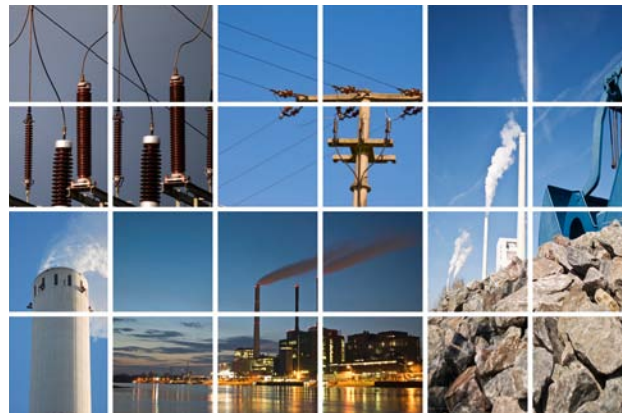
rund um die Energie- und Umweltforschung

Sparsamer Supercomputer



Der deutsche Hochleistungsrechner QPACE verteidigte weltweit in der Green500-Liste der energieeffizientesten Supercomputer, die im Juli 2010 erschien, den ersten Platz. Entwickelt wurde er unter wesentlicher Beteiligung der Universität Regensburg, des Forschungszentrums Jülich und des IBM-Forschungslabors in Böblingen. Die Green500-Liste hat sich neben der Top500-Liste der schnellsten Rechner etabliert, um die Leistung von Rechnern zu bewerten und einzuordnen. Denn die Diskussion um Rohstoff- und Energieknappheit ist in der Welt der Supercomputer angekommen und bedrängt das lange gültige Leitbild „nur die Geschwindigkeit zählt“.

Energietechnologien 2050



Unter diesem Titel haben Wissenschaftler eine Studie veröffentlicht, die vom Bundeswirtschaftsministerium initiiert wurde und an der Jülicher Energieexperten des Bereichs Systemforschung und Technologische Entwicklung wesentlich beteiligt waren. Sie soll der Vorbereitung des neuen 6. Energieforschungsprogramms dienen. In der Studie werden zahlreiche Energietechniken bewertet und der jeweilige Forschungs- und Entwicklungsbedarf analysiert. Die Jülicher Wissenschaftler setzten sich hierbei mit den Technikfeldern fossil basierte Stromerzeugung, Kohlendioxid-Abscheidung und -Speicherung, Brennstoffzellen sowie Fernwärmetransport auseinander.

Internationaler Wissensaustausch



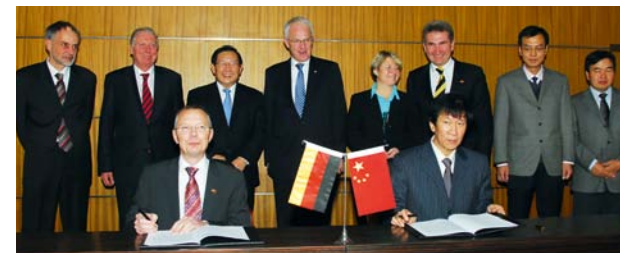
Mehr als 200 Wissenschaftler folgten der Einladung der Jülich Aachen Research Alliance (JARA) und trafen sich im März 2010 zur 1. Internationalen JARA-ENERGY Konferenz. Zur Diskussion standen unter anderem die Themen saubere Elektrizität, E-Mobilität und energieeffiziente Produktion. Dr. Michael Stückardt, zu dieser Zeit Staatssekretär im nordrhein-westfälischen Innovationsministerium, würdigte bei seiner Eröffnungsrede JARA als „eine der wichtigsten Innovationen in der Wissenschaftslandschaft“ und die Sektion JARA-ENERGY als „den größten Forschungsverbund im Bereich Energie in Deutschland“.

Höhenflüge für das Klima



Ein internationales Team von 50 Wissenschaftlern hat Anfang 2010 mit Hilfe des Forschungsflugzeuges Geophysica viele neue Daten gesammelt, um die künftige Entwicklung der Ozonschicht und deren Einfluss auf das Klima noch präziser als bisher voraussagen zu können. Vom nordschwedischen Kiruna aus drang die Geophysica weit in die Stratosphäre in Höhen bis zu 20 Kilometern vor. Die insgesamt sechswöchige Messkampagne – Teil des EU-Projekts RECONCILE – wurde vom Jülicher Atmosphärenforscher Marc von Hobe koordiniert. Sein Kampagnen-Tagebuch ist im Internet unter <http://www.fz-juelich.de/portal/forschung/umwelt/reconcile/blog> nachzulesen.

Forschungspartnerschaft mit China



Das Forschungszentrum Jülich hat die traditionell guten Beziehungen zu chinesischen Wissenschaftlern und Instituten weiter ausgebaut. So wurde Ende 2009 mit dem Solarmodulhersteller Baoding TianWei Solarfilms vereinbart, gemeinsam die Langzeitstabilität von Dünnschichtsolarzellen zu untersuchen. Vertreter des Forschungszentrums und der Peking-Universität unterzeichneten außerdem ein Memorandum of Understanding, mit dem die Zusammenarbeit in der Atmosphärenforschung vertieft wird.

IMPRESSUM

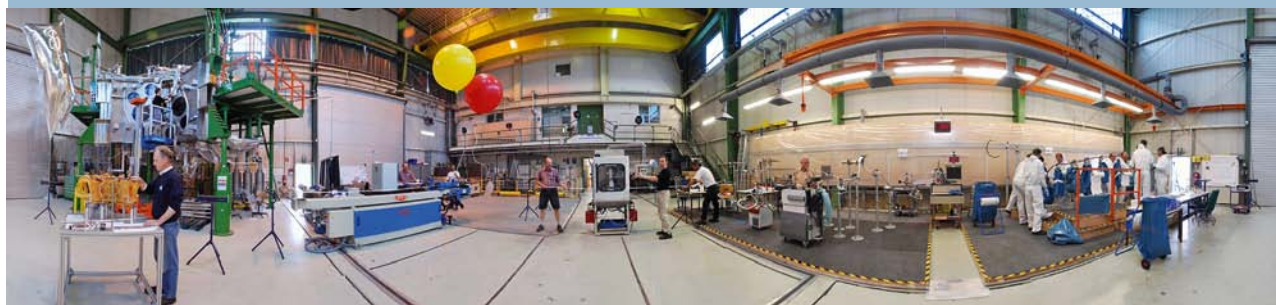
Forschen in Jülich Magazin des Forschungszentrums Jülich, ISSN 1433-7371 **Herausgeber:** Forschungszentrum Jülich GmbH | 52425 Jülich **Konzeption und Redaktion:** Dr. Frank Frick, Dr. Anne Rother (v.i.S.d.P.), Dr. Barbara Schunk, Erhard Zeiss **Autoren:** Dr. Wiebke Rögener, Dr. Frank Frick, Dr. Axel Tillemans, Brigitte Stahl-Busse **Design und Layout:** Grafische Medien, Forschungszentrum Jülich **Bildnachweis:** Forschungszentrum Jülich (Titelbild, S. 2 – 4, S. 6, S. 7 o. li., S. 7 o. re., S. 8/9, S. 10 u., S. 12, S. 15 u., S. 16 o., S. 17, S. 18 u., S. 19, S. 20/21, S. 22 u., S. 25, S. 26, S. 27 M., S. 30 – 33, S. 34 o. li., S. 34 u.), Fotolia (S. 7 o. li., S. 10 o., S. 15 o., S. 18 o., S. 28/29, S. 34 o. re.), Digital Stock (S. 35 o. li.), Arndt Lorenz (S. 35 o. re.), EFDA-Jet (S. 13, S. 14), ORNL (S. 22 o., S. 23), RWE (S. 16 u.), SPM-Gruppe, Universität Hamburg (S. 7 u.), Mauritius (S. 24), Baoding Tianwei Solarfilms Co., Ltd. (S. 35 u.), © Copyright 2006 General Atomics. Reprinted with permission. Further duplication without permission is prohibited. All rights reserved. (S. 27 o.) **Kontakt:** Geschäftsbereich Unternehmenskommunikation | Telefon: 02461 61-4661 | Telefax: 02461 61-4666 | E-Mail: info@fz-juelich.de **Druck:** Rhein-Ruhr-Druck GmbH & Co. KG **Auflage:** 8 000



Jülicher Elemente für „Wendelstein 7-X“

Für künftige Fusionskraftwerke gibt es zwei grundsätzlich unterschiedliche Baukonzepte: Tokamaks – wie in der Jülicher Maschine TEXTOR oder dem europäischen Experiment JET verwirklicht und für ITER geplant – und Stellaratoren. Welches davon vielversprechender ist, soll der Stellarator „Wendelstein 7-X“ klären helfen, der 2014 in Greifswald den

Betrieb aufnehmen wird. Bereits fertig ist ein außergewöhnliches System von insgesamt 140 supraleitenden elektrischen Verbindungselementen, das in Jülich mit einem Budget von 30 Millionen Euro entwickelt, gebaut und getestet wurde. Am 30. Juni 2010 wurden die letzten Elemente feierlich in Jülich übergeben.



Mitglied der:

