

# Max Planck FORSCHUNG



Das Wissenschaftsmagazin der Max-Planck-Gesellschaft 2.2010



**FOKUS**

## Energie für gutes Klima

Quellen, aus denen wir in Zukunft schöpfen

WIRTSCHAFTSPOLITIK  
Der Staat in  
der Steuerfalle

ANTHROPOLOGIE  
Im Spiegel  
des Neandertalers

MATERIALFORSCHUNG  
Magnete – von  
Mikroben gemacht

SOZIOLOGIE  
Die Vernetzung  
der Vielfalt



454  
SEQUENCING

## GS Junior System

# Next Generation Sequencing for Everyday and Everyone

*Introducing the GS Junior Benchtop System*



**The Complete System includes:** GS Junior Instrument, high-performance desktop computer, and the complete suite of GS data analysis software plus dedicated bioinformatic protocols.

### Simplified Workflow and Bioinformatics

Perfectly sized for labs that require:

- **Direct, clonal sequencing of amplicons (PCR products)**
- **Targeted human resequencing**
- ***De novo* sequencing of microbial genomes**
- **Metagenomic characterization of complex environmental samples**
- **Pathogen detection**

...and many more applications, all for a price with extraordinary value!

Learn more at [www.gsjunior.com](http://www.gsjunior.com)

For life science research only.  
Not for use in diagnostic procedures.

454, 454 LIFE SCIENCES and 454 SEQUENCING are trademarks of 454 Life Sciences Corporation, Branford, CT, USA, a Roche company. GS FLX TITANIUM and GS JUNIOR are trademarks of Roche.

© 2010 Roche Diagnostics. All rights reserved.

Roche Diagnostics GmbH  
Roche Applied Science  
68298 Mannheim, Germany





## Liebe Leserin, lieber Leser,

das Dilemma scheint unauflösbar: Bis zum Jahr 2030 wird der weltweite Energiebedarf nach Aussage der Internationalen Energieagentur (IEA) um rund 50 Prozent steigen. Im selben Zeitraum aber müssen die weltweiten Kohlendioxid-Emissionen um die Hälfte sinken, um die Erderwärmung bis zum Ende des Jahrhunderts auf etwa zwei Grad zu begrenzen. So fasst der „Wissenschaftliche Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen“ den derzeitigen Stand der Prognosen zusammen. Aus dieser prekären Situation gibt es nur einen Ausweg: intensive Forschung an völlig neuen technischen Ansätzen der Energieerzeugung und -wandlung. Denn es reicht nicht, den derzeitigen Energiemix zu verändern, damit wir dem Ziel nachhaltiger Energieversorgung wesentlich näher kommen. Vielmehr sind Innovationen notwendig, wie sie nur die Grundlagenforschung leisten kann.

Daher arbeiten Max-Planck-Wissenschaftler an der Entwicklung neuer Materialien für Solar- und Brennstoffzellen; sie versuchen den „Sonnenofen“ auf der Erde nachzubauen oder Pflanzenabfälle als Energieträger zu nutzen; sie loten die Möglichkeiten aus, Wasserstoff sicherer und platzsparender zu speichern; und sie legen die Grundlagen, um Batterien so effizient zu machen, dass sie sich auch für Kraftfahrzeuge eignen.

Wie der ehemalige Chefökonom der Weltbank, Nicholas Stern, in seinem Buch *Der Global Deal* feststellt, werden neue Techniken und Investitionschancen in Kohlendioxid-arme und erneuerbare Energien in den kommenden Jahrzehnten die wichtigsten Triebfedern für nachhaltiges wirtschaftliches Wachstum sein. Und die einzige Chance, den mit dem Klimawandel verbundenen weltweiten Temperaturanstieg zu verlangsamen. Daher plädiert Stern für mehr öffentliche Technologie- und Forschungsförderung: „Es ist von höchster Bedeutung, dass Forschungsinstitutionen auf der ganzen Welt unterstützt werden, um neue Ideen unvoreingenommen zu entwickeln.“

Damit neue Erkenntnisse der Grundlagenforschung möglichst schnell zur Lösung der Energiefrage beitragen, arbeitet sie idealerweise Hand in Hand mit angewandter Forschung. Genau dafür stehen viele Kooperationen zwischen Max-Planck- und Fraunhofer-Instituten, von denen wir in diesem Heft zwei vorstellen: Im ProBio-Projekt entwickeln Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für Dynamik komplexer technischer Systeme gemeinsam mit ihren Kollegen der Fraunhofer-Institute für Fabrikbetrieb und -automatisierung sowie für Keramische Technologien und Systeme eine neue Generation von Brennstoffzellen, die letztlich mit Biomasse betrieben werden. Und Chemiker des Max-Planck-Instituts für Festkörperforschung arbeiten mit dem Fraunhofer-Institut für Silicatforschung zusammen, um aus einer besonders hitzeresistenten Keramik neuartige Fasern für Verbundmaterialien zu ziehen.

Doch es sind nicht nur grundlegende technische Herausforderungen, vor die uns der Klimawandel und die künftige Energieversorgung stellen. Auch die Geisteswissenschaften sehen sich mit neuen Fragen konfrontiert. So untersuchen Forscher des Max-Planck-Instituts für ausländisches öffentliches Recht und Völkerrecht die rechtlichen Implikationen von Geo Engineering: Wie lassen sich Eingriffe mit dem Völkerrecht vereinbaren, die den Klimawandel eindämmen sollen, möglicherweise aber auch unerwünschte Nebenwirkungen mit sich bringen? Allein die Beiträge in dieser Ausgabe der *MAXPLANCKFORSCHUNG* zeigen, vor welchen umfassenden Aufgaben die Welt und insbesondere die Forschung in den kommenden Jahren und Jahrzehnten stehen. Die Artikel belegen aber auch, dass die Max-Planck-Gesellschaft einen maßgeblichen Beitrag leistet, um diese Herausforderungen zu bewältigen.

*Peter Gruss*

Peter Gruss,  
Präsident der Max-Planck-Gesellschaft





## 16 FOKUS

### Energie

#### 16 Ein Stoff, den Hitze kaltlässt

Turbinen und Motoren arbeiten umso effektiver, je höher ihre Betriebstemperatur ist. Beschichtungen mit einer besonders hitzeresistenten Keramik könnten daher helfen, Energie zu sparen.

#### 24 Strom, der aus Holz fließt

Wirklich sauber arbeiten Brennstoffzellen nur, wenn sie Stoffe aus regenerativen Quellen umsetzen – zum Brenngas aus Biomasse. Das soll das Forschungsprojekt ProBio ermöglichen.

#### 30 Kraftwerk im Blattwerk

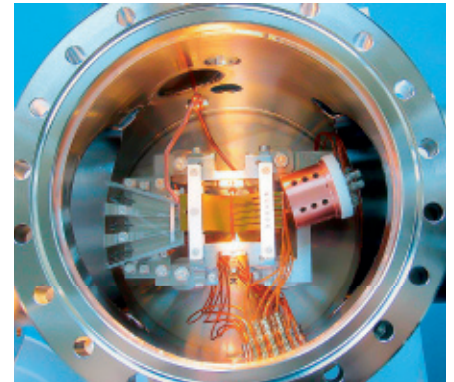
Wie sich Sonnenenergie in einem Treibstoff binden lässt, macht die Fotosynthese vor. Allerdings arbeiten die meisten beteiligten Biomoleküle nicht effizient oder sind technisch nicht einsetzbar. Das wollen Forscher ändern.

#### 36 Wenn der Mensch das Klima lenkt

Die Klimaerwärmung schreitet voran. Daher wollen Forscher in den Kohlenstoff-Kreislauf eingreifen. Wie aber lassen sich solche Großexperimente – so sie überhaupt funktionieren – mit internationalen Rechtsnormen vereinbaren?

ZUM TITEL: Die Menschheit steckt in einem Dilemma: Während der Energiebedarf rapide steigt, gefährden konventionelle Quellen wie etwa fossile Brennstoffe zunehmend das Klima. Grundlagenforscher arbeiten an neuen Konzepten, damit der Globus grün bleibt.

## Inhalt



## 48 Ionen in der Falle: Mit Detektoren wie diesem spüren Physiker den Geheimnissen der Quantenwelt nach.

### PERSPEKTIVEN

- 06 Heli-Trainer setzt neue Maßstäbe bei der Pilotenausbildung
- 06 Paradigmenwechsel in der Tumorthherapie
- 07 „Das Ziel ist die Designer-Mikrobe“
- 08 80 Millionen Euro für die Stammzellforschung
- 08 Max-Planck-Forschungspreis verliehen
- 08 Zwei Max Planck Center in Südkorea geplant
- 09 „Jugend forscht“-Bundessieger ausgezeichnet
- 09 Meet us at Facebook
- 09 Ins Netz gegangen

### ZUR SACHE

- 10 **Der Staat in der Steuerfalle**  
Wie kann der Staat verhindern, dass internationale Konzerne ihre in Deutschland erwirtschafteten Gewinne am Fiskus vorbei ins Ausland schleusen?

### FOKUS

- 16 Ein Stoff, den Hitze kaltlässt
- 24 Strom, der aus Holz fließt
- 30 Kraftwerk im Blattwerk
- 36 Wenn der Mensch das Klima lenkt



## GEOMAX

Sieht Deutschland bald alt aus? – dem demografischen Wandel auf der Spur



**54** Beweis in der Hand: Svante Pääbo hat herausgefunden, dass der Neandertaler unser nächster Verwandter ist.



**76** Getreide in der Forschung: Gerste gilt als ideales Modell für die genetische Anpassung an Trockenstress.



**82** Folklore in der Großstadt: Exotische Umzüge gehören in Global Cities wie Frankfurt zum gewohnten Straßenbild.

### SPEKTRUM

- 42 Winter auf Balkonien
- 42 Sauerstoff vom wunderbaren Methan-Fresser
- 43 Wo Kometen Staub spucken
- 43 Fingerabdruck für Gene
- 44 Sternentod in drei Dimensionen
- 44 Stickstoff bindet Treibhausgas
- 45 Kosmische Kraftwerke der ersten Generation
- 45 Menschliche Stammzellen bleiben unverzichtbar
- 46 Werden Europas Winter kälter?
- 46 Standfester Muschelfuß
- 47 Die Rufe der Hufeisennasen
- 47 Turbulenzen im Griff
- 47 Gequetschtes Quantenrauschen

### PHYSIK & ASTRONOMIE

- 48 Die Zähmung der Quantengeister**  
Ein Teilchen, das sich gleichzeitig an zwei Orten aufhält – das gibt es nur in der Quantenwelt. Wenn Physiker solche Phänomene untersuchen, lernen sie Einiges über das mysteriöse Universum des Allerkleinsten.

### BIOLOGIE & MEDIZIN

- 54 Im Spiegel des Neandertalers**  
Menschen und Neandertaler hatten Sex! Für Anthropologen ist dieser Befund aber längst nicht so spektakulär wie für die Medien. Vielmehr interessieren sie sich für das Genom unseres engsten Verwandten.
- 62 Meer Leidenschaft**  
Zur Person: Nicole Dubilier

### MATERIAL & TECHNIK

- 70 Magnete - von Mikroben gemacht**  
Magnetische Nanopartikel, wie sie magneto-taktische Bakterien produzieren, könnten bei der Suche nach Tumoren helfen und wären damit für die Medizin wertvoll.

### UMWELT & KLIMA

- 76 Gene gegen das Verdursten**  
In vielen Regionen der Erde bedroht Wassermangel die Landwirtschaft. Neue Pflanzensorten wie die Gerste müssen daher besonders widerstandsfähig gegenüber Trockenheit sein.

### KULTUR & GESELLSCHAFT

- 82 Die Vernetzung der Vielfalt**  
Frankfurt gehört zu den Global Cities. Soziologen untersuchen die gesellschaftliche Vielfalt der Mainmetropole und beteiligen sich mit Vorschlägen am neuen Entwurf für ein Integrations- und Diversitätskonzept.

### RUBRIKEN

- 03 Editorial**
- 90 Rückblende**  
90 Vielleicht-Maschine mit Zukunft
- 92 Neu erschienen**  
92 Tobias Hürter, Max Rauner, Die verrückte Welt der Paralleluniversen  
92 Tobias Hülswitt, Roman Brinزانik, Werden wir ewig leben?  
93 Bert Hölldobler, Edward O. Wilson, Der Superorganismus  
94 Klaus Roth, Chemische Köstlichkeiten
- 95 Standorte**
- 95 Impressum**

# Heli-Trainer setzt neue Maßstäbe bei der Pilotenausbildung

Heli Aviation GmbH, KUKA Roboter GmbH und das Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik präsentieren auf der internationalen Luftfahrt-Leitmesse ILA eine gemeinsame Konzeptstudie für einen neuartigen Hubschrauber-Flugtrainer



Ziel der gemeinsamen Entwicklung ist ein realistischer Flugtrainer, der es ermöglicht, Piloten effektiv, sicher und wirtschaftlich zu trainieren. Anders als bei regulären Flugstunden können kritische Flugmanöver beliebig oft wiederholt und bis zum Absturz – der in diesem Fall folgenlos bleibt – simuliert werden. Bei der praktischen Flugausbildung muss der Fluglehrer hingegen sofort beim Einleiten falscher Steuereingaben eingreifen. Durch den Einsatz des Heli-Trainers benötigt ein angehender Pilot daher weniger Zeit, um das Gefühl für die Bewegungen zu entwickeln, versteht die Folgen seiner Steuereingaben besser und erlernt Manöver in einer sicheren Umgebung mit einer steileren Lernkurve. Eine der größten Herausforderungen bei der technischen Umsetzung eines solchen Trainers ist, Bewegungen komplexer realer Systeme auf engstem Bewegungsraum so wiederzugeben, dass ein Pilot tatsächlich die Wahrnehmung hat, sich in einem realen Luftfahrzeug zu befinden. Bei dem vom Max-Planck-Institut für biologische Kybernetik zur Bewegungssimulation weiterentwickelten KUKA Roboter vom Typ KR 500 TÜV handelt es sich um einen Schwerlastroboter, an dem eine Hubschrauberzelle befestigt ist, in der ein bis zwei Personen Platz nehmen und realistische Hubschraubermanöver trainieren können.

Der vier bis sechs Meter hohe Flugsimulator Heli-Trainer kann mit einem Joystick gesteuert werden.

Foto: Jo Teichmann

## Paradigmenwechsel in der Tumorthherapie

Individuelle Tumore unterscheiden sich bei ein und derselben Krebsart erheblich in ihrem Mutationsprofil. Deshalb wurde 2008 das Internationale Krebsgenomkonsortium (ICGC) gegründet, um einen umfassenden Katalog der genetischen Veränderungen in Tumoren zu erstellen.

Gegenwärtig sind weltweit 22 Länder unter dem Dach der Organisation vereint. Ihr Ziel: für jeden einzelnen Tumortyp beziehungsweise Patienten molekulare Marker für Vorhersagen zur Verfügung zu stellen, um eine möglichst individuelle, risikoadaptierte Therapieentscheidung treffen und nicht wirksame Behandlungen vermeiden zu

können sowie die Suche nach neuen therapeutischen Angriffspunkten. Die deutschen Wissenschaftler, unter ihnen die Gruppe von Hans Lehrach am Max-Planck-Institut für molekulare Genetik in Berlin, haben Anfang 2010 das Verbundprojekt „Pädiatrische Hirntumore“ gestartet, das vom Deutschen Krebsforschungszentrum in Heidelberg ko-

ordiniert wird. Hirntumore, die jährlich mehr als 300-mal in Deutschland diagnostiziert werden, sind die Hauptursache der Krebssterblichkeit im Kindesalter. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung und die Deutsche Krebshilfe e. V. fördern die deutsche ICGC-Beteiligung über fünf Jahre mit 15 Millionen Euro.

# „Das Ziel ist die Designer-Mikrobe“

Im Mai 2010 verkündete Craig Venter die Erschaffung der ersten „synthetischen Zelle“. Seinem Team ist es gelungen, das Genom des Bakteriums *Mycoplasma mycoides* im Labor Stück für Stück nachzubauen und in die Zelle einer anderen Bakterienart zu transplantieren. Ralph Bock vom Max-Planck-Institut für molekulare Pflanzenphysiologie in Potsdam kommentiert die Ergebnisse im Interview.

*Was ist so besonders an der aktuellen Arbeit von Venter? Schließlich wird schon seit Jahren beim Klonen das Erbgut von einer Zelle auf eine andere übertragen.*

**Ralph Bock:** Das ist richtig. Beim Klonen wird jedoch der gesamte Zellkern in eine – zuvor entkernte – Eizelle transplantiert. Es werden also nicht nur das Erbgut, sondern auch Proteine und Enzyme übertragen. Venter hat gezeigt, dass transplantierte DNA alleine eine Zelle umprogrammieren kann. Das eigentlich Neue aber ist, dass erstmals das Erbgut eines lebenden Organismus komplett im Labor hergestellt wurde. Dazu musste die Sequenz des Erbguts genau entschlüsselt und der DNA-Strang Stück für Stück zusammengesetzt werden. Das ist eine enorme Leistung, wenn man bedenkt, dass das Genom dieses Bakteriums aus über einer Million Bausteinen besteht. Ein einziger falscher Baustein kann zur Folge haben, dass ein lebensnotwendiges Gen nicht korrekt abgelesen wird und das gesamte Genom nicht funktioniert. So geschehen in der aktuellen Arbeit: Drei Monate hat das Team mit der Suche nach einem fehlenden Basenpaar zugebracht – einem aus einer Million!

*Welche Bedeutung haben diese Ergebnisse für die Forschung?*

**Ralph Bock:** Aus wissenschaftlicher Sicht waren die Ergebnisse zu erwarten. Kaum ein Wissenschaftler hat daran gezweifelt, dass ein korrekt synthetisiertes bakterielles Genom funktioniert, wenn man es in eine neue Zelle einbringt. Aber bislang ist das noch nie im Experiment demonstriert worden. Aber was noch wichtiger ist: Mit den von Venters Team entwickelten Methoden können wir das Erbgut künftig schneller und in größerem Maßstab untersuchen und effizienter verändern als bisher.

*Venters Experimente werden als synthetische Biologie bezeichnet. Was soll sie erforschen?*

**Ralph Bock:** Das Ziel ist, Erbgut so zu verändern, dass sein Träger die gewünschten Fähigkeiten bekommt. Beispielsweise Bakterien, die in großen Mengen medizinische Wirkstoffe produzieren. Eine Art Designer-Mikrobe also. Außerdem könnten wir auf diese Weise eine Minimalversion des Genoms erstellen. Wir wissen nämlich nach wie vor nicht, welche Gene ein Organismus unbedingt zum Leben benötigt und welche entbehrlich sind. Dazu müssen wir noch sehr viel mehr darüber lernen, wie Gene reguliert werden und wie sie sich gegenseitig beeinflussen – ein wichtiges Anliegen eines weiteren modernen Gebiets der Biowissenschaften, der sogenannten Systembiologie.

*Lassen sich Venters Ergebnisse auch auf andere Organismen übertragen? Ist es denkbar, menschliches Erbgut im Labor herzustellen und in eine Zelle zu transplantieren?*

**Ralph Bock:** In absehbarer Zukunft nicht. Ein Problem ist die Genomgröße: Venter hat sich nicht umsonst ein Bakterium ausgesucht, das eines der kleinsten bekannten Genome der belebten Welt besitzt. Die DNA des Menschen besteht im Vergleich dazu aus 3000-mal mehr Bausteinen. So große Genome fehlerfrei zu entschlüsseln und neu zu synthetisieren ist technisch noch nicht möglich. Dazu kommt, dass bei Tieren und Pflanzen der Bauplan nicht nur in der Abfolge der DNA-Bausteine steckt. Sowohl die Bausteine selbst als auch die Proteine, die die DNA umgeben, können chemisch verändert und auf diese Weise reguliert werden. Bei Bakterien spielen solche epigenetischen Veränderungen kaum eine Rolle. Synthetische Pflanzen- oder Tierzellen müssten aber alle epigenetischen Veränderungen an den korrekten Stellen enthalten – davon sind wir noch Jahrzehnte entfernt.

*Trotzdem werfen Kritiker Venter vor, er spiele Gott und erschaffe künstliches Leben.*

**Ralph Bock:** Das ist übertrieben. Venter und seine Kollegen haben zwar Erbgut synthetisiert, dieses aber in eine natürliche Bakterienzelle eingebracht. Letztlich stammt also nur ein winziger, wenn auch zentraler Teil der neuen Zelle aus dem Labor. Für „künstliches Leben“ müsste auch die gesamte Hardware der Zelle im Labor hergestellt werden, ihre Protein- und Ener-

giefabriken oder etwa die Membranen mit all ihren Transportsystemen für die Stoffaufnahme und -abgabe. Wir sprechen hier von mehreren 10000 Komponenten, die für eine komplett künstliche Zelle synthetisiert und korrekt platziert werden müssten.

*Ist das überhaupt vorstellbar?*

**Ralph Bock:** Vorstellbar schon, aber natürlich sehr, sehr schwierig. Fette, Zucker und Aminosäuren könnten noch relativ einfach hergestellt werden, die Synthese größerer Proteine ist schon sehr viel aufwendiger. Große makromolekulare Komplexe können gegenwärtig überhaupt noch nicht auf rein chemischem Wege hergestellt werden. Meiner Meinung nach sind wir auch hier noch Jahrzehnte davon entfernt, bis eine komplett künstliche Zelle Realität werden könnte.

*Ein Vorwurf betrifft die Patente, die Venter auf seine Entdeckungen angemeldet hat. Könnten sie die weitere Forschung behindern?*

**Ralph Bock:** Solche Patente greifen in der Regel nur dann, wenn Dritte die neue Technik kommerziell nutzen wollen. Die Grundlagenforschung wird davon nicht wesentlich berührt.

*Welche ethischen Fragestellungen werfen die Ergebnisse auf?*

**Ralph Bock:** Zum gegenwärtigen Zeitpunkt meiner Meinung nach keine, denn die Grenzen zwischen klassischer Gentechnologie und synthetischer Biologie sind ohnehin fließend. Seit über 20 Jahren werden einzelne neue Gene in das Erbgut von Zellen hinzugefügt oder andere ausgeschaltet. Auch die Verwendung chemisch synthetisierter Gene gehört seit Jahren zum Standardrepertoire der Gentechnik. Viele der heute eingesetzten Medikamente werden bereits von solchen genetisch veränderten Mikroorganismen produziert. Venter hat nun die Möglichkeiten erweitert, mit denen wir künftig den Bauplan des Lebens analysieren und gezielt verändern können – nicht weniger, aber auch nicht mehr.



Ralph Bock



## 80 Millionen Euro für die Stammzellforschung

In Münster wird ein neues Referenzzentrum namens CARE entstehen – das Centrum für Angewandte Regenerative Entwicklungstechnologien



Thomas Sternberg (Landtagsabgeordneter NRW/CDU), Hans Schöler, Annette Schavan und Jürgen Rüttgers (von links)

Kaum ein Forschungsgebiet hat sich in den vergangenen Jahren so dynamisch entwickelt wie das der iPS-Technologie. Durch einfache Tricks können Forscher ausgereifte Körperzellen in ein pluripotentes Stadium zurückversetzen, sodass sie – wie embryonale Stammzellen – wieder alle der mehr als 200 Zelltypen des Körpers bilden können. Die Methode zur Herstellung der sogenannten induzierten pluripotenten Stammzellen (iPS-Zellen) konnte seit ihrer Etablierung im Jahr 2006 deutlich vereinfacht werden. Das Max-Planck-Institut für molekulare Biomedizin in Münster hat erheblich hierzu beigetragen und wird sich nun in Kooperation mit dem neu zu errichtenden Referenzzentrum gezielt dem Aufbau und der Weiterentwicklung der iPS-Technologie widmen. Das Referenzzentrum bildet die Basis für strategische Kooperationen sowie eine methodische Plattform für die Weiterentwicklung und Vermarktung der iPS-Zell-Technologie und daraus resultierender Produkte. Die 80 Millionen Euro Anschubfinanzierung wird zu 75 Prozent vom Land Nordrhein-Westfalen getragen, 25 Prozent steuert das BMBF bei.

## Max-Planck-Forschungspreis verliehen

Timothy George Bromage vom New York University College of Dentistry und Michael Tomasello vom Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig haben den mit jeweils 750000 Euro dotierten Max-Planck-Forschungspreis erhalten. „Die Alexander von Humboldt-Stiftung und die Max-Planck-Gesellschaft ehren damit zwei Wissenschaftler, die wesentlich dazu beigetragen haben, die Evolution des Menschen besser zu verstehen“, sagte Max-Planck-Präsident Peter Gruss

bei der Preisverleihung. Tomasello beschäftigt sich mit der Entstehung von Sprache und der kulturellen Evolution beim Menschen. Dabei geht er in empirischen Studien mit Kleinkindern und Menschenaffen der Frage nach, über welche kognitiven Fähigkeiten Menschen im Unterschied zu den ebenfalls hoch entwickelten Menschenaffen verfügen. Bromage unter-



Peter Gruss, Michael Tomasello, Timothy Bromage, Cornelia Quennet-Thielen, Helmut Schwarz und Kristina zur Mühlen (von links)

sucht, was man aus der Struktur von Knochen und Zähnen über die Lebensumstände früher Menschen erfahren kann. Er hat u. a. herausgefunden, wie man aus dem Knochenaufbau auf die Wachstumsgeschwindigkeit und individuelle Lebensgeschichte früher Menschen schließen kann. Der Max-Planck-Forschungspreis wird aus Mitteln des BMBF finanziert. Staatssekretärin Cornelia Quennet-Thielen überreichte die Auszeichnung im Rahmen einer von der TV-Journalistin Kristina zur Mühlen moderierten Veranstaltung im Hannover Congress Centrum. Der Preis geht jedes Jahr an jeweils einen in Deutschland und einen im Ausland tätigen, international ausgewiesenen Forscher und soll diesen ermöglichen, ihre Arbeiten im Rahmen internationaler Kooperationen voranzutreiben.

### Zwei Max Planck Center in Südkorea geplant

Wissenschaftler der Max-Planck-Gesellschaft bauen ihre Kooperationen mit den südkoreanischen Kollegen der privaten Pohang University of Science and Technology (POSTECH) aus. Max-Planck-Präsident Peter Gruss und der Präsident von POSTECH, Sunggi Baik, unterzeichneten am 14. Juni in München ein entsprechendes Abkommen, das im Rahmen einer „Research Initiative“ die Einrichtung von zunächst zwei internationalen Max Planck Centern auf den Gebieten „Attosecond Science“ und „Complex Phase Materials“ vorsieht. Wissenschaftler beider Einrichtungen kooperieren bereits auf diesen Gebieten und werden im Rahmen der Center den Austausch von Know-how und Personal forcieren sowie Nachwuchswissenschaftler gemeinsam ausbilden.

# „Jugend forscht“-Bundessieger ausgezeichnet

In Essen wurden die Sieger des 45. Bundeswettbewerbs „Jugend forscht“ gekürt. Ferdi Schüth, Direktor am Max-Planck-Institut für Kohlenforschung in Mülheim, konnte im Fachgebiet Biologie gleich drei frisch gebackenen Bundessiegern gratulieren: Florian Schreier, Thomas Irion und Lukas Dieterle hatten mit ihrer Arbeit zum Schwarmverhalten von Fischen die Jury überzeugt und fahren nun auf Einladung der EU auch zum „22nd European Union Contest for Young Scientists“. Die drei aus Baden-Württemberg stammenden Nachwuchsforscher hatten das Schwarmverhalten verschiedener Fischarten analysiert und anschließend ein Simulationsprogramm mit einem virtuellen Fischschwarm entworfen, dessen Verhalten tatsächlich in hohem Maße mit seinem realen Vorbild übereinstimmte.



Ferdinand Schüth mit den drei Biologie-Bundessiegern Lukas Dieterle, Florian Schreier und Thomas Irion (von links).

## Meet us at Facebook

Seit Kurzem betreibt die Max-Planck-Gesellschaft eine eigene Seite auf Facebook. Mit über 400 Millionen aktiven Teilnehmern, von denen etwa die Hälfte täglich die Seite besucht, ist Facebook führend unter den sozialen Netzwerken. Es sind in allererster Linie junge Leute, die sich hier vernetzen und ihre Erfahrungen aus-

tauschen – über das Studium im Ausland ebenso wie über die angesagteste Location der Stadt. Welches Potenzial derartige Community-Plattformen für die Unternehmenskommunikation haben, gilt es nun auszuloten. Noch ist der Kreis jener, die hier direkt mit der Max-Planck-Gesellschaft in Kontakt treten, überschaubar – etwas mehr als 500 „Freunde“ zählt die Seite derzeit. Es dürfen gerne noch welche dazukommen!

## Ins Netz gegangen



### Verjüngungskur für Zellen

Am Max-Planck-Institut für molekulare Biomedizin in Münster ist es Hans Schöler gelungen, durch Zugabe eines einzigen Faktors, Oct4, die Lebensuhr neuronaler adulter Stammzellen zurückzudrehen: Sie entwickeln sich zu pluripotenten Zellen, jenen Alleskönnern, auf denen die Hoffnungen der regenerativen Medizin ruhen. Ein Film zeigt u. a. anhand von Animationen, wie pluripotente Stammzellen zu einer Quelle für körpereigenes Ersatzgewebe werden und sich so möglicherweise zur Therapie von Krankheiten wie Parkinson einsetzen lassen: <http://www.filme.mpg.de>

### Komplett komplex

Sabine Sütterlin ist freie Wissenschaftsjournalistin. Seit Juni dieses Jahres berichtet sie über „ihre Feldstudien an den drei Max-Planck-Instituten in Dresden, an denen Forscher komplexe Systeme und molekulare Vorgänge in Zellen und festen Stoffen erkunden“. In ihrem Blog „Komplett komplex“ schreibt sie mit viel Sprachwitz und guter Beobachtungsgabe unter anderem über Chaperone, die Proteine in Form bringen, oder über Fruchtfliegenembryos, die zu Filmstars werden: <http://www.scienceblogs.de/komplett-komplex/>

### Über die Faszination von Schwarzen Löchern

Eigentlich ist Annalie Musikerin. Ihr Vater aber ist Bernard Schutz, Direktor am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik in Golm. Und deshalb interviewt Annalie nun führende Astronomen und fragt auf eine erfrischend natürliche Art, was diese an Schwarzen Löchern eigentlich so fasziniert. Entstanden sind 15 Filme, die durch einen flotten Trailer eingeleitet werden und sich an ein jüngeres Publikum wenden. Weitere zehn Videos zu Gravitationswellen sollen folgen: <http://www.scienceface.org/>

# Der Staat in der Steuerfalle

Das Thema sorgt immer wieder für Aufregung: International agierende Konzerne schleusen Gewinne, die sie mithilfe der inländischen Infrastruktur erwirtschaftet haben, über Zinszahlungen am deutschen Fiskus vorbei ins Ausland. Das zu verhindern ist aber nicht nur in rechtlicher Hinsicht problematisch. Auch aus ökonomischer Sicht kann der unüberlegte Steuerzugriff auf Zinsen dem Staat mehr schaden als nutzen.

TEXT **CHRISTIAN MARQUART**

**M**öglichkeiten, legal Steuern zu vermeiden, finden sich für Unternehmen im deutschen Steuerrecht zuhauf. Als Beispiel in der öffentlichen Diskussion dient gerne das deutsche Tochterunternehmen eines großen schwedischen Möbelhändlers. Dieses erwirtschaftete im Jahr 2003 vor Lizenzgebühren und Schuldzinsen zwar einen Gewinn von mehr als 300 Millionen Euro. Dennoch hat die Tochter in Deutschland nur 50 Millionen Euro an Steuern ge-

faktoren prinzipiell auf zwei Arten gedeckt werden kann: entweder durch Eigen- oder Fremdkapital. Eigenkapital akquiriert ein Unternehmen, indem es etwa Unternehmensbeteiligungen in Form von Aktien ausgibt. Ein Kapitalgeber, der die Aktien erwirbt, stellt die Mittel auf unbestimmte Zeit zur Verfügung und nimmt damit auch an den Chancen und Risiken des Betriebs teil: In guten Zeiten macht er Gewinn, in schlechten Verlust.

Bei Fremdkapital handelt es sich hingegen im einfachsten Fall um gewöhnliche Kredite – Mittel also, auf die das Unternehmen auch in Verlustjahren Zinsen entrichten und die es innerhalb eines vertraglich festgelegten Zeitraums zurückzahlen muss. Erst wenn das Eigenkapital aufgezehrt ist, muss auch das Fremdkapital die Verluste tragen. Dann muss ein Gläubiger einen Kredit eventuell stunden oder im Falle der Insolvenz sogar auf einen Teil der Rückzahlung, im schlimmsten Fall sogar auf die gesamte Tilgung, verzichten.

In der Regel macht das nationale Recht den Unternehmenseignern kaum Vorgaben, auf welche Weise sie ihr Unternehmen mit Finanzmitteln ausstatten. Solange Unternehmen keine rechtlichen Anforderungen berücksichtigen müssen, gehen sie nach betriebswirtschaftlichen Kriterien vor.

Einer dieser Faktoren, dem insbesondere in einem multinationalen Konzern entscheidende Bedeutung zukommt, ist die unterschiedliche steuerliche Belas-

---

## Die Steuerlast sinkt, und der Fiskus hat das Nachsehen

zahlt. Dem Unternehmen ist es gelungen, einen Großteil des Gewinns ins Ausland zu transferieren, wo dieser einer deutlich niedrigeren Besteuerung unterliegt. Damit senkte der Konzern seine Steuerlast drastisch, und zwar zulasten des deutschen Fiskus. Es verwundert nicht, dass die Politik solche legalen „Steuertricks“ verhindern möchte.

Steuern können Unternehmen nicht zuletzt deshalb sparen, weil der Kapitalbedarf für Rohstoffe, Maschinen, Gebäude, Löhne und andere Produktions-





tung von Eigen- und Fremdkapital in verschiedenen Ländern. Nimmt eine in Deutschland ansässige Kapitalgesellschaft Eigenkapital auf, muss sie die Rendite, die sie mit dem Kapital erzielt, voll versteuern. Zwar muss auch der Kapitalgeber auf die Erträge im Regelfall noch Steuern zahlen, wenn der Gewinn ausgeschüttet wird. Den größten Teil der steuerlichen Last trägt jedoch das Unternehmen.

Ganz anders sieht es aus, wenn das Unternehmen seinen Finanzbedarf über Fremdkapital wie etwa Kredite deckt. In diesem Fall zahlt das Unternehmen nur

ländische Konzerneinheit dafür deutlich niedrigere Steuern zahlen. Für den Staat ist das Problem deshalb so gravierend, weil er auf die Gewinne, die ein Unternehmen ins Ausland schafft, überhaupt nicht mehr zugreifen kann. Damit ist der entsprechende Teil der Steuerbasis für den Fiskus vollständig verloren.

Natürlich ist es legitim, wenn ein Hochsteuerland wie Deutschland verhindern will, dass ein Unternehmen Zinsen im Inland steuerlich geltend macht und seine Reingewinne ins Ausland transferiert. Schließlich stellt der Staat die Infrastruktur für ein Unternehmen und schafft damit eine wesentliche Voraussetzung für dessen wirtschaftlichen Erfolg. Verringert sich die Steuerbasis, hat der Staat keinerlei Anreiz und darüber hinaus auch nicht die Mittel, die Infrastruktur aufrechtzuerhalten oder sogar noch weiter auszubauen.

Wie kann der Staat aber sinnvoll verhindern, dass Unternehmen ihre Gewinne in Form von Zinszahlungen ins Ausland verlagern? Zunächst könnte man daran denken, Eigen- und Fremdkapital künftig gleich zu behandeln. Dann könnten Unternehmen Zinsen genau wie Eigenkapitalvergütungen nicht mehr vom Gewinn abziehen, den sie versteuern müssen. Das stellt allerdings einen tiefen Einschnitt in die geltende Steuersystematik dar. Wichtiger noch: Solange ein solches Vorgehen international nicht abgestimmt wird, steht zu befürchten, dass ein Alleingang Deutschlands zu massiven Standortnachteilen führt, weil im Inland ansässige Unternehmen deutlich höhere Kosten tragen müssten. Eine derartige Reform stellt zumindest im Moment keine sinnvolle Alternative dar.

Ein weiterer Ansatz wäre eine Quellensteuer, die greift, wenn die Zinsen ins Ausland abfließen. In diesem Fall muss zwar das Unternehmen die Steuern abführen, eigentlich schuldet aber der ausländische Zinsempfänger dem Fiskus die Steuern. Das würde genauso funktionieren wie die Abgeltungssteuer, welche die Banken für ihre Anleger an den Fiskus abführen. Diesen Weg hat sich der deutsche Gesetzgeber allerdings durch Doppelbesteuerungsabkommen und eine Europäische Richtlinie aus dem Jahr 2003 selbst aus der Hand genommen.

Damit bleibt letztlich nur eine Option: In Fällen, die der Staat als missbräuchlich empfindet, muss er die Möglichkeit des Zinsabzugs einschränken. Die exzessive Fremdfinanzierung verliert so an Attrakti-

---

## Deutsche Konzerneinheiten profitieren davon, viel Gewinn ins Ausland zu überweisen

auf jenen Teil der Rendite Steuern, den es nicht als Zins an den Gläubiger abführen muss. Aus einem einfachen Grund: Die Zinszahlungen schmälern die steuerliche Bemessungsgrundlage, also das Einkommen, anhand dessen die Steuerschuld ermittelt wird. Dafür muss aber der Kapitalgeber die vereinnahmten Zinsen voll versteuern.

Auch wenn der Staat Eigen- und Fremdfinanzierung steuerlich unterschiedlich behandelt, nimmt er in derselben Größenordnung Steuern ein, solange er die Eigen- und Fremdfinanzierung unterm Strich gleich hoch belastet. Von Land zu Land unterscheiden sich die Abgaben für die beiden Finanzierungsformen jedoch. Genau aus diesem Grund ergibt sich für multinationale Konzerne die Möglichkeit, Steuern zu sparen. So kann es etwa steuerlich vorteilhaft sein, wenn eine in einem Niedrigsteuerland ansässige Konzernmutter ihr Eigenkapital als Kredit an ihre höher besteuerte Tochtergesellschaft gibt.

Das Problem für den Fiskus liegt auf der Hand: Nimmt eine Tochtergesellschaft exzessiv Fremdkapital im Ausland auf, schmilzt die inländische Steuerbasis, also der zu versteuernde Gewinn. Deutschland zählt traditionell zu den Hochsteuerländern, sodass es sich für die deutschen Konzerneinheiten lohnt, einen möglichst großen Teil des Gewinns über Kreditzinsen ins Ausland zu überweisen. Im Idealfall muss die aus-





vität. Doch einen Mechanismus zu entwickeln, mit dem sich der Steuerabzug von Zinsen sinnvoll beschränken lässt, ist schwieriger, als man gemeinhin vermuten würde. Das liegt vor allem an den Rahmenbedingungen, die der Gesetzgeber berücksichtigen muss.

So gibt es in der betriebswirtschaftlichen Forschung keine allgemeingültigen Erkenntnisse zum idealen Verhältnis von Eigen- zu Fremdkapital. Vielmehr wird darauf hingewiesen, dass Unternehmen in einer Einzelfallentscheidung verschiedene Faktoren berücksichtigen müssen, wenn sie über die Art ihrer Finanzierung entscheiden. Dabei sind steuerliche Kriterien fast nie allein ausschlaggebend. So kann die Finanzierung eines Unternehmens durch eine Kapitalerhöhung (etwa durch die Ausgabe neuer Aktien) deshalb ausgeschlossen sein, weil ein entsprechender Beschluss keine Mehrheit bei den bisherigen Aktionären findet. In diesem Fall bleibt lediglich die Möglichkeit der Kreditfinanzierung.

Eindeutig und gleichzeitig praktikabel festzustellen, wann ein Unternehmen seine Finanzierung nur nach steuerlichen Kriterien gestaltet, ist also schon unter diesem Gesichtspunkt kaum möglich. Zudem können die ohnehin schon überlasteten Finanzämter kaum in jedem Einzelfall die Finanzierungsbeziehungen eines Unternehmens prüfen. Will der Gesetzgeber auf die ins Ausland gezahlten Zinsen zugreifen, muss er letztlich eine pauschalierende Regelung finden, mit der sich der exzessive Zinsabzug im Zusammenhang mit grenzüberschreitenden Kreditgeschäften unterbinden lässt.

Allerdings erfordern die europäischen Grundfreiheiten, namentlich die Niederlassungsfreiheit und die Kapitalverkehrsfreiheit, dass inländische und grenzüberschreitende Zinszahlungen gleich behandelt werden. Ein Unternehmen muss diese also in gleicher Höhe steuerlich geltend machen können – egal ob sie im In- oder ins Ausland gezahlt werden. Eine Ausnahme von diesem strengen Diskriminierungsverbot macht der Europäische Gerichtshof bisher nur dann, wenn die Verwaltung anhand sämtlicher relevanter Umstände des Einzelfalls nachweist, dass hinter einer bestimmten Finanzierungsbeziehung ausschließlich steuerliche Motive stecken. Ein Unterfangen, das jedoch sowohl in der Theorie als auch in der Praxis aus den genannten Gründen nahezu unmöglich erscheint.

Der Gesetzgeber ist damit faktisch gezwungen, den Zinsabzug auch bei rein inländischen Finanzierungen zu begrenzen, wenn die entsprechenden Voraussetzungen vorliegen. Mit der Sanktionierung von Unternehmen, die nur im Inland tätig sind und dort auch ihre Kredite aufgenommen haben, schießt der Gesetzgeber allerdings notgedrungen weit über sein eigentliches Ziel hinaus. Denn in reinen Inlandsfällen besteht überhaupt nicht die Gefahr, dass ein Unternehmen Besteuerungssubstrat ins Ausland verlagert. Trotzdem wird die Kreditaufnahme in diesen Fällen beeinträchtigt, sodass für Unternehmen möglicherweise auch ökonomisch sinnvolle Kredite – etwa im Zusammenhang mit Sanierungen – nicht in Betracht kommen. Dem betroffenen Unternehmen bleibt damit im schlimmsten Fall nur der Weg in die Insolvenz.

Eine solche Situation ist nicht nur aus ökonomischer Sicht fatal, sie birgt in Deutschland auch verfassungsrechtliches Konfliktpotenzial. Aus der Perspektive des Verfassungsrechts ist es alles andere als unproblematisch, wenn Unternehmen ihre Zinsaufwendungen nur noch unter bestimmten Voraussetzungen abziehen können. Denn nach der geltenden Steuersystematik sind Zinsaufwendungen prinzipiell steuermindernd zu berücksichtigen. An diese Grund-

---

## Für das ideale Verhältnis zwischen Eigen- und Fremdkapital gibt es kein allgemeingültiges Rezept

entscheidung ist der Gesetzgeber gebunden, Abweichungen hiervon stehen nicht in seinem Belieben, sondern bedürfen einer besonderen Rechtfertigung.

Zwar agiert das Bundesverfassungsgericht an dieser Stelle weniger streng als der Europäische Gerichtshof und lässt auch pauschalierende Regelungen zu. Dennoch muss der Gesetzgeber darlegen können, dass sein Modell, nach dem er den Zinsabzug beschränkt, in den meisten Fällen solche Finanzierungen trifft, die steuerlich motiviert sind. Dieser Nachweis wird dem Gesetzgeber jedoch vor allem in Inlandsfällen kaum gelingen: Steuerliche Aspekte





spielen hier allenfalls eine untergeordnete Rolle, da die unterschiedlichen Finanzierungsformen im Regelfall steuerlich annähernd gleich belastet werden. Damit droht einer derartigen Regelung das Verdikt der Verfassungswidrigkeit – vor allem dann, wenn der unbeschränkte Zinsabzug faktisch zur Ausnahme wird.

Will der Fiskus den Zinsabzug beschränken, hat er die Wahl zwischen Scylla und Charybdis. Trotzdem ist der deutsche Gesetzgeber hiervor nicht zurückge-

dann in größerem Umfang Kreditzinsen geltend machen können. Diese Regelung belastet jedoch inländische Unternehmen ausgerechnet dann zusätzlich, wenn der Jahresrohgewinn in Krisenzeiten einbricht. Daher wurde jüngst ein Mechanismus eingeführt, der eine Glättung des Jahresrohgewinns über mehrere Jahre ermöglicht.

Trotz ihrer hohen Komplexität ist die Zinsschranke nicht geeignet, steuerlich motivierte Finanzierungen auch nur annähernd zu identifizieren. So gibt das Verhältnis von Jahresrohgewinn und Zinsaufwendungen keinen Aufschluss darüber, ob und inwieweit hinter den Kreditgeschäften des Unternehmens steuerliche Überlegungen stecken. Insbesondere können hochprofitable Konzerne ihre Unternehmen mit entsprechend viel Fremdkapital ausstatten, während ertragschwache Unternehmen unter Umständen steuerlich sanktioniert werden, obwohl sie adäquat eigenfinanziert sind. Der grundsätzlich überzeugende Vergleich der Eigenkapitalquote scheidet in der Praxis schon daran, dass ein inländisches Unternehmen die Finanzierungsstruktur seines gesamten, oft über die ganze Welt verzweigten Konzerns nicht so lückenlos nachweisen kann, wie es die Finanzverwaltung fordert.

Angesichts dieses unbefriedigenden Ergebnisses stellt sich die Frage, ob andere Jurisdiktionen möglicherweise überzeugendere Lösungen für die Problematik gefunden haben. Manche Staaten (wie auch Deutschland vor Einführung der Zinsschranke) setzen beim Verhältnis von Eigen- zu Fremdkapital eines Unternehmens an, um den Zinsabzug zu regeln. Sie gehen also davon aus, dass es ein allgemein übliches Verhältnis von Eigen- zu Fremdkapital gibt. In einem anderen Konzept werden die Vermögensgegenstände eines Unternehmens herangezogen: Je höher der kumulierte Wert der Vermögensgegenstände, desto höher der mögliche Zinsabzug.

Auch diese Ansätze liefern in der Praxis aber willkürliche Ergebnisse. Ein richtiges Verhältnis von Fremd- zu Eigenkapital gibt es nicht – die durchschnittlichen Eigenkapitalquoten variieren teils stark von Branche zu Branche; und sogar innerhalb der Branchen können sich Unterschiede ergeben. Ebenso wenig lässt sich anhand des Werts der Vermögensgüter völlig eindeutig feststellen, ob ein Unternehmen vorrangig aus steuerlichen oder doch aus anderen Gründen fremdfinanziert wurde.

---

## Das neue Instrument der Zinsschranke belastet inländische Unternehmen ausgerechnet in Krisenzeiten

schreckt und hat zum Schutz des Steuersubstrats mit der Unternehmenssteuerreform 2008 die sogenannte Zinsschranke eingeführt. Diese stellt eine deutliche Verschärfung gegenüber der Vorgängerregelung dar, insbesondere weil sie den Zinsabzug auch bei normalen Bankdarlehen begrenzt.

Die Zinsschranke richtet sich nach dem Jahresrohgewinn, also dem Gewinn vor Abzug von Steuern, Zinsen und Abschreibungen auf die Vermögensgegenstände des Unternehmens. Je höher der Jahresrohgewinn, desto mehr Zinsen darf ein Unternehmen von seiner steuerlichen Bemessungsgrundlage abziehen. Der Zinsabzug steht vollständig offen, soweit den Zinsaufwendungen entsprechende Zinserträge gegenüberstehen. Damit werden besonders Banken von der Abzugsbeschränkung ausgenommen, deren Kreditaufnahme und -weitergabe nicht beeinträchtigt werden soll. In voller Höhe ist der Zinsabzug zudem möglich, wenn er ein bestimmtes Volumen nicht übersteigt, das Unternehmen nicht zu einem Konzern gehört oder wenn die inländischen Konzernunternehmen proportional nicht höher kreditfinanziert sind als der Konzern insgesamt.

Mit der Zinsschranke möchte der Gesetzgeber vor allem erreichen, dass internationale Konzerne ihre Finanzierungslasten fair über den Konzern hinweg verteilen und Zinsen nicht nur in Deutschland geltend machen. Zudem wird für Konzerne ein Anreiz geschaffen, Gewinne ins Inland zu verlagern, da sie

Alle bisher in der Praxis verwirklichten Ansätze sind im Ergebnis ungeeignet, steuerlich motivierte Finanzierung auch nur annähernd zu identifizieren. Dieses Defizit lässt sich auch dann nicht wirklich beseitigen, wenn man die verschiedenen Herangehensweisen miteinander kombiniert. Die unternehmerische Finanzierungsentscheidung ist schlicht zu facettenreich, als dass eine in der Praxis handhabbare Vorschrift diese überzeugend abbilden könnte.

Schränkt also der Gesetzgeber den Zinsabzug für Unternehmen in pauschalierender Art und Weise ein, so wird er damit immer auch eine beträchtliche Zahl von Unternehmen treffen, die sich nicht oder nicht in erster Linie aus steuerlichen Gründen durch Fremdkapital fremdfinanzieren. Somit verhält sich der Steuergesetzgeber notgedrungen wie ein Elefant im Porzellanladen, wenn er sein berechtigtes Interesse wahrnehmen will, im Inland erwirtschaftete Erträge zu besteuern.

Vor diesem Hintergrund muss sich der Gesetzgeber umso deutlicher bewusst sein, dass er eine wirtschaftspolitische Entscheidung trifft, wenn er den Zinsabzug beschränkt. Es geht nicht nur darum, Steuereinnahmen zu sichern, sondern auch um die Standortattraktivität Deutschlands. So gelingt es Unternehmen zwar, durch eine gezielte Gestaltung ihrer Finanzierung Gewinne am deutschen Fiskus vorbeizuschleusen; die



#### DER AUTOR

**Christian Marquart**, Jahrgang 1983, arbeitet seit Anfang 2009 am Max-Planck-Institut für Geistiges Eigentum, Wettbewerbs- und Steuerrecht in München. Im Rahmen seiner Promotion bei Direktor Wolfgang Schön, Vizepräsident der Max-Planck-Gesellschaft, beschäftigt er sich mit der Problematik der Gewinnverlagerung durch die gezielte Gestaltung der Kapitalstruktur von Unternehmen.

mithin die volkswirtschaftlichen Kollateralschäden und umso größer ist auch die Gefahr, dass das Bundesverfassungsgericht eingreift.

Daher scheint es zum einen sinnvoll, dass der Gesetzgeber berücksichtigt, wie restriktiv andere Länder bei der Begrenzung des Zinsabzugs vorgehen. Die eigenen Regeln sollte er dann so gestalten, dass das Land als Standort im internationalen Vergleich möglichst wettbewerbsfähig bleibt. Zum anderen sollte er einen Ansatz wählen, der mit positiven Anreizen für den Standort Deutschland verbunden ist.

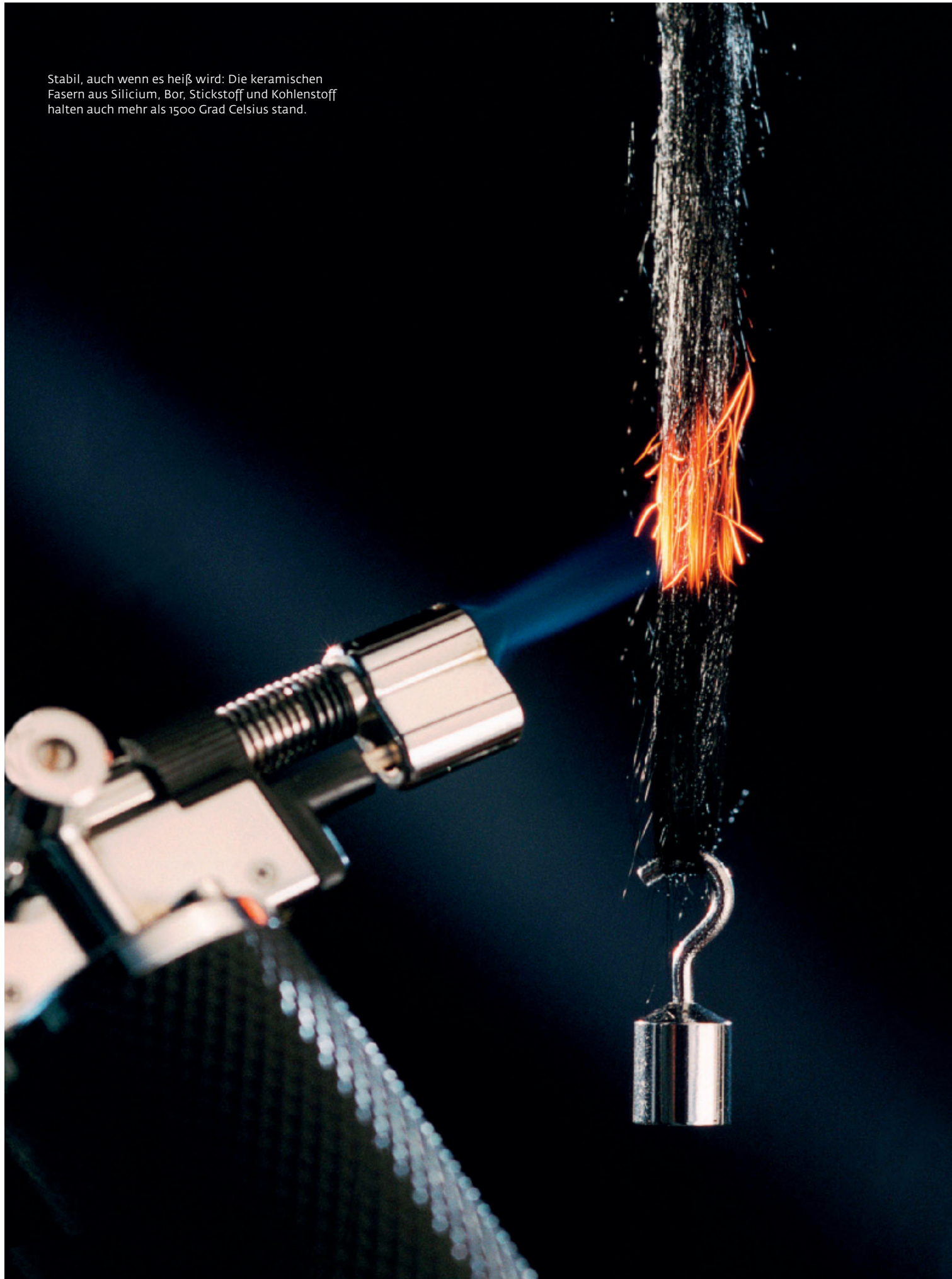
Berücksichtigt man alle erwähnten Faktoren, scheint es noch am sinnvollsten, die Abzugsfähigkeit von Zinsaufwand davon abhängig zu machen, ob das zugeflossene Fremdkapital in Produktivvermögen – also etwa Sachanlagen, Vorräte, Grund und Boden – investiert wird. Neben den zu erwartenden steuerpflichtigen Erträgen aus der Investition gibt es in diesem Fall wohl zusätzlich positive Effekte für den Arbeitsmarkt. Es ist zudem nicht unwahrscheinlich, dass die stringente Umsetzung einer solchen Regelung auch vor dem Bundesverfassungsgericht bestehen kann. Vor diesem Hintergrund wäre es zu wünschen, dass der deutsche Gesetzgeber sein aktuelles Konzept zur Beschränkung des Zinsabzugs noch einmal überdenkt. ◀

## Es geht nicht nur darum, Einnahmen zu sichern, sondern auch um den Standort Deutschland

niedrigere effektive Steuerbelastung für Unternehmen kann sich aber günstig auf den Standort Deutschland auswirken. Schließlich setzt die Möglichkeit, Steuern zu sparen, einen Anreiz, hier zu investieren.

Wie attraktiv ein Land als Standort ist, hängt nicht nur von den Nominalsteuersätzen ab, sondern auch davon, wie hoch Investitionen insgesamt besteuert werden. Diese effektive Steuerlast erhöht sich, wenn Zinsen nicht mehr länger als Betriebskosten vom Gewinn abgezogen werden dürfen. Je rücksichtsloser der Gesetzgeber den Zinsabzug zur Sicherung der Steuerbasis einschränkt, umso größer sind

Stabil, auch wenn es heiß wird: Die keramischen Fasern aus Silicium, Bor, Stickstoff und Kohlenstoff halten auch mehr als 1500 Grad Celsius stand.





# Ein Stoff, den Hitze kaltlässt

Eine Menge Energie ließe sich sparen, wenn Turbinen und Verbrennungsmotoren bei höheren Temperaturen als bislang arbeiteten. Keramische Hochtemperaturwerkstoffe machen das möglich. **Martin Jansen**, Direktor am **Max-Planck-Institut für Festkörperforschung** in Stuttgart, forscht seit 20 Jahren an einem solchen neuen Werkstoff. Inzwischen ist dieser reif für den Markt.

TEXT **ROLAND WENGENMAYR**

**W**er mit Martin Jansen über Hochtemperaturwerkstoffe spricht, sortiert unsere Welt schnell auf einer imaginären Temperaturskala ein. Dort leben wir ganz unten, auf einer kleinen, kühlen Insel, die feste Materie erlaubt. Oberhalb von rund 4000 Grad Celsius schmelzen oder zersetzen sich alle uns bekannten Feststoffe. Im kosmischen Maßstab gesehen ist das nicht besonders heiß, denn schon im Zentrum unserer Sonne herrschen 15 Millionen Grad Celsius.

Jansen zeigt ein Diagramm, das sich als eine Art Schatzkarte für die Suche nach Hochtemperaturwerkstoffen lesen lässt. Ganz oben auf der heißen Hitliste steht mit knapp 4000 Grad Celsius Zersetzungstemperatur eine Verbindung aus Tantal, Zirkonium und Kohlenstoff. Auf Platz zwei bei rund 3800 Grad folgt Kohlenstoff – allerdings nicht an Luft, weil er da mit Sauerstoff längst verbrannt wäre. „Die Reihenfolge dieser Stoffe ist seit fünfzig Jahren unverändert“, erklärt der Chemiker. Seitdem hat die Wissenschaft keinen

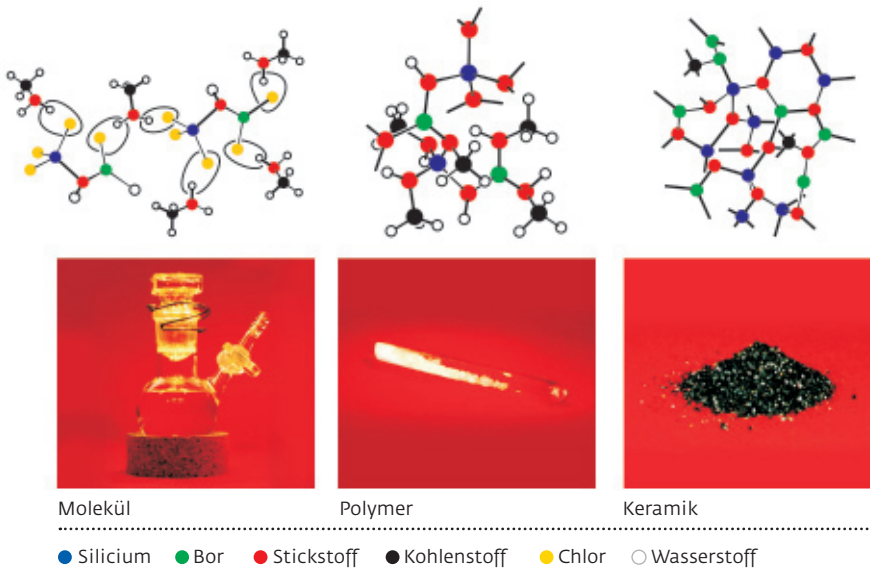
hitzbeständigeren Stoff gefunden. Offenbar können auch die stärksten chemischen Bindungskräfte Atome nur bis etwa 4000 Grad Celsius zu fester Materie zusammenhalten.

## HITZEBESTÄNDIGES MATERIAL HILFT BEIM ENERGIESPAREN

Jansens Forschungsgebiet liegt allerdings zwischen 1000 und 2000 Grad Celsius. Sein Stuttgarter Team und seine Kooperationspartner entwickeln neue Hochtemperaturwerkstoffe, die in Motoren und Turbinen einsetzbar sind. Dafür eignen sich die Gewinner auf der thermischen Hitliste leider nicht, denn Werkstoffe für solche Maschinen müssen nicht allein hohen Temperaturen in Gegenwart von Sauerstoff widerstehen. Sie müssen auch starke mechanische Belastungen verkraften. In den großen Dampfturbinen zum Beispiel, die in Kraftwerken elektrische Energie produzieren, rotieren die äußeren Spitzen der längsten Turbinenschaufeln mit Überschallgeschwindigkeit – weshalb enorme Fliehkräfte an ihnen zerren.

Noch am besten haben bisher metallische Werkstoffe ein solches Anforderungsspektrum erfüllt. Doch selbst die thermisch stabilsten Legierungen „zünden“ in Luft und erweichen oberhalb von 1000 Grad Celsius. Zwar arbeiten moderne Flugzeugturbinen oder Kraftwerks-Gasturbinen mit Verbrennungstemperaturen bis zu 1400 Grad Celsius. Dabei muss aber ein kühlender Luftstrom die Metallteile vor dem heißen Gas schützen. Das kostet Energie und senkt die Effizienz der Turbinen.

Die Effizienz oder den Wirkungsgrad, wie es wissenschaftlich präzise heißt, will Jansen bei Wärmekraftmaschinen steigern. Zu ihnen gehören neben Turbinen alle Verbrennungsmotoren. Nach den Gesetzen der Physik steigt ihr Wirkungsgrad mit der Betriebstemperatur. Das gilt für den Antrieb eines Verkehrsmittels genauso wie für den Turbinengenerator eines Kraftwerks. Ein hoher Wirkungsgrad spart wertvollen fossilen Treibstoff und reduziert den Ausstoß von klimaschädlichem Kohlendioxid. Ungekühlte Brennkammern verringern zudem den Ausstoß von schädlichen Stickoxiden. >



Eine Route zu einem stabilen Netz: Aus den molekularen Bausteinen (links) entsteht in einem der möglichen Synthesewege zunächst ein stark verzweigtes Polymer (Mitte). Daraus entsteht beim Brennen die Hochtemperaturkeramik (rechts). Silicium-, Bor-, Stickstoff-, Kohlenstoff-, Chlor- und Wasserstoffatome sind jeweils durch blaue, grüne, rote, schwarze, gelbe und offene Kreise dargestellt.

Wärme­kraft­ma­schinen treiben unsere Kultur buch­stäblich an. Angesichts ihrer Relevanz wird klar, wieso Martin Jansen hart­näckig seit über zwanzig Jahren an neuen Hochtemperaturwerkstoffen arbeitet. Natürlich ist es nur eines seiner Forschungsgebiete, doch es liegt ihm sichtlich am Herzen. Die Antwort auf die Frage, welche Werkstoffe die bisher dominierenden Metalle adäquat ersetzen könnten, war dem anorganischen Chemiker schon in den 1980er-Jahren klar: Nur Keramiken konnten eine Lösung bieten.

Mit alltäglichem Porzellan hat der keramische Hightech-Werkstoff, den die Stuttgarter Chemiker seitdem entwickelten, allerdings nichts zu tun. Die Frage, was denn mit der Kaffeetasse auf Jansens Bürotisch bei über tausend Grad passieren würde, lässt ihn schmunzeln. „Porzellan ist schon ein ziemlich hochtemperaturfestes Material“, erklärt er geduldig, „aber die Tasse würde schon bei relativ niedrigen Temperaturen unter mechanischer Beanspruchung ‚fließen‘.“ Dieses honigzähe Kriechen bei hohen Temperaturen ist der Schwachpunkt oxidischer Keramiken. Schon deshalb schieden Porzellan und Co. aus.

Schlimmer noch ist eine andere Eigenschaft: Fiele die Tasse auf den Boden, dann würde sie zersplittern – ein Metallgefäß nicht. Keramiken sind

hart, aber sehr spröde. Metalle dagegen sind zäh und elastisch. Notfalls geben sie durch leichtes Fließen nach. Sie altern auf gut bekannte Weise, was für Ingenieure entscheidend ist. Deshalb kann zum Beispiel ein Flugzeugturbinenhersteller angeben, nach welcher Betriebsdauer ein Teil ausgetauscht werden muss. „So eine herkömmliche Keramik kann dagegen nach einer Stunde versagen“, erläutert Jansen, „oder erst nach hunderttausend Stunden.“

### UNGEORDNETES NETZWERK MACHT KERAMIK ZÄH

Die Ursache der Sprödigkeit liegt in der Mikrostruktur herkömmlicher Keramiken: Sie bestehen aus winzigen, zusammengebackenen Kristallen. In so einem Kristallit sortieren sich die Atome schön ordentlich zu einem dreidimensionalen Raumgitter. Allerdings wirken seine Ebenen, in denen sich die Atome wie in Stockwerken stapeln, wie Sollbruchstellen. Unter Überlast reißen sie wie die Naht eines Stoffs auf. Erreicht der Riss schließlich den Nachbarkristall, frisst er sich dort schnell weiter. „Er breitet sich mit Schallgeschwindigkeit aus“, erklärt Jansen das schlagartige Versagen von Keramiken.

Metallische Werkstoffe bestehen zwar auch aus kleinen Kristalliten. Doch die chemischen Bindungen zwischen

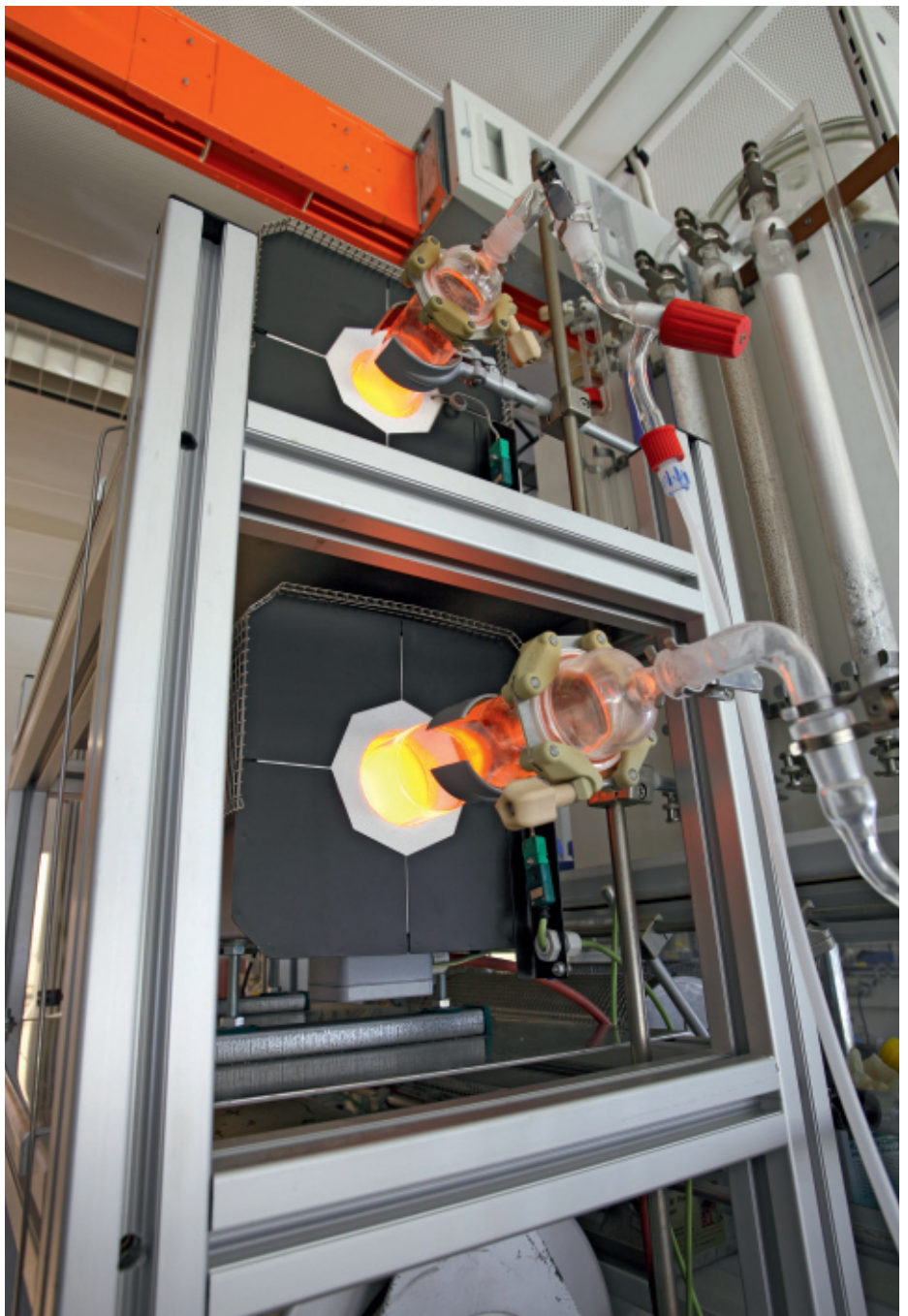
den Metallatomen verhalten sich eher wie ein zäher, starker Leim. So können die Kristallebenen unter Stress aneinandergleiten ohne auseinanderzureißen. Dieses duktile Verhalten lässt sich aber nicht auf Keramiken übertragen, weil dort eine andere Art von chemischer Bindung die Atome zusammenkittet.

Also musste Martin Jansen sich ein neues Konzept ausdenken. Er schrieb es bereits 1989 auf, als er noch Professor an der Universität Bonn war. Ein Schlüssel zum neuen Werkstoff war die radikale Abschaffung der kleinen Kristalle. Stattdessen wollte der Chemiker eine amorphe Keramik entwickeln. Bei amorphen Materialien, etwa Gläsern, bilden die Atome ein ziemlich ungeordnetes räumliches Netzwerk. Wo keine Gitterebene existiert, gibt es auch keine derartige Sollbruchstelle, dachte sich Jansen. Er durfte hoffen, dass eine solche Keramik nicht plötzlich in einem Spröbruch versagen würde – wie Materialwissenschaftler sich ausdrücken –, sondern schlagzäh wäre.

Allerdings sortieren Atome sich beim Abkühlen aus der Schmelze gerne zu ordentlichen Kristallen. In dieser höchsten Ordnungsstufe sparen sie nämlich die meiste Energie ein. Nur wenn beim Abkühlen etwas ihre Choreografie massiv stört, bleiben sie in einem amorphen Netzwerk stecken. Der erfahrene Chemiker Jansen wählte schließlich eine Ver-

oben: In diesen Öfen treiben die Stuttgarter Chemiker bei rund 600 Grad Celsius organische Substanzen aus dem Polymer, sodass sich die Keramik bildet.

unten: Einfach, preiswert und umweltschonend: Aus den Grundchemikalien Siliciumtetrachlorid ( $\text{SiCl}_4$ ), Methylamin ( $\text{NH}_2\text{CH}_3$ ) und Bortrichlorid ( $\text{BCl}_3$ ) wird in zwei Reaktionen und durch anschließendes Erhitzen die Hochtemperaturkeramik hergestellt.

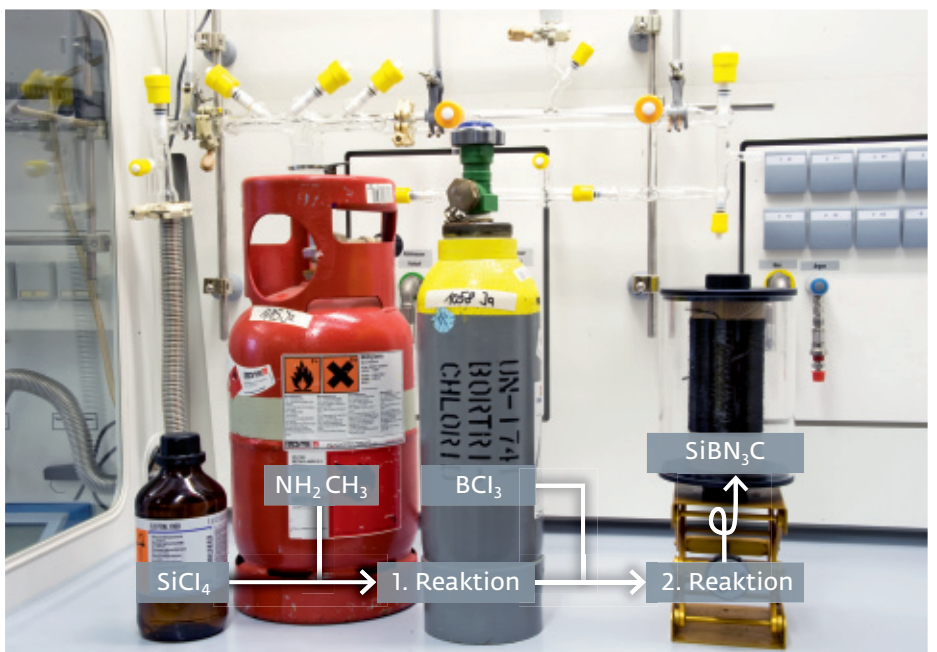


bindung aus den Elementen Silicium, Bor und Stickstoff. Eine Mischung im Verhältnis 3:3:7 stört den kristallinen Sortiervorgang wie gewünscht.

Die Siliciumatome (Si) wollen ihre Nachbaratome an vier Bindungen, also chemischen „Händen“, festhalten – Bor (B) und Stickstoff (N) spielen dagegen dreihändig. Die krummzähligen Verhältnisse stellen das atomare Ballett vor die unlösbare Aufgabe, mit jeder chemischen Hand eine Partnerhand zu erwischen und zugleich in eine kristalline Ordnung hineinzutanzen. Am Schluss hat zwar nahezu jede Hand eine andere erwischt, aber das atomare Ballett endet unordentlich verknötet im gewünschten Netzwerk. „Die Atome sind nicht intelligent genug, um das Problem zu lösen“, kommentiert Jansen.

## VIELE BINDUNGEN STÄRKEN DIE ATOMAREN KETTENGLIEDER

Zwei weitere Ideen stecken in der Auswahl der chemischen Bindung: Jedes Atom im neuen  $\text{Si}_3\text{B}_3\text{N}_7$  ist über drei – beim Silicium sogar vier – kovalente Bindungen an seine Nachbarn gekettet. Das sorgt dafür, dass die Energie, die das Netzwerk zusammenhält, vor allem in den Bindungen zwischen direkten Nachbaratomen steckt, was jedes Atom zu einem starken Kettenglied macht. Wegen der vielen Bindungen kann ein







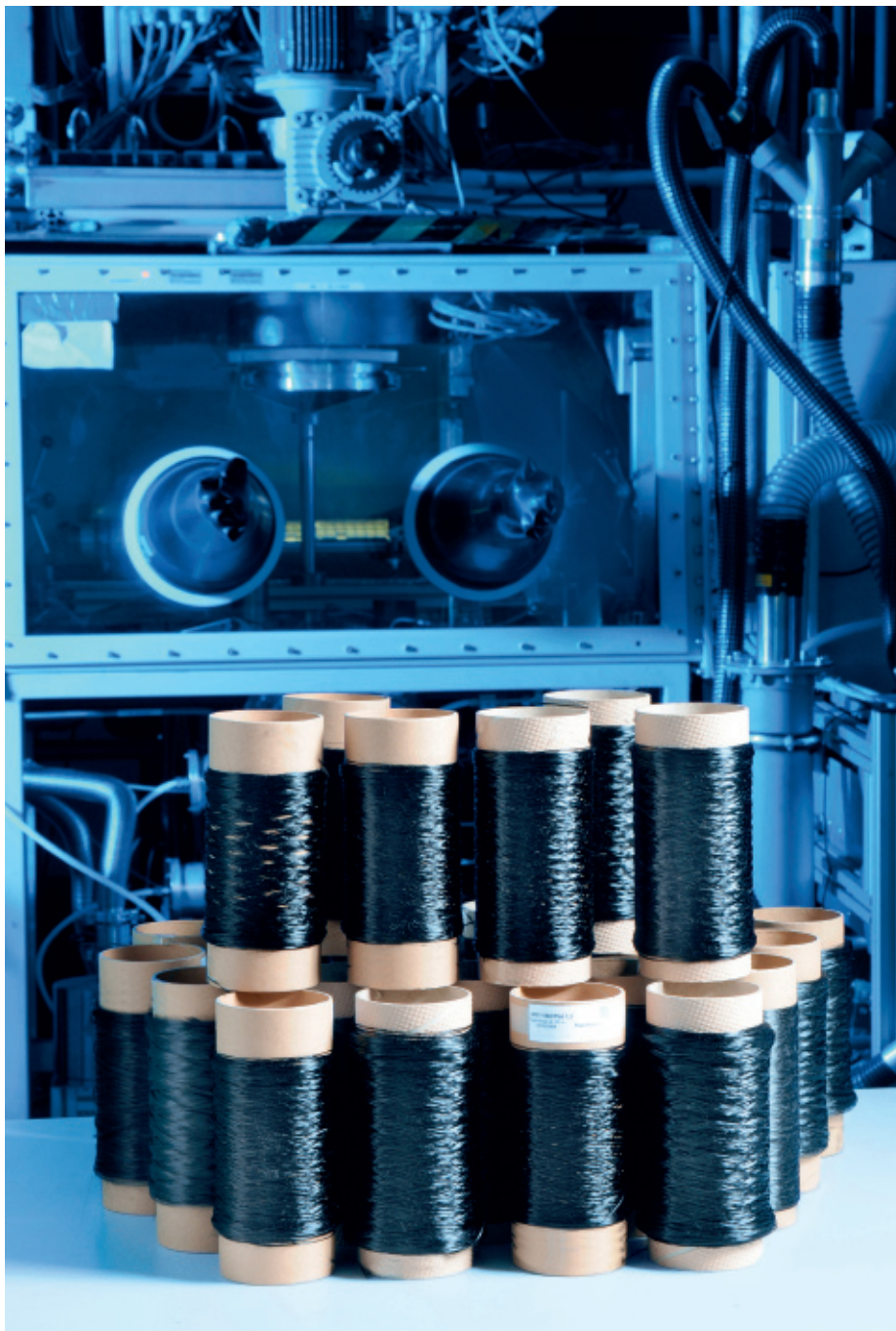
Atom, so die zweite Idee, zudem kaum aus seiner Lage heraus. Dazu müsste es mindestens zwei seiner Bindungen zu Nachbarn gleichzeitig brechen, was sehr unwahrscheinlich ist.

#### **NACHHALTIGE SYNTHESE AUS ALLERWELTSCHEMIKALIEN**

Das macht das neue Material widerstandsfähig gegen hohe Temperaturen, obwohl es amorph ist. Amorphe Stoffe gelten nämlich als thermisch instabil, weshalb Jansen bei den Werkstoffwissenschaftlern Überzeugungsarbeit leisten musste. Der Grund ist wieder die Energie. Stellt man sie sich als Berglandschaft vor, dann entsprechen Kristalle Felsen, die in die tiefsten Energietäler gerollt sind. Ein Felsen, der einer amorphen Struktur entspricht, bleibt hingegen beim Sturz ins Energietal unterwegs in einer Energiekuhle am Hang stecken. Rütteln nun steigende Temperaturen wie heftige Erdbeben an der Energielandschaft, dann springen diese Felsen gerne aus der prekären metastabilen Lage wieder heraus: Sie rollen weiter ins Energietal, und die amorphe Struktur ordnet sich zum Kristall um. Der Werkstoff ändert also radikal seine Eigenschaften, was eine Maschine zerstören würde. Beim Stuttgarter Konzept ist die lokale Energiekuhle jedoch so

oben: Mit einem neuen Konzept zu einem neuen Material: Martin Jansen hatte die Idee, besonders stabile Keramiken aus einem ungeordneten Netz von Atomen zu erzeugen.

unten: Keramik von der Rolle: Aus dem Material werden im Technikum am Fraunhofer ISC Fasern gesponnen, die viel hitzeresistenter sind als Kohlefasern. Aus ihnen lassen sich etwa Gewebe für Verbundwerkstoffe flechten.



» Als besonders hitzebeständig erwies sich eine Variante der Faser, die zusätzlich zu Silicium, Bor und Stickstoff noch Kohlenstoff im Netzwerk enthält. An Luft übersteht diese SiBNC-Faser Temperaturen bis zu 1500 Grad Celsius, ohne sich chemisch zu zersetzen.

tief, dass der Felsen drinbleibt, also der keramische Werkstoff sein amorphes Netzwerk beibehält.

Dieses Projekt zielte von Anfang an auf die industrielle Anwendung. „Deshalb wurde die Synthese des Vorläufermoleküls so konzipiert, dass sie ökologisch und ökonomisch nachhaltig ist“, sagt Jansen. Alle Zutaten sind günstige Alltagschemikalien. Als einziges Abfallprodukt entsteht Salzsäure, die sich als Chemikalie weiterverwenden lässt.

Die Herstellung der Keramik erforderte einen unkonventionellen Weg. Die in Frage kommenden festen Ausgangsverbindungen zersetzen sich nämlich vor dem Schmelzen, und nach dem Abkühlen bekäme man nicht das erwünschte amorphe Netzwerk. Daher muss das Netzwerk Schritt für Schritt aus molekularen Grundbausteinen aufgebaut werden. Im Zentrum dieser Moleküle sitzt ein Stickstoffatom, das je ein Silicium- und ein Boratom an sich bindet. Am Rand befinden sich Gruppen, die wie die Komponenten eines Superklebers wirken. Sie erlauben im zweiten Schritt, der „Polykondensation“, die molekularen Grundbausteine blitzschnell zusammenzufügen. „Das muss wie ein Sekundenkleber funktionieren“, sagt Jansen. Das so geformte polymere Netzwerk entspricht schon weitgehend der amorphen Struktur der Keramik. Allerdings sitzen zwischen den Bor-, Stickstoff- und Siliciumatomen noch die Kleberreste. Um sie auszutreiben, erhitzen die Chemiker im letzten Schritt das Polymer. Ab 600 Grad Celsius flüchten die organischen Substanzen als Pyrolysegas aus dem Netzwerk. Bei der Pyrolyse geht also als einzigem Schritt der Synthesesequenz Substanz verloren.

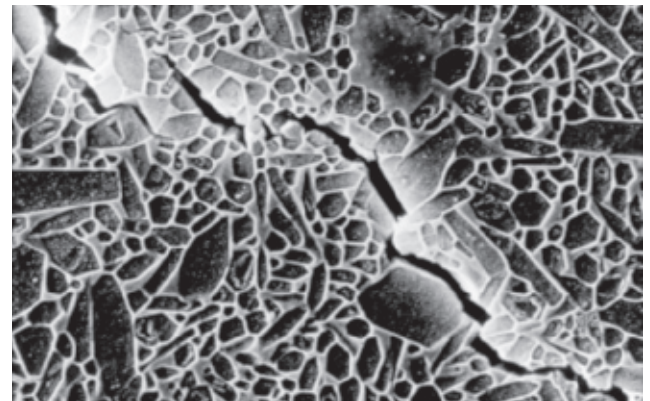
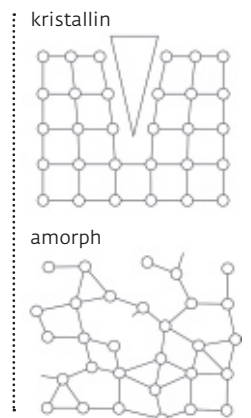
Jansen zeigt stolz eines der Ergebnisse aus 20 Jahren Forschung: Die pechschwarze Faser hat das Fraunhofer-Institut für Silicatforschung (ISC) in Würzburg als langjähriger Kooperationspartner aus der Stuttgarter Keramik hergestellt. Es verblüfft, dass dieses flauschige Material eine Keramik ist – und dass es Temperaturen jenseits von 1500 Grad Celsius aushält, ohne nennenswert an mechanischer Festigkeit zu verlieren. Die neue Keramik lässt sich vielfältig verarbeiten. Man kann sie etwa zu Pulver mahlen und dieses bei hohen Temperaturen zu Bauteilen sintern.

„Man kann damit auch Beschichtungen herstellen oder Infiltrationen vornehmen“, sagt Jansen, „und diese Fasern hier ziehen.“ Sie sind am weitesten entwickelt. Am ISC kann man bewundern, wie sie hergestellt werden: Die Würzburger haben dazu ein Technikum gebaut,

eine Zwischenstufe zwischen Labor und industrieller Produktion. Dort ziehen sie die zunächst farblosen Grünfasern aus dem Polymer und erhitzen sie dann in einem Ofen. Heute liefert die Anlage pro Durchgang bereits 50 Kilogramm Polymer. „Wir haben die Synthese immer weiter verfeinert, die Zutaten verändert und dadurch die Ausbeute und Reinheit der Keramik deutlich erhöht“, sagt Dieter Sporn, der frühere, langjährige Projektleiter am ISC.

Als besonders hitzebeständig erwies sich eine Variante der Faser, die zusätzlich zu Silicium, Bor und Stickstoff noch Kohlenstoff im Netzwerk enthält. An Luft übersteht diese SiBNC-Faser Temperaturen bis zu 1500 Grad Celsius, ohne sich chemisch zu zersetzen. „In Helium tritt sogar bis an die 2000 Grad kein Masseverlust ein“, erklärt Jansen. Damit ist die neue Faser einer

Kein Weg für Risse: In einer herkömmlichen Keramik fressen sich Risse schnell durch das atomare Kristallgitter (links oben) und springen dann zum Nachbarkristall über (rechts). Diese Sollbruchstellen fehlen in ungeordneten, amorphen Netzwerken (links unten).







bereits kommerziellen, teuren Keramikfaser aus Siliciumcarbid (SiC) deutlich überlegen. Sie reagiert zwar wie diese in Luft bei 1500 Grad Celsius mit Sauerstoff. Dabei bildet sie jedoch eine Doppelschicht aus, die sie vor dem aggressiven Sauerstoff schützt. „Die kommerzielle SiC-Faser hingegen korrodiert regelrecht durch“, so Jansen.

### MATERIAL FÜR BESCHICHTETE TURBINENSCHAUFELN

Die Wissenschaftler haben gezeigt, dass die keramische Faser den Anforderungen des Turbinenbaus genügt. Sie hält nicht nur höhere Temperaturen aus als jeder metallische Werkstoff, sondern bleibt dabei mechanisch stabil. „Ihre Festigkeit liegt im Vergleich zu anderen Werkstoffen zwar nur im Mittelfeld“, sagt Jansen, „aber sie behält diese auch bei gut 1400 Grad Celsius nahezu bei und ist damit unter diesen Bedingungen besser als alle anderen bekannten Werkstoffe.“ Eine Turbinenschaufel aus einem keramischen Kompositmaterial mit dieser Faser würde auch nur ein Drittel einer heutigen Schaufel aus hochlegiertem Stahl wiegen. Entsprechend geringer wären die Fliehkräfte. Zudem würden leichtere Flugzeugtriebwerke Kerosin einsparen.

oben: Wie groß ist der Hitzeschwund? In einem der beiden Tiegel auf dem weißen Träger befindet sich der Keramikvorläufer. Beide Tiegel werden mit dem Ofen darüber erhitzt. Eine Waage am Fuß der Apparatur misst den Masseverlust der Probe. Der Temperaturunterschied zwischen beiden Tiegeln verrät Details der chemischen Umwandlung.

unten: Das Röntgendiffraktometer bestimmt die kristalline Struktur eines Materials. Ist eine solche nicht zu erkennen, ist das gut: Dann ist die Keramik amorph.





» Die Wissenschaftler haben nachgewiesen, dass die keramische Faser allen Anforderungen des Turbinenbaus genügt. Sie hält nicht nur höhere Temperaturen aus als jeder metallische Werkstoff, sondern bleibt dabei auch mechanisch stabil.

Allerdings lässt sich aus der Faser nicht einfach eine Turbinenschaufel „weben“. Deshalb haben die Stuttgarter zusammen mit ihren Kooperationspartnern ein Verbundmaterial entwickelt. Es handelt sich um eine Keramik aus Siliciumcarbid, durch die sich parallel SiBNC-Keramikfasern als Verstärkung ziehen. In der Verwendung keramikfaserverstärkter Keramiken liegt der mit Abstand aussichtsreichste Ansatz, den kritischen Schwachpunkt dieser Werkstoffklasse – die Sprödigkeit – zu überwinden. Die Fasern lassen sich im Prinzip wie Kohlefasern zu Verbundwerkstoffen verarbeiten. Darauf hat sich die Wiesbadener Firma SGL Carbon spezialisiert. Die Fraunhofer-Forscher haben sie mit ins Boot geholt. SGL Carbon will die Fasern industriell für Großkunden produzieren.

### VERÄNDERTE REZEPTUR FÜR GRÖßERE BAUTEILE

Inzwischen wird daran gearbeitet, die neue Keramik in einem wichtigen Punkt zu verbessern. Obwohl das Polymer sich wunderbar per Spritzguss zu größeren Bauteilen formen ließe, gelingen bislang nur die dünnen Keramikfasern fehlerfrei. Weil die organischen Bestandteile sich beim Brennen verflüchtigen, schrumpft dickeres Material stark. Dabei verursacht das austretende Pyrolysegas Risse und Löcher. Jansens Team versucht deshalb, das Polymer chemisch so umzugestalten, dass die organischen Bestandteile beim Brennen im Netzwerk der Atome gefangen bleiben. Erste Erfolge stellen sich ein: Stolz drückt der Doktorand Jakob Wilfert dem Gast im La-

bor ein kleines Stück Keramik in die Hand. Es ist etwa fingernagelgroß und einige Millimeter dick. Seine schwarz glänzenden Flächen zeigen tatsächlich so gut wie keine Blasen.

„Man kann mit Recht sagen, dass das eine neue Werkstoffklasse ist“, stellt Jansen mit Genugtuung fest. Schließlich musste er mit Industriepartnern auch Enttäuschungen hinnehmen. Der Bayer-Konzern zum Beispiel sprang in den 1990er-Jahren nach jahrelanger Partnerschaft wieder ab. Jansen machte die Erfahrung, dass der Weg von einer wissenschaftlichen Erfindung bis zur technischen Anwendung sehr weit sein kann. Das gilt besonders für neue Hightech-Werkstoffe, die etwa in Flugzeugtriebwerken eingesetzt werden sollen. Dafür müssen sie jahrelang auf sicheres Verhalten getestet werden: Investoren müssen also sehr langfristig denken.

Im Jahr 2004 erhielt Jansen für die Entwicklung der neuen Hochtemperaturkeramik den Wissenschaftspreis des Stifterverbandes der Deutschen Wissenschaft. Letztes Jahr wurden die Stuttgarter und ihre Kooperationspartner sogar für den Deutschen Zukunftspreis des Bundespräsidenten nominiert. „Wir kamen immerhin in die Runde der letzten acht“, bemerkt Jansen, setzt aber bedauernd hinzu: „Es war ein bisschen zu früh, denn wir sind mit der Keramik ja noch nicht so richtig auf dem Markt.“ Jansen ist überzeugt, dass die neue Werkstoffklasse eines Tages ein hohes Marktvolumen erreichen wird. „Im Moment kommen erst einmal nur hochpreisige Bereiche in Frage“, sagt er: „Aber das Material kann im Prinzip ähnlich wie Stahl sehr vielfältigen Verwendungen zugeführt werden.“ ◀



Jakob Wilfert und seine Kollegen haben inzwischen einen Weg gefunden, auch größere Stücke des Materials weitgehend fehlerfrei herzustellen.

### GLOSSAR

#### Oxidische Keramiken

enthalten neben verschiedenen Metallen wie etwa Aluminium oder Zirkonium Sauerstoff.

#### Amorphe Keramiken

bestehen anders als herkömmliche Keramiken nicht aus kleinen, regelmäßig geordneten Kristalliten; vielmehr verbinden sich ihre Atome zu einem ungeordneten räumlichen Netz.

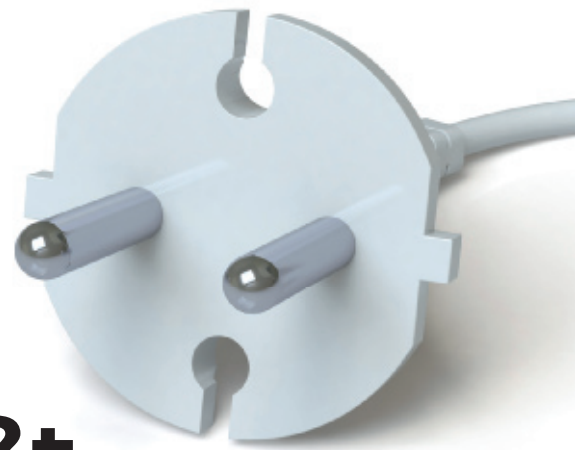
#### Kovalente Bindung

Eine chemische Bindung zwischen zwei Atomen. Sie wird von mindestens einem Elektronenpaar aufgebaut, zu dem beide Atome je ein Elektron beisteuern.

#### Polykondensation

Eine chemische Reaktion, bei der sich kleine Moleküle zu einer vielgliedrigen Kette oder einem ausgedehnten dreidimensionalen Netz verbinden. Als Nebenprodukt entstehen einfache chemische Verbindungen wie Salzsäure oder Wasser.

# Strom, der aus Holz fließt



Sauber, effizient und zuverlässig soll Strom künftig entstehen – etwa in Brennstoffzellen, die letztlich mit Biomasse gefüttert werden. Den Weg vom Acker in die Steckdose ebnen Forscher des **Max-Planck-Instituts für Dynamik komplexer technischer Systeme** und der **Fraunhofer-Institute für Fabrikbetrieb und -automatisierung** sowie für **Keramische Technologien und Systeme**.



TEXT ALEXANDER STIRN

**E**in Teil des Puzzles ist rostig, staubig und steckt in einem quietschgelben Plastikständer. Die Puzzlesteine sind verpackt in drei Dutzend Röhrchen – gut gefüllt mit einer rötlichen Substanz und beschriftet mit chemischen Formeln, Größenangaben, kryptisch anmutenden Zahlenkombinationen. Die Beschreibungen, mit einem dicken Filzstift auf die Röhrchen gekritzelt, sind nur von Experten zu entziffern.

Peter Heidebrecht nimmt eines der Puzzleteilchen. Er hält das Röhrchen ins Licht und schüttelt es vorsichtig. Das dreckig-rote Pulver staubt auf. „Dieser Stoff ist nur eine von vielen Optionen, die wir derzeit untersuchen“, sagt der Verfahrenstechniker. „Aber gerade diese Vielfalt macht den Reiz des Projekts aus.“

Das Projekt heißt ProBio, und bislang ist nur klar, was für ein Bild das gesamte Puzzle einmal ergeben soll, an dem Heidebrecht zusammen mit seinen Kollegen des Magdeburger Max-Planck-Instituts für Dynamik komplexer technischer Systeme seit drei Jahren arbeitet: Die Forscher wollen einen Weg weisen, um auf möglichst effiziente Art Strom aus Biomasse zu erzeugen. Wie die einzelnen Puzzleteilchen dabei aussehen müssen, vor allem aber wie sie zusammenpassen, stellt die Wissenschaftler noch vor einige Herausforderungen. Die Zusammensetzung des rötlichen Pulvers, das eine wichtige Substanz auf dem

Weg zur Steckdose werden soll, zeigt dabei nur einen kleinen Ausschnitt eines noch viel größeren Puzzles.

Dass Biomasse künftig eine wichtige Rolle spielen wird, steht indes außer Frage. Schon heute deckt sie sieben Prozent des Endenergieverbrauchs in Deutschland; unter den erneuerbaren Energien hat sie den mit Abstand größten Anteil. Bis zum Jahr 2020 sollen, so will es die Bundesregierung, 18 Prozent des deutschen Energiebedarfs aus regenerativen Quellen stammen. „Die Herausforderung, Biomasse in elektrischen Strom umzuwandeln, ist daher sehr aktuell und zukunftssträchtig“, sagt Kai Sundmacher, Direktor am Magdeburger Institut und Sprecher von ProBio, eines gemeinsamen Projekts von Max-Planck- und Fraunhofer-Gesellschaft. „Auch wenn Biomasse nicht die alleinige Lösung für die Energieversorgung der Zukunft sein wird, kann von ihr ein wichtiger Beitrag ausgehen.“

Die Wege hin zur Steckdose sind allerdings vielfältig. Biomasse lässt sich verbrennen, vergären, vergasen. Mit den entstehenden Produkten lassen sich Dampfturbinen, Gasmotoren oder Brennstoffzellen betreiben. Jede Variante hat ihre Vorteile, aber auch ihre Probleme. Manche Wege sind gut erforscht, andere noch immer technisches Neuland.

So wie die Brennstoffzelle, die im Mittelpunkt des ProBio-Projekts steht: Bei Brennstoffzellen handelt es sich um kleine Kraftwerke, sie setzen die in

einem Gas gespeicherte chemische Energie direkt um, elektrischer Strom entsteht. „In dem gesamten Park von Energiewandlern, der uns zur Verfügung steht, versprechen Brennstoffzellen den höchsten Wirkungsgrad“, sagt Peter Heidebrecht. Bislang werden solche Zellen meist mit Erdgas, Methanol oder reinem Wasserstoff gefüttert. Im Prinzip spricht aber nichts dagegen, sie auch mit sauberem Gas aus Biomasse zu füttern – falls die richtigen Puzzleteilchen zusammenkommen.

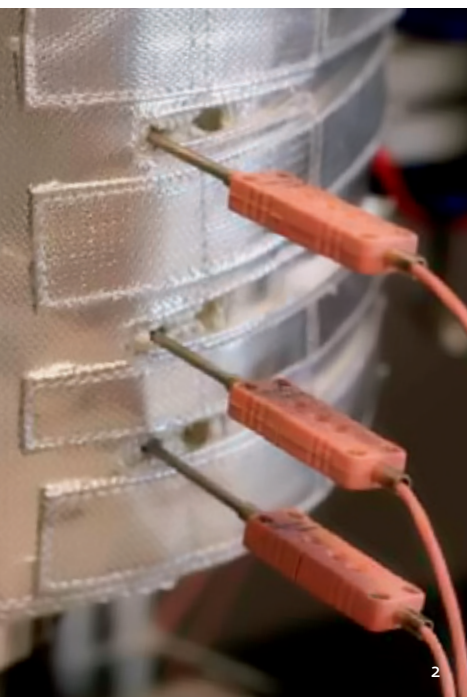
## BRENNSTOFFZELLE ERHÖHT DIE STROMAUSBEUTE

Auch bei der Behandlung der Biomasse geben sich die Max-Planck-Forscher nicht mit dem einfachsten Weg ab: „Die simple Verbrennung ist ausgereizt“, sagt Heidebrecht. Bei ihr werden biologische Rohstoffe verfeuert, die freigesetzte Wärme wird zur Stromerzeugung genutzt. „Bei diesem Prozess gibt es Obergrenzen, die durch die Thermodynamik gesetzt sind und an denen man auch mit noch so guter Ingenieurskunst nicht rütteln kann“, sagt Peter Heidebrecht.

Auch die Vergärung, bei der Mikroorganismen Biomasse unter Sauerstoffabschluss zersetzen und in Gase verwandeln, hat ihre Probleme: Ausgangsstoffe wie Holz oder Stroh enthalten einen hohen Anteil sogenannter Lignozellulose. Bakterien können mit dem Stoff kaum etwas anfangen. Er ist schwer verdaulich und stößt daher auf

Aus Holzabfällen oder Stroh möchten die Max-Planck-Forscher möglichst effizient Strom gewinnen.





tiert uns einheitliche Temperaturen und Konzentrationen in der Reaktionszone“, sagt Thomas. Genau dort wird auch die Biomasse zugeführt – über eine Förderschnecke. Die ist wassergekühlt, schließlich soll sich der Brennstoff erst in der 800 bis 850 Grad Celsius heißen Reaktionszone zersetzen und nicht schon vorher.

### VIELFALT DER BIOMASSE MACHT DIE SACHE KOMPLIZIERT

Durch silbrig glänzende, isolierte Leitungen erreicht das auf diese Weise produzierte Brenngas die Analysegeräte des Fraunhofer-Labors. In einer späteren ProBio-Anlage soll es nach diversen Reinigungsschritten direkt in die Brennstoffzellen wandern. Dann wird auch alles viel größer sein. Ein Wirbelschichtvergaser für ein Kraftwerk mit mehreren Megawatt Leistung müsste einen Durchmesser von etwa einem Meter haben, das Rohr im Magdeburger Labor misst gerade einmal fünf Zentimeter. „Das reicht, um die Umsetzung der Biomasse in der Wirbelschicht zu studieren“, sagt Thomas. „Für eine Pilotanlage wäre die produzierte Brenngasmenge jedoch zu gering.“

Eigentlich ist die Wirbelschichtvergasung ja ein alter Hut. Bereits in den 1920er-Jahren wurde sie erdacht – damals um aus Kohle Synthesegas zu gewinnen. Schon bald aber machte die Erdölchemie diesen Prozess überflüssig. Verglichen mit biologischen Abfällen hat Kohle dennoch einen entscheidenden Vorteil: Ihr Hauptbestandteil ist immer der gleiche – Kohlenstoff. „Biomasse dagegen ist nicht gleich Biomasse“, sagt Thomas.

In durchsichtigen Behältern direkt neben dem Wirbelschichtofen stehen Holzpellets, Rapsstroh, Biomassekoks und Jatropha, ein vor allem in Asien als Biomasselieferant beliebtes Wolfsmilch-

wenig Gegenliebe. Außerdem verläuft der Prozess langsam – und daran ist auch nicht zu rütteln: „Die Biologie lässt sich nun mal nicht beliebig beschleunigen“, sagt Heidebrecht.

Bleibt also die Vergasung. Hier wird Biomasse unter hohen Temperaturen in ein nur teilweise verbranntes Gas umgewandelt. Das enthält viele energiereiche Komponenten wie Wasserstoff, Kohlenmonoxid und kurzkettige Kohlenwasserstoffe. Es ist daher für die Stromerzeugung gut geeignet. Zumindest in der Theorie.

Sascha Thomas öffnet einen Ofen, der mit seiner metallischen Lochblende an die glänzenden Auspuffrohre

amerikanischer Lastwagen erinnert. Der Verfahrenstechniker koordiniert das ProBio-Projekt am Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung, das nur einen Steinwurf vom Max-Planck-Institut entfernt direkt an der Elbe liegt.

In dem vermeintlichen Auspuff steckt ein sogenannter Wirbelschichtvergaser, das Herzstück der Gaserzeugung für das ProBio-Projekt: Von unten strömt das Vergasungsmittel, zum Beispiel Wasserdampf, in die Apparatur. Es trifft auf eine Sandschicht, deren Teilchen so dimensioniert sind, dass sie vom Gas immer in der Schwebe gehalten und verwirbelt werden. „Das garan-

- 1 Volle Kontrolle: André Herrmann steuert am Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung den Wirbelschichtvergaser, die mit metallisch glänzender Folie eingepackte Säule im Bildhintergrund.
- 2 Ein Detail des Vergasers mit Temperaturmessfühlern.
- 3 Versuch zum Anfassen: In dem Modellexperiment demonstriert Sascha Thomas das Prinzip, wie aus Biomasse ein Gas erzeugt wird. Ziel ist es, mit dem Gas eine Brennstoffzelle zu betreiben.
- 4 Prüfung für die Proben: In diesem Reaktor testet Liisa Rihko-Struckmann, wie effizient verschiedene Mischungen auf Eisenoxid-Basis Kohlenmonoxid in den Vergasungsprodukten unschädlich machen.

gewächs. Jeder Stoff wurde im Puzzlespiel namens ProBio ausgiebig getestet – mit verschiedenen Vergasungsmitteln, Temperaturen und Verweilzeiten im Wirbelbett. Jedes Mal unterschied sich die Zusammensetzung des Gases. Selbst die Jahreszeit, das Alter und die Lagerung des verwendeten Holzes wirken sich auf die Gasqualität aus. „Biomasse ist eben kein Reinstoff, sondern ein komplex zusammengesetztes Gemisch“, sagt Kai Sundmacher. „Das macht unser Vorhaben auch so interessant.“

Im Idealfall ist das Gas, das aus Sascha Thomas' Ofen entweicht, farblos – und damit frei von Verunreinigungen. Meist schimmert es aber gelblich. Dann enthält es Teere, Stäube sowie Halogen- und Schwefelverbindungen. Allesamt Dinge, die Brennstoffzellen überhaupt nicht leiden können, die ihre Elektroden vergiften und deshalb aus dem Gas entfernt werden müssen.

Dazu dienen üblicherweise Wäschesysteme, in denen Düsen Wasser ins Gas sprühen und es schlagartig auf Zimmertemperatur herunterkühlen. Die Schadstoffe werden dabei ausgespült. Übrig bleiben kaltes Gas und lauwarmes Wasser. „Das Problematische daran ist, dass wir das Gas für die nächsten Schritte erst wieder auf 800 Grad Celsius erhitzen müssten“, sagt Peter Heidebrecht.

Die ProBio-Forscher haben sich für ihren Prozess daher eine andere Methode überlegt: Sie leiten das Gas durch eine Schüttschicht aus keramischen Kügelchen, an denen die Dreckpartikel haften bleiben. „Das funktioniert ähnlich wie beim Grundwasser, das durch Sandschichten sickert und dabei sauberer wird“, erklärt Sascha Thomas. Gleichzeitig werden die unerwünschten Teerverbindungen durch katalytisch aktive Schüttschichten in zusätzliches Brenngas umgewandelt – das steigert den Energiegehalt des Gases. Halogen und Schwefel werden schließ-

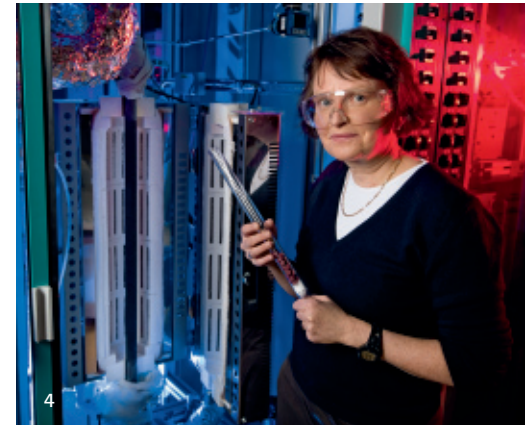
lich mit Metalloxiden entfernt. Die reagieren bei höheren Temperaturen mit den giftigen Komponenten.

Übrig bleibt ein Gas, das sauberen Wasserstoff enthält, zusätzlich aber auch noch große Mengen an Kohlenmonoxid. Das ist gut oder schlecht – je nachdem, welchen Typ von Brennstoffzelle das Gas speist: Hochtemperatur-Brennstoffzellen (sogenannte Solid Oxide Fuel Cells, SOFC) sind die robusten Allesfresser unter den Energiewandlern. Sie haben einen keramischen Elektrolyten, arbeiten bei etwa 800 Grad Celsius und können selbst aus Kohlenmonoxid noch Strom machen. Am liebsten laufen sie rund um die Uhr bei konstanter Belastung, kurzfristige Änderungen des Strombedarfs mögen sie dagegen nicht.

### FUTTER FÜR VERSCHIEDENE BRENNSTOFFZELLEN

„Die Temperaturen im Innern der Zellen müssen sich innerhalb eines bestimmten Fensters bewegen“, erklärt Peter Heidebrecht. „Jeder Lastwechsel ändert dieses Temperaturprofil und kann den Zellen schaden.“ Zudem brauchen die Hochtemperatur-Brennstoffzellen, die im Rahmen des ProBio-Projekts vom Dresdner Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme untersucht werden, je nach Größe einige Stunden oder auch mehrere Tage, um auf Betriebstemperatur zu kommen.

Ganz anders sieht das bei Niedertemperatur-Anlagen aus, sogenannten PEM-Zellen (Polymer Electrolyte Membrane). Sie sind die flexiblen Mimosen unter den Brennstoffzellen. Ihr Elektrolyt besteht aus einer Polymermembran und verträgt daher nur etwa 80 Grad Celsius. Dafür kann die Leistung der Zelle im Stunden- oder notfalls sogar Minutentakt an den wechselnden



Strombedarf angepasst werden. So viel Flexibilität wird allerdings teuer erkaufte: Niedertemperatur-Brennstoffzellen vertragen so gut wie kein Kohlenmonoxid. Bereits eine Konzentration von mehr als 0,01 Promille vergiftet die Zelle nachhaltig. Die Leistung bricht dramatisch ein.

Auf der Suche nach dem passenden Teilchen im Brennstoffzellen-Puzzle half den Magdeburger Verfahrenstechnikern der Zufall – und ein staubiges rotes Pulver: „Eigentlich wollten wir nur das Kohlenmonoxid aus dem Brenngas entfernen“, erinnert sich Peter Heidebrecht. Bis zu 20 Prozent des – je nach Brennstoffzellentyp – giftigen oder nützlichen Stoffes kann der Gasstrom enthalten. Um ihm Herr zu werden, versuchten es die Forscher mit rötlich-dreckigem Eisenoxid, im Prinzip nichts anderes als Rost: Strömt das 800 Grad heiße Gas über solch ein Oxid-Pulver, gibt dieses die in ihm gespeicherten Sauerstoffatome teilweise an das Kohlenmonoxid ab. Es entsteht Kohlendioxid, das selbst einer Niedertemperatur-Brennstoffzelle nichts anhaben kann. Das Problem: Trotz aller Bemühungen bleiben noch immer große Mengen Kohlenmonoxid im Gas zurück. Zu große Mengen für eine PEM-Brennstoffzelle. Gleichzeitig



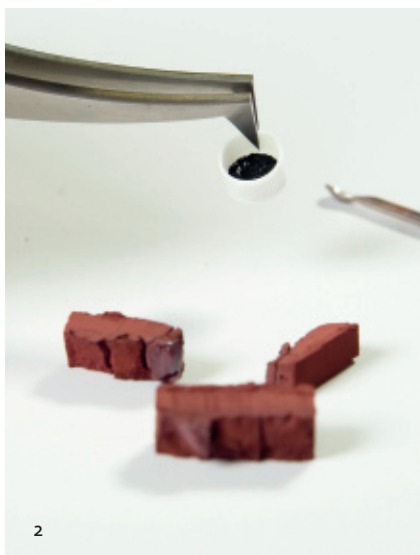
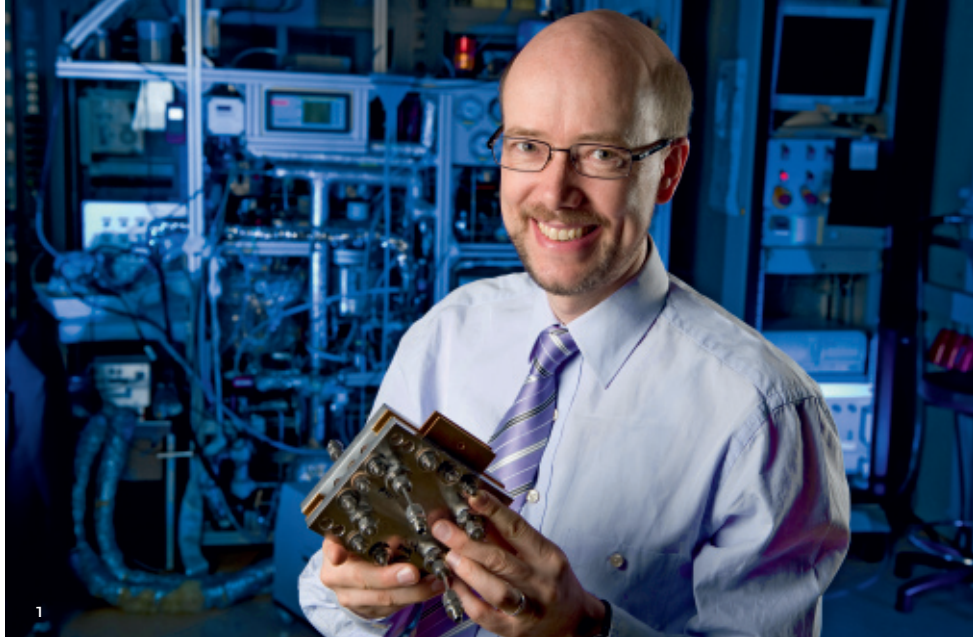
verwandelt das Eisenoxid auch noch den dringend benötigten Wasserstoff in nutzloses Wasser.

Das Pülverchen erwies sich trotzdem als sehr nützlich, denn es hat eine ganz andere Stärke: Nachdem es sich seiner Sauerstoff-Atome entledigt hat, giert es nach Nachschub. Den kann zum Beispiel Wasserdampf liefern. Kommt der mit dem ausgelaugten Eisenoxid in Berührung, holt sich das Pulver den Sauerstoff aus den Wassermolekülen zurück. Übrig bleibt reiner Wasserstoff – ideal für eine Niedertemperatur-Brennstoffzelle.

### GESUCHT: EIN HALTBARER STOFF FÜR DIE GASWÄSCHE

„Als wir das gesehen haben, war klar: So ein Verfahren eignet sich wunderbar zur Auftrennung des Gases“, erinnert sich Peter Heidebrecht. Im ersten Durchgang, wenn das Brenngas über das Eisenoxid strömt, bleibt eine Mischung übrig, mit der Hochtemperatur-Brennstoffzellen sehr gut leben können. Im zweiten Schritt, beim Fluten mit Wasserdampf, entsteht der nahezu reine Wasserstoff für die Niedertemperatur-Zellen.

Noch gibt es einiges zu tun: „Nimmt man nur Eisenoxid, belastet der Sauerstoffaustausch das Material sehr stark, die Ausbeute an Wasserstoff geht rasch zurück“, sagt Liisa Rihko-Struckmann, die zusammen mit Peter Heidebrecht das ProBio-Projekt am Max-Planck-Institut koordiniert. Deshalb stehen in dem quietschgelben Probenständer in den Magdeburger Laborräumen auch so viele unterschiedliche Pulver-Pröbchen. Manche enthalten nur die roten, ein bis fünf Zehntelmillimeter großen Eisenoxid-Partikel, einige bestehen zusätzlich aus Aluminium- oder Siliciumoxid, viel häufiger ist aber Cer-Zirkonium-Oxid im Spiel.



Jede Probe heizen die Forscher in einem Laborofen auf 800 Grad Celsius und testen sie anschließend mit einem sorgfältig gemischten Gas. „Aktuell achten wir besonders darauf, dass die Materialien stabil und lange einsetzbar sind“, sagt Rihko-Struckmann. Tausend Gas- und Wasserdampfzyklen sollten die Pülverchen schon aushalten.

Proben, die im Labor positiv auffallen, dürfen sich im Technikum, einem grauen Würfel am Nordende des Max-Planck-Instituts, bewahren. Dort haben die Ingenieure eine Versuchsanlage aufgebaut – ein beheizbares Stahlrohr, das sie auf etwa 20 Zentimeter Länge mit der Eisenoxidmischung füllen. Statt 250 Milligramm wie im Labor brauchen die Forscher hier 100 Gramm des Stoffes.

„Gerade sind wir dabei, aus unserem schönen feinen Pulver gröbere Partikel zu formen, um die herum das Gas strömen kann“, sagt Liisa Rihko-Struckmann. Dann wollen die Verfahrens-

techniker untersuchen, wie sich das Gas im Pulver ausbreitet, wie sich der Sauerstoff in den Oxiden optimal ausnutzen lässt, wie die Schaltzeiten für den Wechsel zwischen Brenngas und Wasserdampf aussehen müssen. „Solche erzwungenen dynamischen Prozesse gehören zu den Dingen, mit denen sich unser Institut schon seit Langem beschäftigt“, sagt Kai Sundmacher.

Gasreiniger im Max-Planck-Technikum, Wirbel- und Schütttschichten im Fraunhofer-Institut, Brennstoffzellen in Dresden und in Magdeburg: Noch liegen die einzelnen Puzzleteilchen einer möglichen ProBio-Anlage weit verstreut. Zusammen kommen sie derzeit nur in den Schaltkreisen eines Computers: Dort lassen sich die Komponenten – auf Basis der im Labor gemessenen Werte – simulieren, kombinieren und gezielt verändern.

Mit den am Rechner ermittelten Verbesserungsmöglichkeiten geht es anschließend wieder zum Reaktor, „in



- 1 Bio-Brennstoffzelle: Kai Sundmacher mit einer Niedertemperatur-Brennstoffzelle. Dass sich diese auch noch mit Brenngas füttern lässt, nachdem Gas aus der Biomasse bereits in eine Hochtemperatur-Brennstoffzelle gespeist wurde, macht die Verwandlung in Strom besonders effizient.
- 2,3 Rost für die Gasreinigung: Mit dem feineren Eisenoxid haben die Forscher im Labor Kohlenmonoxid aus dem Brenngas entfernt (3), im Technikum haben sie den Prozess mit dem größeren Granulat (2) im größeren Maßstab gefahren.
- 4 Auf der Suche nach dem richtigen Pulver: Peter Heidebrecht und Liisa Rihko-Struckmann testen, welches der verschiedenen Materialien das Brenngas für Hoch- und Niedertemperatur-Brennstoffzellen am effektivsten auftrennt.

der Hoffnung, dass alles so läuft, wie man sich das gedacht hat“, sagt Peter Heidebrecht und lacht: „Meist ist das beim ersten Mal natürlich nicht der Fall.“ Mit den neuen Erkenntnissen aus dem Labor füttern sie dann wieder das mathematische Modell, um das Experiment weiter zu optimieren. Ein ständiges Hin und Her, das sich langsam dem realen Kraftwerk annähert.

### MODELLKRAFTWERK MIT IMMENSEM WIRKUNGSGRAD

Mehr als hundert verschiedene Varianten haben die Verfahrenstechniker im Rahmen von ProBio simuliert. Herausgekommen ist etwas, womit zu Beginn des auf drei Jahre angelegten Projekts niemand gerechnet hatte: In der optimalen Anlage arbeiten beide Brennstoffzellentypen parallel – vorausgesetzt, das rote Pülverchen kann auch im Praxiseinsatz das Brenngas in einen sehr reinen und einen weniger sauberen Gasstrom trennen. „Das ist eine Art Kombinationskraftwerk“, sagt Peter Heidebrecht. „Es liefert ein breites Produktspektrum aus elektrischer Grundlast, dynamischer Spitzenlast und gut nutzbarer Abwärme.“

Vor allem aber arbeitet es mit fast unschlagbarem Wirkungsgrad: Für ihre Simulation haben die Ingenieure ein Modellkraftwerk gewählt, in das Biomasse mit einem Heizwert von knapp 19 Megawatt gesteckt wird – das entspricht etwas mehr als einem Kilogramm Holz pro Sekunde. Dank Wirbelschichtvergaser, Reinigung in Schüttschichten, Wasserstoff-Abtrenner und parallelem Betrieb von Hoch- und Niedertemperatur-Brennstoffzelle würden am Ende knapp neun Megawatt an elektrischer Leistung herauskommen. Das entspricht einem elektrischen Wirkungsgrad von beinahe 50 Prozent; eine klassische Biogasverwertung über einen Ottomotor erreicht

lediglich 35 Prozent. „Heutzutage wird schon eine Verbesserung um wenige Prozent bejubelt, weil sie auf Dauer hilft, sehr viel Energie zu sparen“, sagt Liisa Rihko-Struckmann.

Auch wenn das ProBio-Projekt, das die beiden Forschungsgesellschaften mit 4,2 Millionen Euro gefördert haben, Anfang des Jahres offiziell ausgelaufen ist, wollen die Forscher auf eigene Faust gehen soll. „Dann können wir die einzelnen Komponenten, zu denen wir jetzt schon Erfahrungen gesammelt haben, endlich zusammen und im größeren Maßstab untersuchen“, sagt Sascha Thomas.

Auch am Max-Planck-Institut, wo man sich ohnehin dem Studium komplexer chemischer Prozesse und der damit verbundenen Grundlagenforschung verschrieben hat, arbeiten die Wissenschaftler weiter an den einzelnen Puzzleteilchen– unter anderem an der Brennstoffzelle und dem staubigen



roten Pulver. „Der schönste Wirkungsgrad nutzt nichts, wenn die Geräte nur ein paar Stunden oder Tage durchhalten“, sagt Kai Sundmacher. Daher werden sie vor allem an den Betriebsbedingungen und Werkstoffen feilen, um die Lebensdauer deutlich zu verlängern. Die Forscher müssen im großen Puzzle namens ProBio also noch ein paar Teilchen passend machen. ◀

### GLOSSAR

#### Lignozellulose

Zellulose, die durch Lignin stabilisiert wird. Sie bildet die Zellwand von Holzzellen, die dadurch gleichzeitig zug- und druckfest werden.

#### Wirbelschichtvergasung

erzeugt aus Kohle oder Biomasse brennbares Gas. Dabei werden die festen Bestandteile meist mit einem Trägermaterial verwirbelt und erhitzt. In einer chemischen Reaktion mit Wasserdampf oder einem anderen Vergasungsmittel entstehen unter anderem Wasserstoff und Kohlenmonoxid.

#### Synthesegas

Wasserstoff- und kohlenmonoxidreiches Gas, das bei der Vergasung von Kohle mit Wasserdampf entsteht und sich als Ausgangsstoff für chemische Synthesen eignet.

#### Solid Oxide Fuel Cell, SOFC

Die Festoxid- oder Hochtemperatur-Brennstoffzelle verdankt ihren Namen dem keramischen Material, das ihren Elektrolyten bildet und für Sauerstoffionen, nicht aber für Elektronen durchlässig ist. Sie erzeugt bei Temperaturen bis zu 1000 Grad Celsius sehr effizient Strom und reagiert unempfindlich auf Kohlenmonoxid.

#### Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell, PEMFC

Die beiden Pole dieser Niedertemperatur-Brennstoffzelle trennt eine Membran, die nur von Protonen passiert werden kann. Die PEM-Brennstoffzelle ist in ihrer Leistung flexibel. Allerdings toleriert sie kaum Kohlenmonoxid, da dieses die Elektrodenoberflächen besetzt und sie damit für die Ausgangsstoffe der Zellreaktion unzugänglich macht.





Die Solaranlage des Tabaks:  
Einer von bis zu 100 Chloroplasten  
aus der Zelle eines Tabakblattes.  
Sein Inneres ist von Stapeln flacher  
Membranscheiben angefüllt  
(fadenförmige Strukturen), in denen  
sich der Fotosynthese-Apparat  
befindet. Chloroplasten besitzen  
wie die Mitochondrien eigenes  
Erbgut (helle Flächen).



# Kraftwerk im Blattwerk

Ein genialer Einfall der Natur: Die Fotosynthese macht höheres Leben erst möglich. Und sie könnte auch noch mehr zur Lösung künftiger Energieprobleme beitragen – wenn sie sich optimieren ließe. Daran arbeiten **Ulrich Hartl** und **Manajit Hayer-Hartl** am **Max-Planck-Institut für Biochemie** in Martinsried.

TEXT **HARALD RÖSCH**

**M**al ehrlich – denken Sie beim Anblick einer Wiese an eine Solaranlage? Sicher nicht. Dabei machen Pflanzen etwas ganz Ähnliches: Sie wandeln die Energie des Sonnenlichts in nutzbare Energie um. Durch Fotosynthese gewinnen sie aus der Energie des Sonnenlichts chemische Energie, indem sie über viele Zwischenschritte Zucker aufbauen. Diese Energiequelle zapfen wir heute schon an, sei es als Biosprit oder in Biogasanlagen.

Die Natur baut also bereits seit Jahrmillionen Solaranlagen. Schade nur, dass die natürlichen Kraftwerke so ineffektiv arbeiten. Denn Pflanzen sind Energieverschwender – zumindest was die Energiegewinnung bei der Fotosynthese angeht. Um Europas Treibstoffbedarf im Jahr 2050 mit Bioethanol oder -diesel zu decken, wären die Bundesrepublik und Frankreich zusammen als Anbaufläche nicht groß genug. Wenn sich allerdings zehn Prozent der Energie, die als Sonnenlicht auf diese Fläche fällt, in chemische Energie verwandelt ließe, würde eine Fläche von der Größe Baden-Württembergs vermutlich ausreichen.

Der Wirkungsgrad der pflanzlichen Fotosynthese liegt allerdings natürlicherweise nur bei rund fünf Prozent. Zum Vergleich: Heutige Solarzellen erreichen etwa 20 Prozent, produzieren aber keine Energieträger, die sich wie Bioethanol leicht speichern und transportieren lassen. Es gibt jedoch Organismen, die schaffen deutlich mehr als Pflanzen: So kann das grüne Schwefelbakterium *Chlorobaculum tepidum* mit seinem extrem effizienten Solarkraftwerken zur Lichtabsorption zehn Prozent des einfallenden Sonnenlichts in chemische Energie verwandeln.

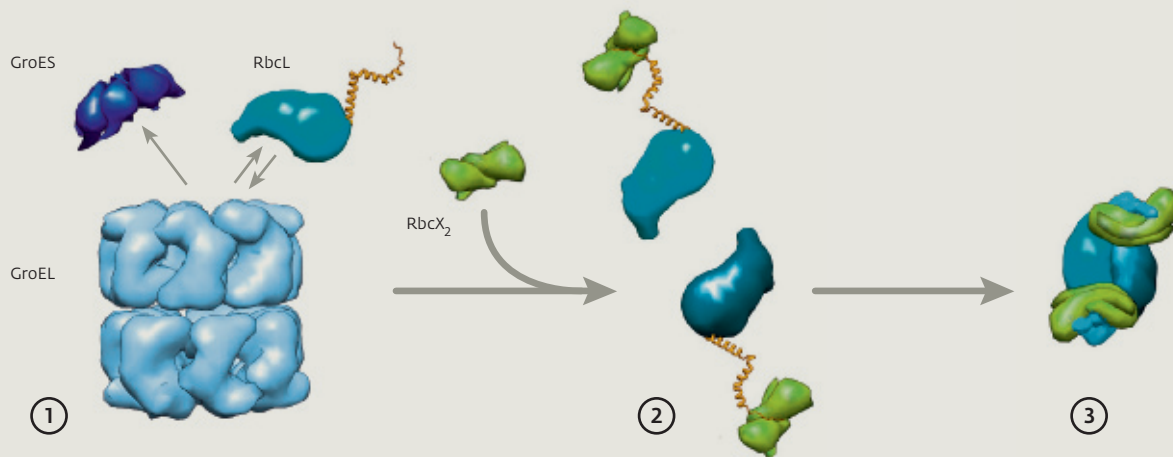
## TURBO-PFLANZEN GEWINNEN MEHR ENERGIE

Wissenschaftler arbeiten deshalb daran, die Fotosynthese effektiver zu machen. Dabei wollen sie verschiedene Schritte bei der Umwandlung der Lichtenergie in chemische Energie optimieren, beispielsweise indem sie die Effizienz des Fotosynthese-Apparats erhöhen.

Solchermaßen aufgerüstete Pflanzen wären in der Lage, mehr Biomasse für die Treibstoffproduktion zu bilden. Manche Wissenschaftler wollen dagegen auf Pflanzen ganz verzichten und

stattdessen Bakterien mit einem optimierten Fotosynthese-Apparat ausstatten. Möglicherweise sind Lebewesen aber auch völlig überflüssig. Wasserstoff etwa könnte sich in Bioreaktoren erzeugen lassen, in denen künstliche Fotosynthese nur mit den notwendigen Proteinen abläuft. Denn die Natur hat Enzyme hervorgebracht, die mit Sonnenenergie Wasser spalten und daher teures Platin in Brennstoffzellen ersetzen könnten. Und sie kennt auch solche, die aus den Bruchstücken des Wassers im Anschluss Wasserstoff produzieren (siehe *MAXPLANCKFORSCHUNG* 2/2006, Seite 32 ff.).

Am Max-Planck-Institut für Biochemie in Martinsried bei München suchen Forscher eine Möglichkeit, die pflanzliche Fotosynthese effektiver zu machen – und sind auf dem Weg dorthin einen wichtigen Schritt weitergekommen. Die Wissenschaftler um Ulrich Hartl und seine Frau Manajit Hayer-Hartl haben den Faltungsprozess eines Schlüsselproteins der Fotosynthese aufgedeckt, des sogenannten Rubisco. Mit diesem Wissen können die Forscher nun daran gehen, Rubisco künstlich herzustellen und es so zu verändern, dass es effizienter arbeitet. >



Protein-Origami: Die Chaperone GroEL (hellblau) und GroES (dunkelblau) sorgen für die Faltung der großen Rubisco-Untereinheit RbcL (türkis, 1). Nach Freisetzung aus dem fassförmigen Chaperon-Komplex bindet das Helferprotein RbcX an noch ungefaltete Endstücke der Rubisco-Untereinheiten (2) und bewirkt, dass sich zwei Untereinheiten aneinanderlagern (3). Vier dieser Dimere bilden schließlich einen Zylinder (4). Jeweils vier kleine Untereinheiten RbcS (rosa) besetzen die Kopf- und Fußfläche (5) und lösen so die Bindung von RbcX an das fertige Rubisco-Molekül (6).

Rubisco ist nicht nur das häufigste Protein auf der Erde, es gehört auch zu den wichtigsten: Ohne Rubisco gäbe es das Leben in seiner heutigen Form nicht. Es bindet Kohlendioxid aus der Atmosphäre und leitet die Umwandlung in Zucker und Sauerstoff ein. Rubisco arbeitet jedoch sehr langsam und ineffektiv. Es reagiert nämlich nicht nur mit Kohlendioxid, sondern auch mit Sauerstoff: Im Schnitt bindet es nach drei bis fünf Kohlendioxid-Molekülen ein Sauerstoff-Molekül. „Als Rubisco vor rund vier Milliarden Jahren entstand, war dies bedeutungslos, denn damals gab es noch keinen Sauerstoff in der Atmosphäre. Heute dagegen liegt der Sauerstoffanteil bei 20 Prozent“, sagt Manajit Hayer-Hartl, die zusammen mit ihrem Mann Ulrich an Rubisco forscht. Rubisco könnte also wesentlich effektiver arbeiten, wenn es nicht mehr mit Sauerstoff reagieren würde.

### ANSTANDSDAMEN SORGEN FÜR RICHTIGE FORM

Die Martinsrieder Forscher wollen Rubisco deshalb so verändern, dass es nur noch Kohlendioxid binden kann. Zuvor müssen sie aber erst einmal wissen, wie das Protein überhaupt gebildet wird. Denn Rubisco gehört zu den größten Proteinen überhaupt und besteht aus acht großen und acht kleinen Untereinheiten. „Bei so vielen Untereinheiten ist die Gefahr groß, dass sich falsche Teile des Proteins zusammenlagern und verklumpen“, erklärt Manajit Hayer-Hartl. Damit das Protein richtig funktioniert,

müssen die Aminosäureketten korrekt gefaltet und die Untereinheiten so positioniert werden, dass sie einen Zylinder bilden. Spezielle Proteine bewerkstelligen diesen komplexen Faltungsprozess, sogenannte Chaperone.

Den Forschern zufolge sind drei Proteine notwendig, um einen funktionierenden Rubisco-Komplex nachzubauen: neben den bereits bekannten Chaperonen GroEL und GroES auch ein neu entdecktes Helferprotein (RbcX). RbcX sorgt dafür, dass sich je zwei große Untereinheiten aneinanderlagern können. Vier dieser Dimere bilden dann den Zylinder, an dessen Kopf- und Fußfläche sich je vier kleine Untereinheiten positionieren. „Jetzt verstehen wir, warum beispielsweise Bakterien kein funktionierendes Rubisco herstellen konnten, wenn wir nur die DNA für das Protein in das Bakterienerbgut einbauen – ohne die entsprechenden Helferproteine konnte kein funktionstüchtiges Rubisco entstehen“, sagt Ulrich Hartl.

Nun können die Wissenschaftler daran gehen, Rubisco im Labor zu produzieren. Dazu wollen sie die DNA für Rubisco sowie für die beiden Chaperone und das Helferprotein in Bakterien einschleusen. Die sich rasend schnell vermehrenden Mikroorganismen stellen das Rubisco dann in ausreichender Menge her. Mit solchen Bakterien wollen die Forscher eine effizientere Rubisco-Variante finden. „Wenn wir die Rubisco-DNA in einen Bakterienstamm einbringen, der nur mit funktionierendem Rubisco überlebt, können wir

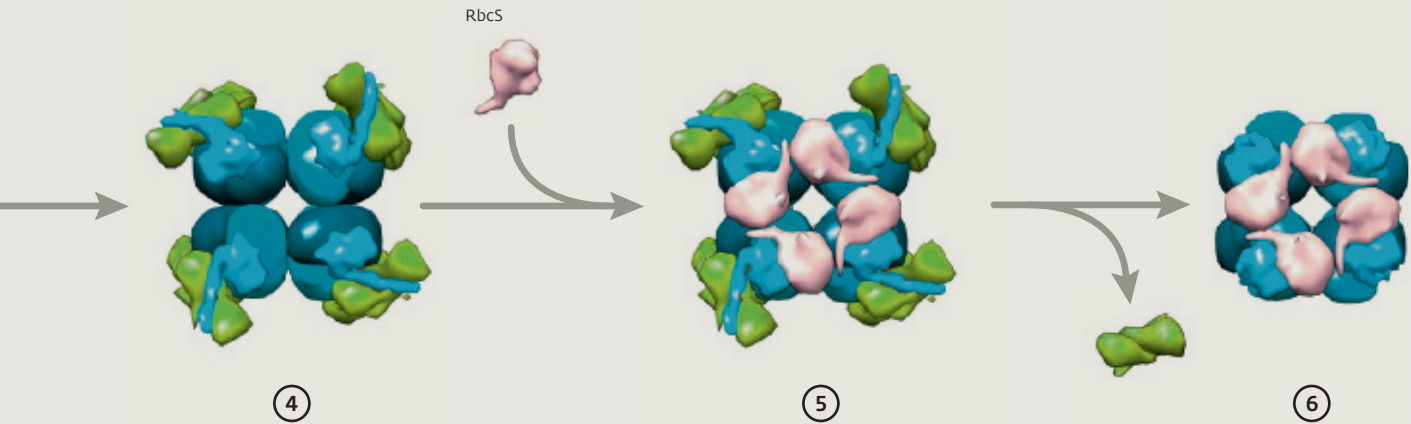
alle möglichen Mutationen im Rubisco-Gen testen und sofort sehen, wie gut die einzelnen Varianten arbeiten“, erklärt Ulrich Hartl.

### KANN DER MENSCH DIE NATUR ÜBERTREFFEN?

Mit diesem Verfahren lassen sich auch multiple Mutationen an unterschiedlichen Stellen im Rubisco-Gen erzeugen und untersuchen. Ein wichtiger Vorteil, denn möglicherweise lässt sich das Protein durch den Austausch einer einzelnen Aminosäure nicht weiter optimieren. Dies wäre eine Erklärung für die Frage, warum die Natur Rubisco nicht selbst im Laufe der Evolution an den zunehmenden Sauerstoffgehalt der Luft angepasst hat. Manche Wissenschaftler glauben, dass die Natur bereits eine optimale Struktur für Rubisco gefunden hat und Rubisco sich gar nicht verbessern lässt. Die Martinsrieder Wissenschaftler sind da anderer Ansicht. „Das Rubisco-Molekül der Pflanzen ist definitiv nicht die bestmögliche Variante. Manche Rotalgen besitzen nämlich eine noch effizientere Form. Dies zeigt: Es geht noch besser“, ist Ulrich Hartl überzeugt.

Mutationen zu finden, die Rubisco noch spezifischer für Kohlendioxid machen, stellt allerdings nicht die einzige Herausforderung dar. Denn die neuen Ergebnisse zeigen, dass ohne die passenden molekularen Anstandsdamen gar nichts geht. Anders als Rubisco selbst arbeitet RbcX äußerst selektiv und hilft ausschließlich dem natür-





### BAUPLAN EINER BAKTERIELLEN SOLARANLAGE

Wer von Licht lebt, wo es kaum Licht gibt, braucht dafür eine besondere Antenne. Die grünen Schwefelbakterien *Chlorobaculum tepidum*, die unter anderem in tiefen, dunklen Gewässerschichten leben, besitzen solche Antennen. Mit ihren Chlorosomen betreiben sie die effizientesten Solarkraftwerke der Natur: Zehn Prozent der Lichtenergie wandeln sie in chemische Energie, nämlich Zucker, um.

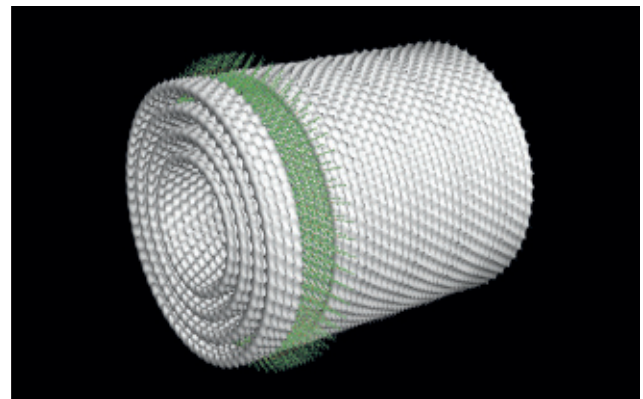
Daher untersucht Alfred R. Holzwarth mit seiner Arbeitsgruppe am Max-Planck-Institut für bioanorganische Chemie in Mülheim a. d. Ruhr die Chlorosomen – mit dem Ziel, die bakteriellen Solaranlagen zu kopieren. Diesem Ziel ist er ein Stück näher gekommen: Denn ein internationales Forscherteam, an dem neben Alfred Holzwarth und Michael Reus vom Mülheimer Max-Planck-Institut auch Wissenschaftler der Universitäten in Leiden und Groningen sowie der Penn State University in Philadelphia beteiligt waren, hat herausgefunden, wie die Chlorosomen gebaut sind.

Auf raffinierte Weise kombinieren die Forscher verschiedene Experimente und Berechnungen. So stellten sie fest, dass sich das Chlorophyll in den Chlorosomen zu Helices stapelt. „Bislang wurden verschiedene Möglichkeiten diskutiert, wie die einzelnen Chlorophyll-Komplexe nebeneinander angeordnet sind“, sagt Alfred Holzwarth: „Diese Frage haben wir jetzt geklärt.“ Und nicht nur diese: Auch von der Anordnung der Chlorophyll-Stapel gab es keine klaren Vorstellungen. Die meisten Forscher, die in den bakteriellen Solarkraftwerken Anregungen für die Biosprit-Produktion von morgen suchen, favorisierten Schichten. Eine falsche Vorstellung, wie das Forscherteam jetzt festgestellt hat: „Die einfachen Chlorophyll-Helices sind wiederum zu einer Helix aufgewickelt und bilden so eine Röhre“, erklärt Holzwarth. Und auch die einzelnen Röhren müssen sich noch einmal einer Ordnung unterwerfen: Mehrere Röhren mit unterschiedlichem Durchmesser stecken nämlich wie in einem Teleskopstab ineinander.

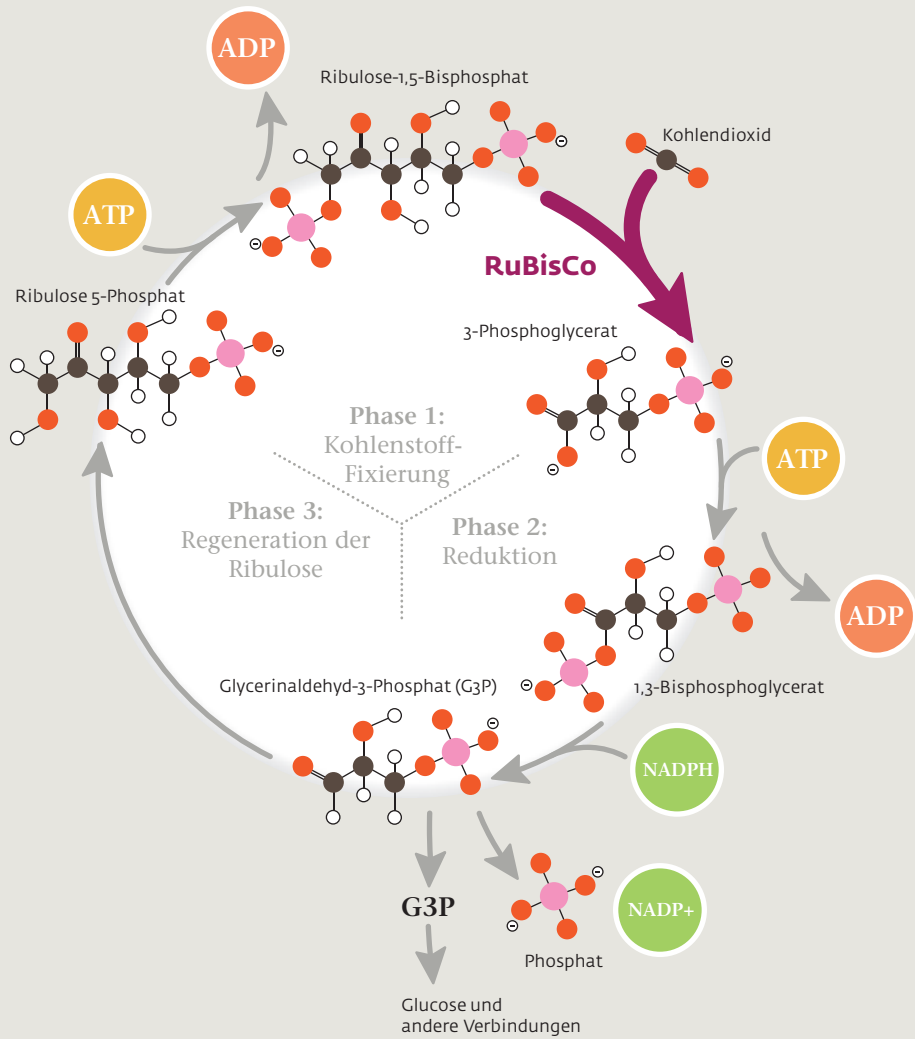
„Anders als in höheren Pflanzen entsteht diese komplexe hierarchische Struktur völlig selbstorganisiert“, sagt Holzwarth. In höheren Pflanzen greifen Proteine vermittelnd ein. „Da die Chlorosomen nur Chlorophyll enthalten, bieten sie sich als Vorbilder für selbstorganisierende technische Lichtantennen an“, sagt Alfred Holzwarth. Die Proteine in den Chloroplasten höherer Pflanzen lassen sich nämlich höchstens mit großem Aufwand imitieren.

Ehe Alfred Holzwarth und seine Mitarbeiter die Antennen für technische Zwecke nachahmen können, müssen sie erst noch einige prinzipielle Probleme lösen. „Wir wollen jetzt mehr darüber herausfinden, wie die Lichtabsorption in den Chlorosomen funktioniert“, sagt Holzwarth. Nur dann verspricht die Suche nach künstlichen Antennen mit ähnlicher Effizienz Erfolg. Doch auch das markiert nur die Hälfte der Strecke, bis sich die Sonnenenergie effizient in Biosprit binden lässt, wie Alfred Holzwarth erklärt: „Wir müssen die Antennen an ein einfaches System koppeln, das die eingefangene Lichtenergie in chemische Energie verwandelt, das also wie die Fotosynthese aus Kohlendioxid Zucker aufbaut oder aus Wasser Wasserstoff abspaltet.“

Peter Hergersberg

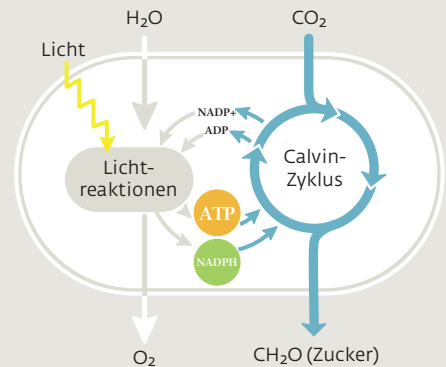


Im Chlorosom von *C. tepidum* ordnen sich die Chlorophylle in Spiralen an, die konzentrische Röhren bilden (grüner Ring: detaillierte Ansicht).



links: Umwandlung von Kohlendioxid im Calvin-Zyklus: Kohlenstoff tritt in den Zyklus in Form von Kohlendioxid ein und verlässt ihn als Zucker. Der Zyklus nutzt ATP als Energiequelle, NADPH liefert energiereiche Elektronen für die Bildung der Zuckermoleküle. Damit ein Zuckermolekül hergestellt werden kann, muss der Zyklus dreimal durchlaufen und müssen drei Kohlendioxid-Moleküle fixiert werden. Das Enzym Rubisco ermöglicht die Anlagerung von Kohlendioxid an den Zucker Ribulose-1,5-Bisphosphat (Kohlenstoff-Fixierung). In Phase 2 entsteht Glycerinaldehyd-3-Phosphat – ein Zucker mit drei Kohlenstoff-Atomen, aus dem die Pflanze andere organische Verbindungen bilden kann. In Phase 3 wird die Ribulose wieder regeneriert.

unten: In den Lichtreaktionen werden mithilfe von Lichtenergie energiearme Elektronen aus Wassermolekülen auf ein höheres Energieniveau gehoben und im NADPH gespeichert. Außerdem entsteht dabei ATP. Mit der im NADPH und ATP gespeicherten chemischen Energie kann dann im Calvin-Zyklus Zucker aufgebaut werden.



lichen Pflanzen-Rubisco bei der Faltung. Aus diesem Grund kann beispielsweise das Rotalgen-Rubisco bislang nicht auf Pflanzen übertragen werden – es wird dann einfach nicht korrekt gefaltet. Möglicherweise benötigt also auch eine optimierte Rubisco-Variante ihre individuellen Chaperone.

### ENERGIE MIT WENIGER WASSER

Trotz aller Schwierigkeiten, das Ziel ist lohnend: Einerseits könnten Algen oder Pflanzen mit einer optimierten Rubisco-Variante gegen den Anstieg der Kohlendioxid-Konzentration in der Atmosphäre eingesetzt werden. Darüber hinaus wären solche Turbo-Pflanzen mit ihrem deutlich schnelleren Wachstum von großer Bedeutung für die Landwirtschaft. „Wir könnten schon von einem um 10 bis 15 Prozent effizienteren Rubisco profitieren“, so Ulrich Hartl. Dabei geht es nicht nur darum, das Wachs-

tum von Pflanzen zu beschleunigen, sondern es in manchen Gebieten überhaupt erst zu ermöglichen. Denn eine effizientere Umwandlung von Kohlendioxid in Zucker senkt den Wasserverbrauch der Pflanze. Dadurch könnte

künftig Landwirtschaft in Gebieten möglich werden, die für heutige Nutzpflanzen zu trocken sind – und solche Gebiete werden sich angesichts der zunehmenden Wasserverknappung auf der Erde weiter ausbreiten. ◀

### GLOSSAR

**Chaperone** (engl. *chaperon*: Anstandsdame) Proteine können nur dann funktionieren, wenn ihre Aminosäureketten korrekt gefaltet sind. Ähnlich wie Anstandsdamen im 19. Jahrhundert junge Damen vor schädlichen Einflüssen bewahren sollten, sorgen spezielle Enzyme in Zellen dafür, dass Proteine nicht auf die schiefe Bahn geraten und die falsche Form annehmen. Manche Chaperone haben die Gestalt eines Fasses, in dem sich nur ein einziges Molekül falten kann. Ein Mangel an funktionstüchtigen Chaperonen kann die Verklumpung von Proteinen zur Folge haben und verschiedene Erkrankungen auslösen, etwa Alzheimer oder Chorea Huntington.

### Fotosynthese

Bei der Fotosynthese werden aus Kohlendioxid und Wasser mit Hilfe von Sonnenenergie Kohlenhydrate aufgebaut. Man kann sie in zwei miteinander gekoppelte Abschnitte unterteilen: Die Lichtreaktionen (Foto-Teil) stellen Energie bereit, damit Wasser in Elektronen und Protonen sowie Sauerstoff gespalten werden kann. Die energiereichen Elektronen und Protonen werden im sogenannten Calvin-Zyklus (Synthese-Teil) dazu genutzt, Kohlendioxid in Zucker umzuwandeln.



# Wis\_en

*fundiert*

Die auflagenstärkste hochschul- und  
wissenschaftspolitische Zeitschrift Deutschlands.  
Leseprobe unter: [www.forschung-und-lehre.de](http://www.forschung-und-lehre.de)  
oder per Fax 02 28 902 66-90

**Forschung  
& Lehre**

ALLES WAS DIE WISSENSCHAFT BEWEGT

Hauchdünn ist die Erdatmosphäre – und stark gefährdet. Daher arbeiten Forscher an Techniken, um den vom Menschen verursachten Klimawandel entgegenzuwirken. Gleichzeitig gilt es, für solche Großversuche die rechtlichen Grundlagen zu schaffen.





# Wenn der Mensch das Klima lenkt

Die Aussichten stehen auf Erwärmung, das globale Klima ändert sich. Wissenschaftler arbeiten daran, den Kohlenstoff-Kreislauf positiv zu beeinflussen. Doch lassen sich solche Verfahren – so sie überhaupt funktionieren – mit internationalen Normen vereinbaren? Das untersuchen Forscher wie **David Reichwein** vom **Max-Planck-Institut für ausländisches öffentliches Recht und Völkerrecht** in Heidelberg.

TEXT **BIRGIT FENZEL**

**K**ontrolle über das Klima ist ein uralter Menschheitstraum. In vielen Kulturen gab es Regenmacher, die mit spirituellen Kräften die Wettergötter gnädig zu stimmen versuchten. In der modernen Welt haben Klimaingenieure diese Rolle übernommen. Längst geht es nicht mehr bloß um Verfahren, mit denen sich Wolken „melken“, Hitze wellen abkühlen oder Stürme mildern lassen. Die Forscher suchen nach neuen Techniken, um unerwünschten Effekten des vom Menschen verursachten Klimawandels entgegenzuwirken.

Dieses Climate oder Geo Engineering gilt manchen als Wunderwaffe, die neben der Reduzierung von Treibhausgas und Anpassungsstrategien einen dritten Weg im Kampf gegen den bedrohlichen Anstieg der Temperaturen auf der Erde eröffnen könnte. Auch glauben längst nicht mehr alle daran, dass sich allein durch das Absenken der Kohlendioxid-Emissionen die globale Erwärmung aufhalten lässt.

Auf der Suche nach einer Klimaanlage für den Planeten scheinen dem Erfindungsreichtum der Geo-Ingenieure keine Grenzen gesetzt. Immer wieder sorgen sie mit neuen Vorschlägen für Schlagzeilen und kontroverse Diskussionen. Die Maßnahmen lassen sich grob in zwei Kategorien einteilen: Solche, die eine weitere Erwärmung der Erde durch eine Reduktion der Sonneneinstrahlung verhindern wollen, und solche, mit denen künstlich versucht werden soll, das emittierte Kohlendioxid wieder aus der Luft zu holen. Ein Beispiel für Letzteres bietet der Vorschlag, durch Eisendüngung das Wachstum von Meeresalgen zu fördern, die dafür wiederum hohe Mengen des Treibhausgases verbrauchen. Wenn die Algen absterben, verschwindet das Kohlendioxid mit den Überresten der Pflanze auf dem Meeresgrund.

Dass diese einleuchtende Lösung in der Praxis unverhoffte Resultate erbringen kann, haben die Wissenschaftler des Bremerhavener Alfred-Wegener-In-

stituts mit ihrem Experiment Lohafex beobachten dürfen. Sie hatten im Südatlantik östlich der Falklandinseln auf einer Fläche von etwa 300 Quadratkilometern Eisensulfat als Dünger für die Algen ins Meer gekippt. Zwar gediehen die Lebewesen nach Plan, doch tauchten plötzlich Schwärme von Kleinkrebsen auf und torpedierten mit ihrem großem Appetit das Klimaexperiment. Tatsächlich blieben am Ende nicht wesentlich mehr Algenreste übrig als ohne Dünger. So ließ sich auch nicht mehr Kohlendioxid im Ozean versenken.

## **KÜNSTLICHE WOLKEN SOLLEN ALS KÜHLUNG WIRKEN**

Zu den Vorschlägen, die einen weiteren globalen Temperaturanstieg nicht allein durch eine Verringerung von Kohlendioxid-Emissionen verhindern wollen, gehören auch jene, die auf der Vorstellung basieren, dass sich die Erde weniger aufheizt, wenn ein höherer Anteil der Sonnenstrahlen ins All reflek-

»» Das Scheitern von Geo-Engineering-Experimenten muss nicht immer so vergleichsweise harmlos verlaufen wie die Algendüngung im Südatlantik, bei der außer einigen übergewichtigen Ruderfußkrebsen kaum größerer Schaden für die Umwelt entstanden sein dürfte.

tiert wird. Diesen Effekt könnte man durch flächendeckende Installationen auf unserem Planeten erzielen – durch weiße Dächer etwa oder durch weiße Wolken, die man produziert, indem man von Schiffen aus salzhaltiges Wasser fein zerstäubt über den südlichen Ozeanen versprüht. Die Salzkristalle führten als zusätzliche Kondensationskeime bei der Verdunstung zu einer größeren Anzahl von Wassertröpfchen in den Wolken. Dadurch würden diese deutlich heller und entsprechend mehr Sonnenlicht reflektieren.

Zu den eindeutigen Favoriten der Klimaingenieure gehört jedoch der Vorschlag, mit dem der Chemie-Nobelpreisträger Paul Crutzen vor gut vier Jahren für gehörigen Wirbel gesorgt hatte: Schwefeldioxid in die obere Strato-

sphäre zu bringen, wo es zu Schwefelsäure oxidiert, die wiederum zu kleinen Partikeln kondensiert. Die Idee, eine Art Sonnenschirm über der Erde zu bilden, führte zu lebhaften Kontroversen unter Wissenschaftlern und in den Medien.

### EIN GROSSVERSUCH MIT UNKALKULIERBAREN RISIKEN

Für diese Methode spricht nach Auffassung ihrer Anhänger, dass sie preiswert ist, sich technisch ohne größere Probleme umsetzen lässt und vor allem im Notfall schnell wirkt. Als Argument für Letzteres wird gern der Ausbruch des Vulkans Pinatubo von 1991 angeführt: Dabei waren ungefähr zehn Millionen Tonnen Schwefeldioxid in die Stratosphäre gelangt, wo sie sich durch chemische Prozesse teilweise in Sulfatpartikel umwandelten. Diese winzigen Schwebeteilchen haben nach Auffassung der Forscher dazu geführt, dass im Folgejahr die Temperatur auf der Erde um durchschnittlich 0,5 Grad Celsius zurückging.

Gegner der Klimatherapie durch Schwefeldioxid führen jedoch die Unwägbarkeit der Risiken dieses Modells ins Feld. „Niemand weiß bisher genau, welche Folgen ein solches Experiment auf das globale Klimasystem haben könnte und wie unterschiedlich einzelne Regionen davon betroffen wären“, sagt der Rechtswissenschaftler David Reichwein, der sich für seine Dissertation am Max-Planck-Institut für aus-

ländisches öffentliches Recht und Völkerrecht mit den rechtlichen Grenzen und der Regulierung des Geo Engineering beschäftigt.

Denn das Scheitern von Geo-Engineering-Experimenten muss nicht immer so vergleichsweise harmlos verlaufen wie die Algendüngung im Südatlantik, bei der außer einigen übergewichtigen Ruderfußkrebsen kaum größerer Schaden für die Umwelt entstanden sein dürfte. „Doch auch bei diesem Versuch, das Kohlendioxid aus dem Kreislauf herauszubekommen, droht bei einem großflächigen Einsatz eine erhebliche Störung des ökologischen Gleichgewichts“, so Reichwein.

Bei seinen Recherchen stieß der Forscher etwa auf verschiedene ernst zu nehmende Studien, die sich mit den unerwünschten Nebenwirkungen der Klimatherapie durch Aerosolschirme in der Stratosphäre befassen. Als Beispiel nennt er eine Studie vom November vergangenen Jahres: Auf Grundlage ihrer Modelle kommen Patricia Heckenroth vom Institute for Atmospheric and Climate Sciences der ETH Zürich und ihre Kollegen zu dem Ergebnis, dass beim Einsatz von Schwefelaerosolen in der Stratosphäre mit einem erheblichen Abbau der Ozonschicht zu rechnen ist.

Auch sind laut Reichwein nach dem Vulkanausbruch auf den Philippinen im Jahr 1991 Verschiebungen der Niederschlagszonen beobachtet worden, was bei einem groß angelegten Klima-

Historisches Ambiente: Das Marsilius-Kolleg ist im 1722 errichteten Haus Buhl untergebracht.







Der Völkerrechtler David Reichwein (links) befasst sich am Marsilius-Kolleg mit Ideen zur Rettung aus der Klimakrise und schätzt dabei den interdisziplinären Ansatz des jungen Teams (auf dem rechten Bild von links: Reichwein, Hannes Fernow, Wolfgang Dietz, Melanie Bräunche, Stephanie Uther, Daniel Heyen).

experiment durchaus zu den unerwünschten Nebeneffekten gehören könnte. In einem solchen Fall könnten die Folgen verheerend sein – zumindest für die Bewohner jener Regionen, die plötzlich auf dem Trockenen sitzen oder deren Felder nach Regenfluten versinken. „Das Problem hierbei ist, dass man die Folgen nicht einfach im Versuch ausprobieren kann, denn nicht alle Risiken sind im kleinen Rahmen oder in einer Simulation erkennbar“, sagt David Reichwein. „Mit dem ersten großflächigen Einsatz stellen sich auch die Konsequenzen ein.“ Zudem müsste jedenfalls die Aerosolinjektion über einen längeren Zeitraum betrieben werden, um nicht bei einem Injektionsstopp eine möglicherweise noch rasantere Erderwärmung zu bewirken.

## EIN VERHALTENSKODEX FÜR DIE FORSCHUNG

Diese Unsicherheit über die Risiken und Folgen gezielter technischer Eingriffe in die Klimaanlage des Planeten treffe auf so gut wie alle Vorschläge aus dem Climate Engineering zu, sagt Reichwein. Der 24-jährige Völkerrechtler gehört zu jenem Team junger Forscher, die sich im Rahmen des Projekts „The Global Governance of Climate Engineering“ am Marsilius-Kolleg der Universität Heidelberg mit den unterschiedlichen Ideen zur Rettung aus der Klimakrise befassen. Dabei arbeiten die Wissenschaftler interdisziplinär und

konzentrieren sich auf die vielfältigen Zusammenhänge zwischen technologischen, ökonomischen, kulturellen, politischen, sozialen, psychologischen und rechtlichen Aspekten.

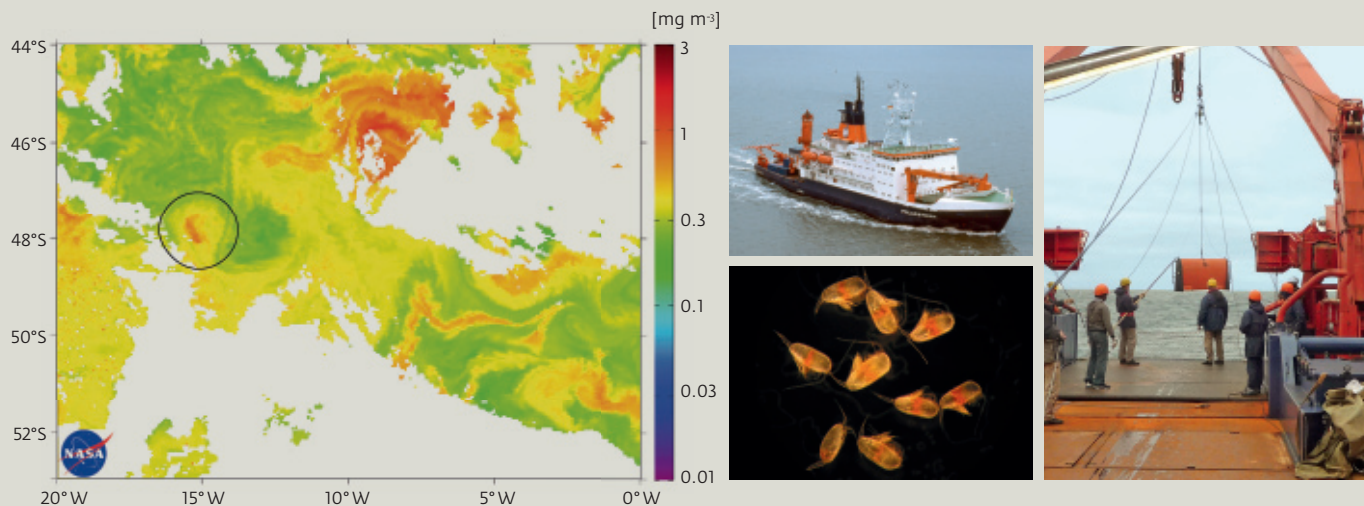
Gemeinsames Ziel ist es, im Austausch die Chancen und Risiken eines gelenkten globalen Klimas aus einer Vielzahl von Perspektiven zu betrachten sowie einen Verhaltenskodex in der Forschung bei unkalkulierbaren Nebenwirkungen der möglichen Techniken zu erarbeiten. „Unter anderem geht es um die technisch-ökonomische Machbarkeit der Vorschläge“, sagt Reichwein. Außerdem soll untersucht werden, wie sich globale Klimamodelle mit geografischen und sozioökonomischen Daten verknüpfen lassen.

So beschäftigen sich die Umweltphysiker des Kollegs damit, realistische Szenarien für unterschiedliche Verfahren, insbesondere zur künstlichen Wolkenbildung, zu erstellen und zu vergleichen. Philosophen und Psychologen beleuchten die Wahrnehmung von Climate-Engineering-Technologien in der Bevölkerung und deren Bereitschaft, in diese zu investieren. Wirtschaftswissenschaftler untersuchen Spieltheorien zu Kosten und Nutzen sowie zur ökonomischen Machbarkeit der Techniken. Humangeografen und Politikwissenschaftler beschäftigen sich mit öffentlichen Diskursen, politischen Strategien und der räumlichen Verteilung der Folgen von Maßnahmen des Climate Engineering.

Auf Grundlage seiner Erfahrung im internationalen Seerecht und Umweltrecht beteiligt sich das Max-Planck-Institut für ausländisches öffentliches Recht und Völkerrecht unter Leitung von Direktor Rüdiger Wolfrum als einzige außeruniversitäre Forschungseinrichtung an diesem Marsilius-Projekt der Heidelberger Universität. Anstoß war ein Rechtsgutachten zur Zulässigkeit der Eisendüngungsforschung. Reichweins Part in dem Gemeinschaftsprojekt liegt in der Modellierung eines möglichen völkerrechtlichen Vertrags aus politischer, ökonomischer und rechtlicher Sicht.

Inwieweit lassen sich die Forschungen und Modelle des Geo Engineering mit dem Völkerrecht vereinbaren? Das ist die Frage, mit der sich Reichwein in den nächsten drei Jahren unter anderem beschäftigen wird. „Ich finde es einfach spannend, in großen Kategorien zu denken“, begründet der Max-Planck-Forscher seine Vorliebe für globale Fragestellungen. Schon beim Studium an der Bucerius Law School in Hamburg hatte er den Schwerpunkt Europäisches und Internationales Recht gewählt. Dass er sich mit seiner Entscheidung für dieses Projekt in juristisches Neuland begibt, war ihm von Anfang an klar.

Wie weit jedoch dieses Gebiet jenseits des Bodens gesicherter Fakten und Gesetze liegt, wusste Reichwein vor einem halben Jahr noch nicht. „Sicher ist hier nur, dass nichts sicher ist“, beschreibt er die vage Ausgangslage seiner Forschungen. Diese Ungewissheit herr-



Das Meer zum Blühen gebracht hat das Experiment Lohafex. Die mit Eisensulfat gedüngten Algen gediehen prächtig (Kreis auf der Satelitenaufnahme, links), wurden aber von Kleinkrebsen aufgefrassen. Fazit: Klimaexperimente können durchaus unerwünschte Nebenwirkungen haben – und bedürfen nicht nur deshalb einer verbindlichen Rechtsgrundlage.

sche nicht nur hinsichtlich der technischen Machbarkeit und der Nebenwirkungen gezielter Klimamanipulationen, sondern erstreckte sich auch auf die juristische Ebene: „Geo Engineering hat noch keinen Eingang in völkerrechtliche Verträge gefunden.“

## LÜCKEN IM INTERNATIONALEN RECHT

Angesichts der globalen Dimensionen und der hohen Risiken der Klimamanipulationen stellten sich gleich eine Reihe grundsätzlicher Fragen zur Legitimation. „Wie etwa kann sichergestellt werden, dass Entscheidungen für den Einsatz einer Technik aufgrund solider wissenschaftlicher Basis gefällt werden?“, so Reichwein. Für diese Grundsatfrage gebe es im internationalen Recht noch keine Vorschrift. Außerdem müsse dringend geklärt werden, wem das Recht zustehen soll, solche möglicherweise folgenschweren Eingriffe ins Klimasystem vorzunehmen. „Darf das nur die Staatengemeinschaft oder ein Land alleine?“

Schließlich gebe es inzwischen durchaus Vorschläge, die – wie das Projekt zum Ausbringen von Schwefeldioxid in der Stratosphäre – finanziell wie auch technisch durchaus im nationalen Alleingang zu bewältigen seien. Das

stellt auch einen gravierenden rechtlichen Unterschied zu den Strategien zur Kohlendioxid-Reduktion dar, die nur von der Staatengemeinschaft gemeinsam bewältigt werden können. Was aber passiert, wenn es durch den Einsatz eines solchen Verfahrens zu extremen Wetterveränderungen in anderen Regionen der Welt kommt – etwa zu Kälteeinbrüchen oder Starkregen und in Folge zu Missernten, Überflutungen oder anderen fatalen Folgen?

Mit diesen Fragen muss sich David Reichwein ebenfalls beschäftigen. Denn in einem solchen Fall benötige man auch rechtliche Grundlagen, nach denen Ansprüche auf Schadenersatz oder Kompensation für jene, deren Lebensraum durch Manipulationen des Klimas in Mitleidenschaft gezogen wurde, geklärt werden können. Selbst wenn Letzteres in einem völkerrechtlichen Vertrag zwischen den beteiligten Akteuren geregelt sein sollte, bleibe immer noch grundsätzlich zu klären, wie im Umgang mit Risiken und Unsicherheiten generell rechtlich zu verfahren sei.

Mit seiner Arbeit will der Völkerrechtler dazu beitragen, zumindest auf der Rechtsebene für klarere Verhältnisse zu sorgen. Seit Dezember 2009 befasst er sich neben der juristischen Lektüre mit den naturwissenschaftlichen Grundlagen von Climate Engineering.

Das sei zuweilen harte Kost, kommentiert er seine Bemühungen, sein naturwissenschaftlich-technisches Wissen auf den Stand der Dinge zu bringen. Sehr erhellend seien da die Gespräche und Workshops mit den anderen Doktoranden des Marsilius-Projekts, die im Abstand von zwei Wochen stattfinden. „Da werden viele meiner Fragen beantwortet. Die Herangehensweise aus unterschiedlichen Blickwinkeln ist hilfreich und spannend“, sagt Reichwein.

Die offenen völkerrechtlichen Fragestellungen muss er allerdings im Alleingang bearbeiten. „Ich muss dabei zwischen den unterschiedlichen angeordneten Maßnahmen differenzieren“, beschreibt er seine Vorgehensweise. So gehe es darum, rechtlich zu bewerten, ob bereits bestehende völkerrechtliche Verträge oder das Völkergewohnheitsrecht die gezielte aktive Klimabeeinflussung untersagen oder andere rechtlich verbindliche Aussagen über sie treffen. „Für den Einsatz von Schwefelsulfiten in der Stratosphäre sind unter anderem die ENMOD-Konvention, das Übereinkommen über weiträumige grenzüberschreitende Luftverunreinigung sowie das Wiener Übereinkommen zum Schutz der Ozonschicht zu beachten“, nennt Reichwein einige Beispiele aus bestehendem Recht, die zumindest teilweise auf Geo Engineering zutreffen.





Teilchenschleuder: Ungefähr zehn Millionen Tonnen Schwefeldioxid hat der Vulkan Pinatubo bei seinem Ausbruch 1991 in die Stratosphäre geblasen. Das Schwefeldioxid wandelte sich teilweise in Sulfatpartikel um, die offenbar im Folgejahr die Temperatur auf der Erde um durchschnittlich ein halbes Grad Celsius senkten.

Den Maßnahmen der Eisendüngung könnten unter anderem die London-Konvention – ein Übereinkommen über die Verhütung der Meeresverschmutzung durch das Einbringen von Abfällen und anderen Stoffen –, die UN-Seerechtskonvention und das Abkommen über die biologische Vielfalt entgegenstehen. David Reichwein: „Zu beachten ist ebenfalls das völkergewohnheitsrechtliche Verbot der grenzüberschreitenden Umweltbeeinträchtigung. Das untersagt jedem Staat, auf seinem Territorium Aktivitäten zu entfalten oder zuzulassen, von denen erhebliche grenzüberschreitende Umweltbeeinträchtigungen ausgehen können.“

### EIN KONSENS UNTER DEN STAATEN WIRD SCHWIERIG

Im zweiten Teil seiner Arbeit will der junge Forscher zunächst die unterschiedlichen umweltrechtlich relevanten rechtlichen und nicht-rechtlichen Handlungsformen suchen, die sich global anwenden lassen. „Die Palette reicht dabei von einem multilateralen völkerrechtlichen Vertrag über unilaterales Vorgehen bis zu einem kompletten Verbot von Geo-Engineering-Maßnahmen“, erklärt er. „Danach schaue ich, welche als Rechtsinstrumente zu Climate Engineering passen

könnten, wie sie ausgeformt sein müssten und welche Vor- und Nachteile sie mit sich bringen.“ Wünschenswert wäre aus völkerrechtlicher Perspektive sicherlich ein verbindlicher Vertrag der Staaten, ebenso ein Nachfolgeabkommen zum Kyoto-Protokoll für die gemeinsamen Bemühungen zur Kohlendioxid-Reduktion.

Dass dies während der Klimaverhandlungen in Kopenhagen noch nicht gelungen sei, zeige aber deutlich die Schwierigkeit, in der Staatengemeinschaft einen Konsens herzustellen. „Angesichts der potenziellen Risiken und Nebenwirkungen der Klimamanipulationen, die überdies regional sehr unterschiedlich ausfallen können, dürfte dies für die Techniken des Climate Engineering kaum einfacher laufen“, vermutet Reichwein. Der Forscher sieht seine Aufgabe jedoch nicht darin, zu klären, ob man solche Klimamanipulationen überhaupt erlauben sollte: „Das fällt ebenso wenig in eine völkerrechtliche Beurteilung wie eine moralische Bewertung solcher Eingriffe.“

Vielmehr wollen er und seine Kollegen dazu beitragen, dass zukünftig solche Diskussionen und Entscheidungen über mögliche Maßnahmen auf rechtlich gesichertem Grund geführt werden können. Schließlich könnte es ja sein, dass die Maßnahmen zur Koh-

lendioxid-Reduktion nicht ausreichen. „In diesem Fall brauchen die Klimaschützer einen Plan B. Und vielleicht kann ich ja als kleines Rädchen durch meine Arbeit zu einem Teil dazu beitragen, den Klimawandel aufzuhalten“, sagt David Reichwein. ◀

### GLOSSAR

#### Aerosole

Gemische aus Schwebeteilchen (Aerosolpartikel) und einem Gas. Die Teilchen spielen eine wichtige Rolle bei der Bildung von Wolkentröpfchen und haben großen Einfluss auf das Klima.

#### Alfred-Wegener-Institut

Benannt nach dem gleichnamigen Polarforscher und Geowissenschaftler, wurde das Alfred-Wegener Institut (AWI) am 15. Juli 1980 in Bremerhaven gegründet. Es beschäftigt sich mit Meeresbiologie, -geologie sowie Klimaforschung und gehört zur Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren.

#### Stratosphäre

Atmosphärenschicht, die über der Troposphäre liegt und bis in eine Höhe von etwa 50 Kilometern reicht. Die Stratosphäre enthält vergleichsweise viel Ozon.

#### Völkerrecht

Das Völkerrecht ist eine überstaatliche Rechtsordnung, welche die Beziehungen zwischen den Staaten auf der Grundlage der Gleichrangigkeit regelt.

# Winter auf Balkonien

Manche Zugvögel können Zugverhalten rasch an Klimawandel anpassen

Zugvögel könnten Leidtragende des Klimawandels sein. Sie müssen nicht nur anstrengende und gefährvolle Reisen zwischen ihren Sommer- und Wintergebieten unternehmen, sie geraten auch bei der Revier- und Nistplatzsuche ge-

genüber ihren nicht ziehenden Konkurrenten ins Hintertreffen. Möglicherweise kann sich jedoch zumindest ein Teil der Arten schneller an die Klimaerwärmung anpassen als angenommen, indem die Vögel ihr Zugverhalten ändern. Francisco Pulido und Peter Berthold vom Max-Planck-Institut für Ornithologie in Radolfzell haben nämlich festgestellt, dass aus Zugvögeln innerhalb kurzer Zeit Nichtzieher werden können. Sie verpaarten dabei im Labor gezielt Nestlinge von Mönchsgrasmücken mit der geringsten Zugaktivität – gemessen anhand der sogenannten Zugruhe. Die Dauer der Zugruhe, die sich in nächtlichem Flattern und Hüpfen auf der Sitzstange äußert, entspricht in etwa der Dauer des Fluges ins Überwinterungsgebiet. Da die Forscher gezielt Individuen mit geringer Zugakti-

vität bevorzugten, legten immer mehr Tiere der Folgegenerationen immer kürzere Strecken zurück, und der Anteil nicht ziehender Tiere nahm zu. Aus Teilerpopulationen wurden schließlich Populationen, die gar nicht mehr in die Überwinterungsgebiete flogen. Bereits nach zwei Generationen waren die ersten Standvögel in dieser Population aus ursprünglich reinen Zugvögeln zu finden. „Wir nehmen an, dass die Verkürzung der Zugstrecke der erste und wichtigste evolutionäre Mechanismus ist, mit dem sich Vögel an veränderte klimatische Bedingungen anpassen“, erläutert Francisco Pulido. Allerdings funktioniert dies nur bei Vögeln, die kurze bis mittlere Strecken von etwa 1000 Kilometern ziehen und bei denen das Zugverhalten genetisch bestimmt ist. Bei Langstreckenziehern, die unterwegs Wüsten oder Meere überqueren müssen, kann dieser Anpassungsmechanismus dagegen nicht funktionieren. Für sie würde eine verkürzte Zugstrecke und Überwinterung auf dem Meer oder in der Wüste den sicheren Tod bedeuten.

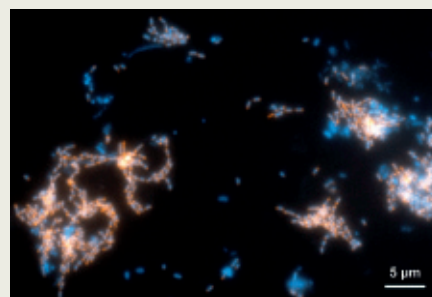


.....  
Aus Zug- werden Standvögel: innerhalb kürzester Zeit ändern Mönchsgrasmücken ihr Verhalten.

## Sauerstoff vom wunderbaren Methan-Fresser

Pflanzen und Blaualgen besaßen bislang ein Monopol auf die Bildung von Sauerstoff. Nun haben sie Konkurrenz bekommen – von einem neu entdeckten Süßwasserbakterium mit Namen *Methylomirabilis oxyfera* („wunderbarer Methan-Fresser, der Sauerstoff produziert“). Ein internationales Wissenschaftlerteam hat nachgewiesen, dass dieses Bakterium Sauerstoff produziert und dafür nicht einmal Licht benötigt. Während Pflanzen und Blaualgen den Sauerstoff während der Photosynthese von Wassermolekülen abspalten, nutzt *Methylomirabilis* Sauerstoff, der in Nitritmolekülen enthalten ist. Es setzt allerdings keine Sauerstoffmoleküle frei, sondern oxidiert damit das reaktionsträge Methan und gewinnt daraus Energie. Dabei profitiert *Methylomirabilis* davon, dass Nitrit durch intensive Düngung auf landwirtschaftlich genutzten Flächen reichlich im Süßwasser vorkommt. „Möglicherweise ist dieser

Reaktionsweg das Missing Link, das vor Milliarden Jahren die Evolution der Photosynthese und der Sauerstoffproduktion ermöglichte“, sagt Marc Strous vom Max-Planck-Institut für marine Mikrobiologie in Bremen. (NATURE, 25. März 2010)

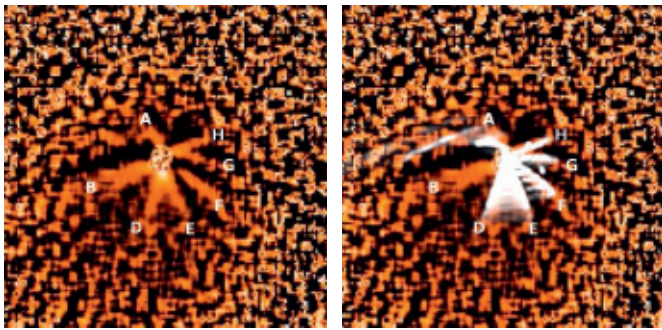


Der neu entdeckte Mikroorganismus *Methylomirabilis oxyfera* unter dem Fluoreszenz-Mikroskop



# Wo Kometen Staub spucken

Wissenschaftler bestimmen die aktiven Regionen auf der Oberfläche von Kometen



Ein Blick auf den Kometen Tempel 1 durchs Teleskop. Die aktiven Regionen machen sich als helle Strahlen bemerkbar (links). Mithilfe der Computersimulation der Max-Planck-Forscher gelingt es, das von der Erde aus aufgenommene Bild zu rekonstruieren (rechts).

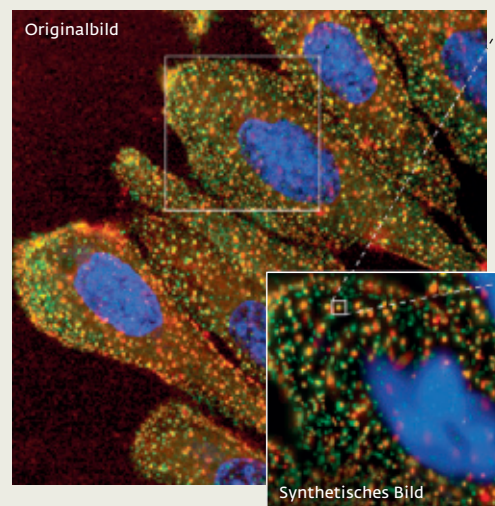
Kometen sind gefährliche Forschungsobjekte – zumindest aus der Nähe. Denn die winzigen Staubeilchen, die von den aktiven Regionen auf der Oberfläche ins All strömen, können Raumsonden beschädigen. Wo genau diese Fontänen ihren Ursprung haben, lässt sich von der Erde aus nicht ohne Weiteres bestimmen. Wissenschaftler aus dem Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung in Katlenburg-Lindau haben jetzt ein Computermodell entwickelt, das diese Regionen anhand von bodengebundenen Aufnahmen lokalisiert. Dabei wählten sie einen indirekten Zugang, der erstmals auch die

dreidimensionale Gestalt des Kometenkerns berücksichtigt, und griffen auf ein Standardverfahren zurück: Beobachtet man einen Kometen während seiner gesamten Umdrehungsperiode durchs Teleskop, lässt die Veränderung seiner Leuchtkraft Rückschlüsse auf die Form des Kerns zu. In einem nächsten Schritt fütterten die Forscher ihr Programm mit einer Anfangsvermutung darüber, wo sich die aktiven Regionen befinden. Zudem machten sie Annahmen über einige physikalische Parameter der Staubeilchen wie Größe und Startgeschwindigkeit beim Verlassen der Kernoberfläche. Als Ergebnis liefert die Computersimulation ein Bild, wie es ein Teleskop von der Erde aus aufnehmen würde. Durch Vergleich mit dem echten Blick durchs Fernrohr lassen sich dann die modellierten Bilder immer weiter verfeinern, bis Simulation und echte Aufnahme übereinstimmen. Das neue Verfahren könnte helfen, eine sichere Flugroute für die ESA-Raumsonde *Rosetta* zu berechnen, die 2014 am Kometen Churyumov-Gerasimenko ankommen soll. (ASTRONOMY & ASTROPHYSICS, 512, A60, 2010)

## Fingerabdruck für Gene

Zellen haben zwar keinen Mund, trotzdem können sie Stoffe aus der Außenwelt aufnehmen. Sie nehmen Fremdmaterial auf, indem sie Bläschen von ihrer Zellmembran abschnüren, die in ihrem Innern Substanzen von außen einschließen. Je nach Inhaltsstoff werden diese Vesikel – auch Endosomen genannt – an unterschiedliche Orte innerhalb der Zelle transportiert und dort weiter verarbeitet und abgebaut. Dresdner Wissenschaftler um Marino Zerial vom dortigen Max-Planck-Institut für molekulare Zellbiologie und Genetik haben mit einer neuen Strategie rund 4000 Gene identifiziert, die direkt oder indirekt an der Endozytose beteiligt sind. Wenn einzelne Gene ausfallen, bleiben Vesikel in der Peripherie der Zellen stecken und gelangen nicht ins Zentrum. Zudem werden unterschiedliche Stoffe offenbar jeweils von anderen Genen an ihr Ziel dirigiert. Die enorme Anzahl an beteiligten Genen spiegelt die Bedeutung der Endozytose im Organismus

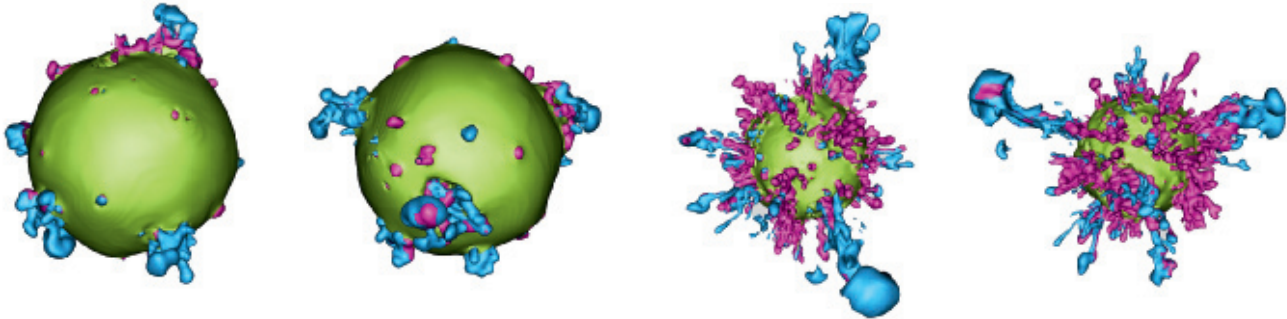
wider. So hängt nicht nur die Bildung wichtiger Stoffwechselprodukte wie Insulin von der Endozytose ab, sondern auch Viren nutzen Endosomen, um Zellen zu infizieren. Ermöglicht hat diese Erkenntnisse eine Kombination mehrerer Techniken. Die Dresdner Wissenschaftler blockierten nacheinander jedes der rund 24.000 menschlichen Gene mithilfe von RNA-Molekülen (siRNAs), die sich an bestimmte Abschnitte im Erbgut anlagern und das zugehörige Gen stumm schalten. Mithilfe von Fluoreszenzfarbstoffen und automatischer Bildauswertung konnten sie jedem Gen eine bestimmte Funktion bei der Endozytose zuordnen und von jedem Gen ein quantitatives Profil erstellen – jedes Gen erhält also einen individuellen Fingerabdruck. (NATURE, 28. Februar 2010)



Zellen mit rot und grün eingefärbten Endosomen sowie markierten Zellkernen (blau). Aus der Leuchtintensität der markierten Zellorganellen wird ein synthetisches Abbild geformt (kleines Bild unten). Das kleine Bild rechts oben zeigt das berechnete 3-D-Modell eines einzelnen Endosoms.

# Stermentod in drei Dimensionen

Neue Computermodelle zeigen im Detail, wie Supernovae in Form kommen



Der Stern stirbt in 3-D – aber nicht im Weltall, sondern am Computerbildschirm: Zum ersten Mal ist es gelungen, mit komplexen Berechnungen den Tod einer massereichen Sonne in allen drei Raumdimensionen nachzustellen. Die Simulationen umfassen lückenlos die Zeit vom Beginn der Explosion bis zum Ausbruch der Explosionswelle aus der Sternoberfläche mehrere Stunden später. Dabei zeigen die Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für Astrophysik in ihren Modellen unter anderem, wie bei „echten“ Supernovae Asymmetrien entstehen. Bisherige Simulatio-

nen in zwei Dimensionen offenbarten zwar, dass die kugelförmige Schalenstruktur des Vorgängersterns bei der Supernova-Explosion zerstört wird und dass eine Vermischung auf großen Skalen stattfindet. Aber Details blieben verborgen. Als Prüfstein diente die Supernova 1987 A – wohl die am besten untersuchte Sternkatastrophe. In zukünftigen Simulationen werden die Forscher eine größere Bandbreite an Vorläufersternen und Anfangsbedingungen untersuchen. Zudem wollen sie ein Modell formulieren, das alle beobachteten Charakteristika von SN 1987A

Der Stern stirbt in 3-D: Diese Standbilder zeigen jeweils aus zwei unterschiedlichen Blickwinkeln, wie weit bestimmte Elemente in der Explosion nach außen transportiert werden. Die beiden Bilder links stellen die Situation nach 350 Sekunden dar, die beiden Bilder rechts nach etwa 9000 Sekunden, kurz nachdem die Stoßwelle die Sternoberfläche durchbrochen hat. Die farbigen Oberflächen entsprechen dabei den am weitesten außen liegenden Orten, an denen Kohlenstoff (grün), Sauerstoff (rot) und Nickel (blau) mit einer bestimmten Häufigkeit vorliegen.

.....  
erklärt, und herausfinden, wie die Sternexplosion beginnt und was sie auslöst. (ASTROPHYSICAL JOURNAL, 10. Mai 2010)

## Stickstoff bindet Treibhausgas

Stickstoff im Boden reduziert den Treibhauseffekt. Und das nicht nur als Dünger, mit dessen Hilfe Pflanzen Kohlendioxid aus der Atmosphäre binden. Zumindest in Wäldern der gemäßigten Breiten bremst der Nährstoff auch den

Abbau von organischem Material im Boden, sodass aus der Erde weniger Kohlendioxid in die Atmosphäre entweicht. Zu diesem Ergebnis kommt ein internationales Forscherteam, an dem auch Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für Biogeochemie in Jena beteiligt sind. Die Forscher haben Daten von verschiedenen Feldstudien und Laborexperimenten zusammengetragen. Demnach setzen die Mikroorganismen in den meisten Böden bei mäßigem Eintrag von Stickstoff weniger Kohlendioxid frei,

nicht zuletzt weil das reichliche Angebot an Stickstoff die Mikrogen-Gesellschaft verändert und den Mikroorganismen die Mühe erspart, sich aus schwer verdaulichen holzigen Pflanzenabfällen mit dem Nährstoff zu versorgen. Im Schnitt sinkt der Kohlendioxid-Ausstoß aus dem Boden so um zehn Prozent. Damit ist dieser Effekt etwa so groß wie die Wirkung des verstärkten Pflanzenwachstums. Dennoch, so monieren die Forscher, werde er in derzeitigen Modellen des Kohlenstoffkreislaufs vernachlässigt. (NATURE GEOSCIENCE, Mai 2010)



.....  
Bodenproben auf dem Tablett: Die Ergebnisse ihrer Analysen sammeln die Jenaer Forscher in der FluxNet-Datenbank. Die Proben geben Aufschluss über den Kohlenstoffhaushalt des Bodens.



# Kosmische Kraftwerke der ersten Generation

Mit dem Weltraumteleskop Spitzer spüren Astronomen urtümliche Quasare auf

Bisher gab es sie nur in den Modellen der Astronomen: Urtümliche Schwarze Löcher, welche die Kerne aktiver Galaxien besiedeln und bereits im jungen Universum existierten. Jetzt haben Forscher gleich zwei solcher Schwerkraftmonster aufgespürt: Sie verorten sich als Quasare, und ihr Licht stammt aus einer Zeit, in der das All gerade einmal eine Milliarde Jahre alt war; wir beobachten sie so, wie sie vor 12,7 Milliarden Jahren ausgesehen haben. Ein Quasar ist die Zentralregion einer Galaxie, in der ein aktives Schwarzes Loch sitzt. Dieses liegt in einer hell leuchtenden Scheibe, die wiederum von einem riesigen Staubtorus umgeben ist.

Mit dem Weltraumteleskop Spitzer haben Astronomen, unter anderem aus den Max-Planck-Instituten für Astronomie in Heidelberg und für extraterrestrische Physik in Garching, nun 20 Quasare im Infrarotlicht beobachtet. In diesem Spektralbereich lässt sich die charakteristische Strahlung von heißem Staub

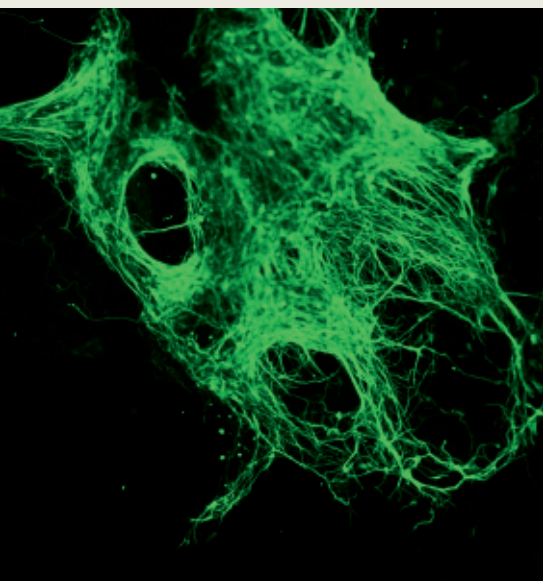
identifizieren – und solcher Staub ist typischer Bestandteil moderner Quasare. Bei zwei der untersuchten Quasare gab es jedoch keinerlei Anzeichen für heißen Staub. Es muss sich bei ihnen um frühe, primitive Exemplare handeln, denn im jungen Weltall gab es noch keinen Staub. Zudem fanden die Forscher bei den entferntesten Quasaren einen Zusammenhang zwischen der Masse des Schwarzen Lochs und dem Staubgehalt: Je mehr Masse das zentrale Schwarze Loch besitzt, umso mehr Staub enthält der Quasar. Das deutet auf einen Entwicklungsprozess hin, bei dem das Schwarze Loch rasch wächst, indem es sich Materie einverleibt, während gleichzeitig mehr und mehr heißer Staub produziert wird. (NATURE, 18. März 2010)



Infrarotauge: Mit dem Weltraumteleskop Spitzer haben Astronomen jetzt die primitivsten Schwarzen Löcher im Universum entdeckt.

Fotos: NASA/JPL-Caltech (oben), MPI für molekulare Biomedizin – Boris Greber

## Menschliche Stammzellen bleiben unverzichtbar



Die Maus ist einer der wichtigsten Modellorganismen der Stammzellforschung. So dürfen Wissenschaftler in Deutschland nur dann an menschlichen embryonalen Stammzellen forschen, wenn sie zuvor tierische Zellen untersucht haben. Doch solche Tests sind häufig nutzlos, denn Erkenntnisse aus Untersuchungen an embryonalen Stammzellen von Mäusen lassen sich trotz aller Gemeinsamkeiten nicht ohne Weiteres auf den Menschen übertragen. Eine aktuelle Untersuchung von Forschern um Hans Schöler vom Max-Planck-Institut für molekulare Biomedizin in Münster zeigt, dass sogenannte Epiblast-Stammzellen

aus der Maus anders auf den Wachstumsfaktor FGF reagieren als menschliche embryonale Stammzellen: Während FGF die Selbsterneuerung der menschlichen Zellen aktiv unterstützt, ist dies bei Epiblastzellen der Maus nicht der Fall. „Das heißt letztlich, dass viele Voruntersuchungen an tierischen Zellen gerade bei medizinisch relevanten Projekten unter Umständen nicht nur nichts nützen. Die Ergebnisse aus solchen Vorab-Tests können sogar irreführend sein“, warnt Hans Schöler. Menschliche Zellen sind deshalb auch künftig für die Stammzellforschung unverzichtbar. (CELL STEM CELL, 5. März 2010)

Die Abbildung zeigt Nervenzellen (grün), die aus Epiblast-Stammzellen der Maus entstanden sind. Sie entstehen bereits vier Tage, nachdem FGF sowie andere Wachstumsfaktoren blockiert wurden. Auch aus menschlichen Stammzellen lassen sich so Nervenzellen gewinnen.

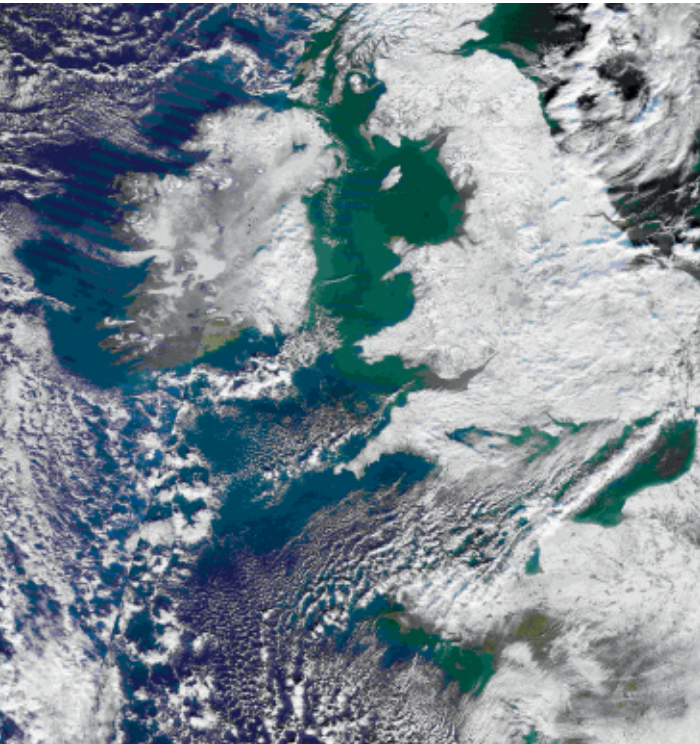
# Werden Europas Winter kälter?

Die niedrige Aktivität der Sonne könnte das regionale Klima in Großbritannien und Mitteleuropa beeinflussen

Trotz des Trends der globalen Erwärmung werden die Menschen in Großbritannien und Mitteleuropa in den nächsten Jahren möglicherweise häufiger kalte Winter erleben. Zu diesem Ergebnis kommt eine Studie von Wissenschaftlern der Universität von Reading, des Rutherford Appleton Laboratory im britischen Oxfordshire und des Max-Planck-Instituts für Sonnensystemforschung in Katlenburg-Lindau. Dazu untersuchten sie britische Wetteraufzeichnungen, die bis 1659 zurückreichen, und verglichen sie mit der Sonnenaktivität im selben Zeitraum. Als Maß für die Sonnenaktivität diente die Stärke des solaren Magnetfeldes. Da ausreichend verlässliche Messdaten erst seit etwa 1900 vorliegen, rekonstruierten die Forscher ältere Werte mithilfe von Computersimulationen.

Der statistische Vergleich der magnetischen „Fieberkurve“ der Sonne mit der Wetterdatenbank spricht eine deutliche Sprache: Nach Jahrzehnten hoher Sonnenaktivität und vergleichsweise milden Wintern sind harte Winter in Europa wieder häufiger geworden. Bei geringer Sonnenaktivität liegt die durchschnittliche Wintertemperatur in Großbritannien etwa ein halbes Grad niedriger als sonst. Grund für diese sehr regionale Auswirkung der niedrigen Sonnenaktivität könnten Veränderungen der Winde in der Troposphäre, der untersten Atmosphärenschicht, sein. Heizt sich die darüber gelegene Stratosphäre nur schwach auf, reißen die milden Starkwinde vom Atlantik in der Troposphäre ab. Stattdessen sind Großbritannien und Mitteleuropa dann dem Einfluss kalter Winde aus dem Nordosten ausgesetzt. Der genaue Wirkmechanismus ist allerdings noch unklar. (ENVIRONMENTAL RESEARCH LETTERS, 15. April 2010)

Ein Anblick, an den wir uns möglicherweise gewöhnen müssen: Große Teile Großbritanniens und Mitteleuropas waren im vergangenen Winter von Schnee bedeckt, wie diese Satellitenaufnahme vom 7. Januar 2010 zeigt.



Ein Anblick, an den wir uns möglicherweise gewöhnen müssen: Große Teile Großbritanniens und Mitteleuropas waren im vergangenen Winter von Schnee bedeckt, wie diese Satellitenaufnahme vom 7. Januar 2010 zeigt.

## Standfester Muschelfuß

Eisern halten sich Muscheln an Steinen und Felsen fest – und das ist durchaus wörtlich zu verstehen. Die Muschelseide, mit der die Schalentiere am Boden haften, verschleißt kaum, obwohl an ihr ständig die Brandung zerrt und sie immer wieder über Stein scheuert. Diese Widerstandskraft verdanken die Fasern Eisenatomen in ihrer Hülle, über die sich die Proteine des Muschelfußes vernetzen, wie Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für Kolloid- und Grenzflächenforschung in Potsdam-Golm festgestellt haben. Dabei bilden sich an den Eisenatomen Bindungen, die unter großer Belastung zwar

teilweise brechen, damit sich das Material stärker dehnen lässt. Anschließend schließen sich die Brüche aber wieder. So schafft die Natur, was Materialwissenschaftlern kaum gelingt: einen Stoff gleichzeitig dehnbar und hart zu machen.

Möglicherweise, so hoffen die Forscher, lassen sich nach dem Prinzip der Natur auch technische Materialien mit ähnlichen Eigenschaften herstellen.



Halt für ein Leben in starker Strömung: Mit Muschelseide (Byssus) heften sich die Schalentiere am Meeresgrund fest. Eine eisenverstärkte Hülle macht die Fasern abriebfest.



# Die Rufe der Hufeisennasen

Fledermäuse erkennen die Laute artfremder Genossen

In den Echoortungsrufen von Fledermäusen steckt mehr Information als bisher angenommen. Fledermäuse können nicht nur ihre Rufe von den Rufen anderer Arten unterscheiden, sondern auch zwischen artfremden Echoortungsrufen differenzieren – ähnlich wie wir Menschen verschiedene Sprachen auseinanderhalten können. Maike Schuchmann und Björn Siemers vom Max-Planck-Institut für Ornithologie in Seewiesen haben zwei Arten von Hufeisennasenfledermäusen Echoortungsrufe ihrer eigenen und dreier fremder Arten über einen Lautsprecher vorge-

spielt und die Reaktionen der Tiere analysiert. Beide Fledermausarten machten nahezu keine Fehler in der Unterscheidung zwischen „eigen und fremd“ oder zwischen „fremd und fremd“. Als Nächstes wollen die Wissenschaftler untersuchen, wie Fledermäuse diese Fähigkeit nutzen. So könnten die Tiere davon profitieren, wenn sie überlegenen Konkurrenten im Jagdgebiet ausweichen. Zudem wäre es vorteilhaft, anderen Arten mit ähnlichen Quartiersansprüchen auf der Suche nach neuen Hangplätzen zu folgen. (THE AMERICAN NATURALIST, 11. Mai 2010)

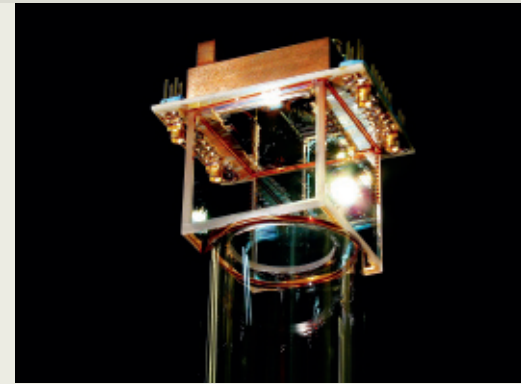


Die Meheley-Hufeisennase (*Rhinolophus mehelyi*) kann sogar nahe verwandte Arten an ihren Rufen erkennen.

## Turbulenzen im Griff

Ein Mittel gegen turbulente Strömungen hilft Energie zu sparen. Denn ob Öl durch eine Pipeline oder Wasser durch ein Rohr gepumpt wird – turbulente Verwirbelungen verschlingen oft mehr als zehnmals so viel Energie wie eine ruhige Strömung derselben Geschwindigkeit. Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für Dynamik und Selbstorganisation in Göttingen und der Harvard University in den USA haben einen Weg gefunden, eine relativ langsame turbulente Strömung in einem Glasrohr zu beru-

higen. Wie sie in Simulationen herausfinden, können sie einen Wirbel auflösen, wenn sie hinter ihm kurzzeitig das Geschwindigkeitsprofil der Strömung ändern: In der Mitte des Rohres müssen sie den Fluss bremsen und am Rand etwas beschleunigen. Das erreichen sie, indem sie in der Mitte der Strömung gezielt Wirbel erzeugen. Anders als bei anderen Beruhigungsversuchen sparen sie so auch Energie, nämlich fünfmal so viel, wie sie brauchen, um die Wirbel hervorzurufen. (SCIENCE, 19. März 2010)



Messen jenseits des Quantenlimits: Mit dem Atomchip an der Oberseite der würfelförmigen Vakuumkammer verschränken Münchner Physiker Atome, um etwa die Genauigkeit von Atomuhren zu erhöhen.

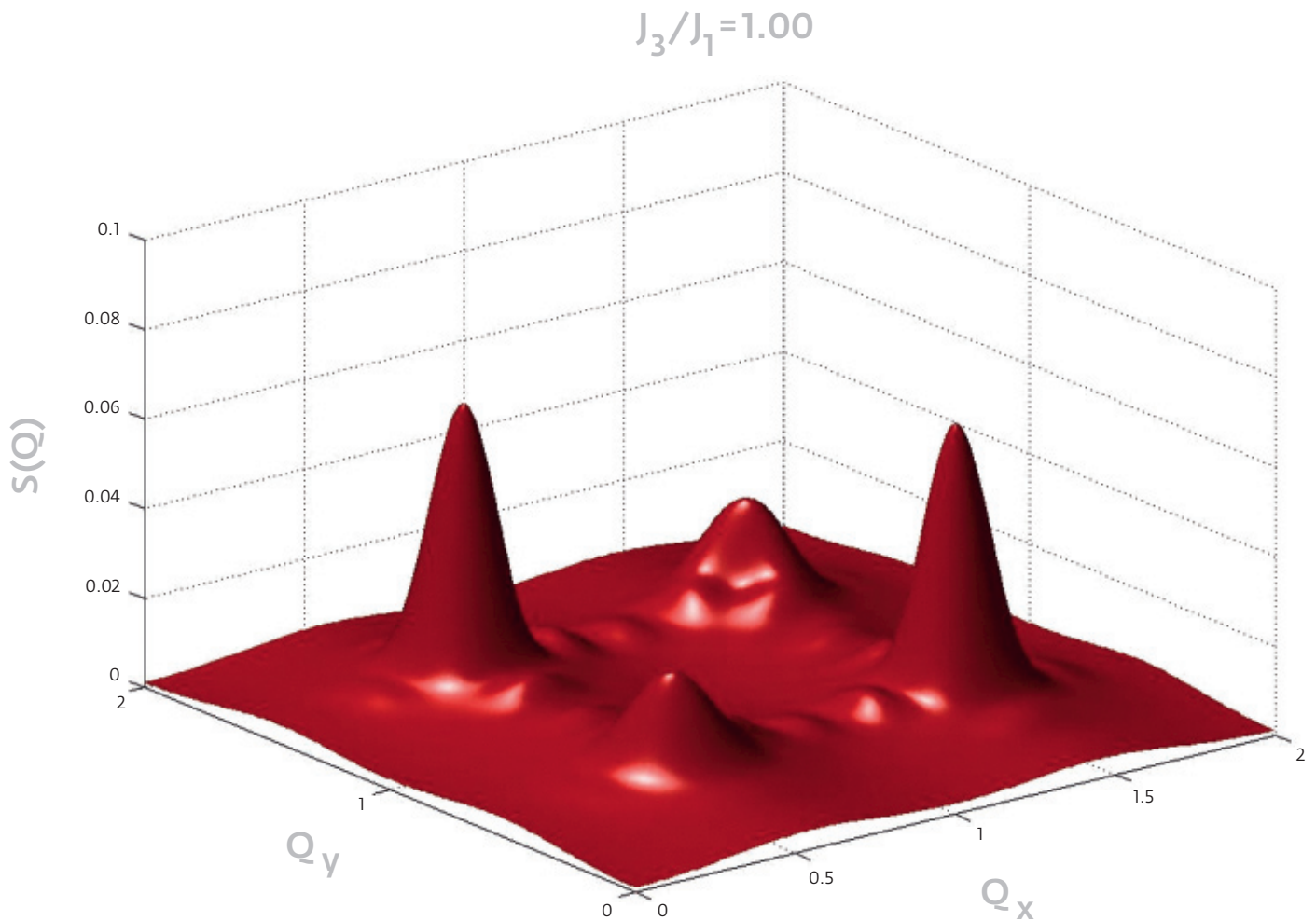
## Gequetschtes Quantenrauschen

Kompakt und scheinbar präziser, als die Quantenphysik erlaubt – so könnte die Atomuhr der Zukunft ticken. Ein Team um Physiker des Max-Planck-Instituts für Quantenoptik und der Ludwig-Maximilians-Universität München hat einen Kniff gefunden, die Genauigkeit von Messinstrumenten, die mit Quantenteilchen auf einem Mikrochip arbeiten, zu erhöhen – und zwar über das Quantenlimit hinaus. Diese Grenze existiert, weil das Verhalten von Quantenteilchen der Wahrscheinlichkeit unterworfen ist. Das sich daraus ergebende Quantenrauschen äußert sich etwa darin, dass ein Messpunkt zu einem Fleck zerfließt. Solch einen runden Messfleck haben die Forscher nun zu einem zigarrenförmigen Gebilde gequetscht. Damit haben sie die Messgenauigkeit in einer Richtung erhöht – um den Preis, dass sie in der anderen Richtung sinkt. Das ist den Forschern gelungen, indem sie Rubidiumatome auf einem Mikrochip verschränkten. Dann bestimmt das Verhalten eines Atoms, was mit seinen verschränkten Partnern geschieht. Diesen Effekt nutzen die Forscher in einem raffinierten Prozedere aus. Auf diese Weise lässt sich nicht nur die Präzision von chipbasierten Atomuhren, sondern auch von Atominterferometern erheblich steigern. Letztere können extrem schwache Kraftfelder aufspüren und so Drehbewegungen messen oder bei der Suche von Rohstoffen helfen, deren Lagerstätten das Schwerfeld der Erde lokal verändern. (NATURE, 31. März 2010)

# Die Zähmung der Quantengeister

Viele Aspekte der Quantenphysik sind rätselhaft und geheimnisvoll: Teilchen können gleichzeitig an zwei Orten sein und Eigenschaften vereinen, die sich gegenseitig ausschließen. **Ignacio Cirac**, Direktor am **Max-Planck-Institut für Quantenoptik** in Garching, entwickelt Ideen, um mit den mysteriösen Quantenphänomenen Information zu verarbeiten.

TEXT **BRIGITTE RÖTHLEIN**



Eine Theorie für schwierige magnetische Fälle: Mitarbeiter von Ignacio Cirac berechnen, wie die magnetischen Momente der Elektronen (Spins) wechselwirken, wenn sich die Nord- und Südpole dieser winzigen Magnete nicht immer ausweichen können. Die Höhe der Spitzen gibt die Stärke der Wechselwirkung wieder. Aus der Symmetrie der Grafik lesen sie die magnetische Ordnung ab.



**D**ie gelben Ledersessel im Arbeitszimmer von Ignacio Cirac verströmen selbst dann noch einen Hauch spanischer Sonne, wenn draußen dunkle Wolken den Himmel verhängen und Regen das Gefühl von Sommer verwässert. Hier im Max-Planck-Institut für Quantenoptik auf dem Garching Forschungscampus denkt der in Spanien geborene Theoretiker über die Probleme der Quantenphysik nach.

„Von Anfang an hatte die Quantenmechanik einen rätselhaften Teil“, schildert der 44-jährige Institutsdirektor und Physikprofessor die Situation: „Wissenschaftler wie Einstein, Bohr und andere betrachteten diesen Aspekt wie ein kurioses Spiel, wie etwas, was eigentlich gar nicht wahr ist.“ Neuerdings denken Physiker mehr über diesen geheimnisvollen Teil der Quantenphysik nach, und die heutige Technik erlaubt es ihnen auch, Experimente dazu zu machen. „So kann man nun diese Geheimnisse auf den Prüfstand stellen, all diese seltsamen Effekte der Natur“, sagt Cirac.

Für den Normalbürger mit gesundem Menschenverstand klingen die Vorgänge in der Quantenwelt – also der Welt des Allerkleinsten – ohnehin eher nach Märchen: Teilchen, die sich in Wellen verwandeln und umgekehrt; Partikel, deren Ort und Geschwindigkeit man nicht gleichzeitig messen kann; Energie, die nur in Päckchenform auftritt. Physiker nennen diese Phänomene Dualität, Unschärferelation, Quantisierung.

### TEILCHEN VERSTÄNDIGEN SICH SCHEINBAR TELEPATHISCH

Das alles sind keine Märchen, sondern die Grundlagen unserer modernen Welt. Ohne diese erstaunlichen Phänomene gäbe es heute keinen Computer, keinen Laser, keine Kernspintomografie, ja nicht einmal einen gewöhnlichen Fernseher. Das, was dem gesunden Menschenverstand so unerklärlich und rätselhaft erscheint, hat seine Existenz inzwischen millionenfach in der Praxis bewiesen.

Immer noch gibt es aber diesen rätselhaften Teil der Quantenmechanik: Teilchen, die sich anscheinend per Telepathie verständigen. Hypothetische Katzen, die gleichzeitig tot und lebendig sind (siehe Kasten „Eine Katze in der Kiste“). Oder kalte Materie, die sich entgegen allen bekannten Naturgesetzen verhält. Auch hierfür gibt es wissenschaftliche Namen, aber sie blieben bisher reine Beschreibungen: Verschränkung, Überlagerung von Zuständen, Supraleitung, Superfluidität. Man kennt zwar manche Regeln für diese Phänomene, aber wie sie zustande kommen und welche Theorie ihnen zugrunde liegt, weiß man bisher in vielen Fällen noch nicht genau.

Vor gut 15 Jahren änderten einige Forscher ihre Perspektive und sahen die Geheimnisse als Herausforderungen an. Zu ihnen gehört auch Cirac. „Wir sagten nun: Es gibt eine Natur, die sich auf sehr seltsame Weise verhält. Das fordert nicht nur unser philosophisches Denken heraus, sondern wir können die Phänomene auch für etwas nutzen.“ Für

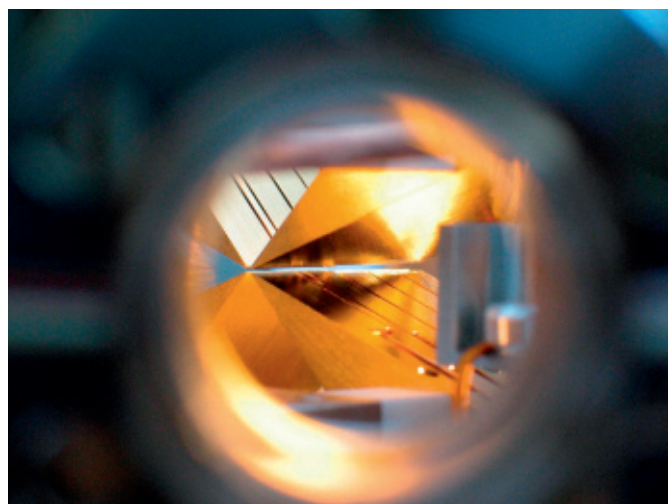
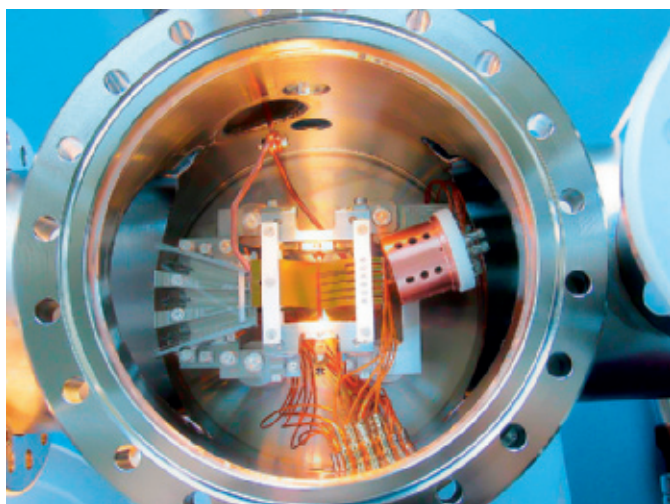
### EINE KATZE IN DER KISTE

Erwin Schrödinger verdeutlichte das Phänomen der Überlagerung mit einem Gedankenexperiment: Man stelle sich eine Kiste vor, in die man nicht hineinsehen kann und aus der keine Geräusche nach außen dringen. In dieser Kiste sitzt eine Katze. Neben ihr steht ein physikalischer Apparat, der ihren sicheren Tod bedeutet: Ein radioaktives Präparat wird irgendwann den Zerfall eines Atoms erleben. Wenn das Atom zerfällt, wird es über einen Geigerzähler einen elektrischen Impuls auslösen, der einen Hammer auf ein Fläschchen mit Gift fallen lässt. Das Gift tritt aus dem zertrümmerten Fläschchen – und die Katze stirbt.

Da aus der Kiste keine Information nach außen dringt, lässt sich nicht feststellen, ob der radioaktive Zerfall bereits den Tod

der Katze verursacht hat. Denn radioaktive Elemente zerfallen nicht zu einem fixen Zeitpunkt, sondern nur mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit innerhalb einer bestimmten Zeitspanne.

Während der Zeit, in der der Zerfall wahrscheinlich eintreten wird, kann kein äußerer Beobachter sagen, ob die Katze noch lebt oder schon tot ist, denn niemand weiß, wann genau das radioaktive Atom zerfällt. Logisch betrachtet ist die Katze also gleichzeitig lebendig und tot. Oder keines von beiden. Sie befindet sich in einem Überlagerungszustand zwischen Leben und Tod. Selbstverständlich kann man aber zu jedem Zeitpunkt feststellen, ob die Katze noch lebt oder schon tot ist, indem man die Kiste öffnet. Damit zerstört man aber die Überlagerung.



den Bau eines Quantencomputers etwa oder für die sichere Verschlüsselung von Nachrichten. Das führte zu einer Revolution im Denken. Physiker wie Ignacio Cirac wagen sich jetzt an Tabus heran, die einst selbst Leute wie Albert Einstein noch einschüchterten.

## VERSCHRÄNKUNG ERMÖGLICHT QUANTENGATTER

„Alles begann 1994 auf einer Konferenz in Boulder, Colorado“, erinnert sich Rainer Blatt, der als Experimentalphysiker an der Universität Innsbruck sehr eng mit Cirac zusammenarbeitet. „Dort trafen mein österreichischer Kollege Peter Zoller, Ignacio Cirac und ich den britischen Physiker Arthur Eckert, der die Idee vorstellte, dass man bei einem

Quantencomputer wie bei einem klassischen Rechner einen Satz von grundlegenden Gattern benötigt, die bestimmte logische Entscheidungen ausführen können.“ Sobald es die gebe, ließen sich alle Rechenoperationen zusammensetzen. Zoller und Cirac griffen diesen Gedanken auf und schrieben innerhalb weniger Wochen auf, wie er sich realisieren lassen könnte.

Ein Quantencomputer arbeitet – anders als ein klassischer Computer – mit der Überlagerung verschiedener Zustände, sogenannten Qubits (siehe Kasten „Quanten, mit denen zu rechnen ist“). Diese bieten den Vorteil, viele Rechnungen in einem Schritt parallel zu ermöglichen, da alle Zustände gleichzeitig berechnet werden. Jede Messung aber bedeutet einen Eingriff in das System

und zerstört die Überlagerung. Dieses Phänomen hat der Physiker Erwin Schrödinger im Jahr 1935 anschaulich in seinem Bild von der Katze beschrieben, die gleichzeitig tot und lebendig ist. Wie soll man aber logische Operationen verknüpfen, ohne den Zustand der Qubits zu messen und sie damit zu zerstören? Cirac und Zoller hatten 1994 die Idee, wie man den Zustand eines Qubits mit einer Bewegung verschränken und damit gefahrlos messen kann.

Bei der Verschränkung von zwei Objekten handelt es sich um ein Phänomen, das schon Albert Einstein als „spukhafte Fernwirkung“ bezeichnet hat und das es nur in der Quantenwelt gibt: Zwei miteinander verschränkte Quantenobjekte befinden sich immer im gleichen Zustand – egal wie weit sie

## QUANTEN, MIT DENEN ZU RECHNEN IST

Digitale Information setzt sich bekanntlich aus Bits zusammen. In einem herkömmlichen Computer kann ein Bit den Wert 0 oder 1 annehmen, es wird repräsentiert durch den Ladungszustand eines Schaltelements. Auch in der Quantenmechanik gibt es Zustände, die 0 oder 1 entsprechen, etwa der Anregungszustand eines Atoms oder der Drehsinn eines kreiselnden Teilchens, Spin genannt. Ein angeregtes Atom könnte etwa für eine 1 stehen, eines im Grundzustand für eine 0. Für die Bits der Quantenwelt hat sich der Name Qubit durchgesetzt.

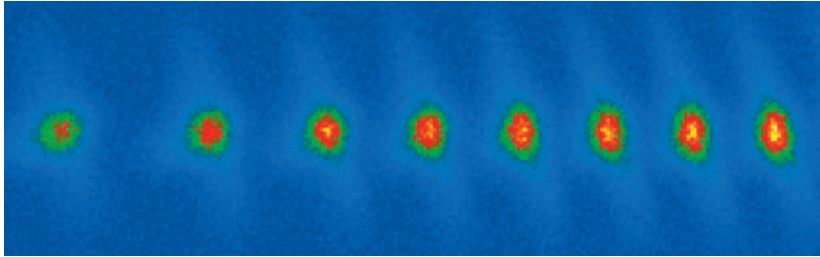
Quantenmechanische Objekte befinden sich jedoch nicht in einem eindeutigen Zustand, sondern immer in einer Überlagerung aller möglichen Zustände gleichzeitig. So kann also ein

Qubit gleichzeitig die 0 und die 1 codieren. Zwei Qubits nehmen also die vier Zustände 00, 01, 10 und 11 an, und zwar alle gleichzeitig. Die Zahl der möglichen Kombinationen steigt schnell an; 32 Qubits ergeben schon vier Milliarden. Im Quantencomputer will man sich diese Vielfalt zunutze machen: Jede Rechenoperation würde ja dann in allen Zuständen gleichzeitig ablaufen. Mit zwei Qubits werden automatisch vier Werte gleichzeitig berechnet, mit 32 Qubits vier Milliarden Werte.

Die Überlagerung der Zustände bricht jedoch zusammen, sobald das System gestört wird. Im Augenblick einer Messung beschreiben Physiker die Wirklichkeit exakt: Es bleibt nur ein einziger Zustand übrig, nämlich der ermittelte Messwert.



links | Blick in eine Ionenfalle: Zwischen den vier Elektroden (rechts als Detailbild) werden geladene Atome gefangen. Mit Fallen dieser Art lassen sich Quantengatter konstruieren, in denen die Zustände von Atomen mit ihrer Bewegung verschränkt werden.  
unten | In einer Reihe ordnen sich die Ionen in einer Falle an; für eine Verschränkung müssen sie sich in absoluter Ruhe befinden.



## VERSCHRÄNKUNG IN DER FALLE

Um den Zustand eines Atoms mit einer Bewegung zu verschränken, schlugen Ignacio Cirac und Peter Zoller folgendes Verfahren vor: Man ordne mehrere Ionen in einer Ionenfalle in Form einer Kette an und bringe sie in einen Zustand absoluter Ruhe. Das ist leichter gesagt als getan. Um das zu erreichen, muss man mehrere Kühlverfahren kombinieren, unter anderem die Laserkühlung sowie die Seitenband-Kühlung. Die Ionenkette stellt einen harmonischen Oszillator dar, der interne Quantenzustände besitzt. Ist er im absoluten Grundzustand, dann ist die Kette absolut bewegungslos; zwischen den Ionen herrscht allerdings weiterhin die Coulomb-Wechselwirkung.

Wenn dieser absolute Grundzustand erreicht ist, kann man durch Manipulation eines der Ionen mit einem geeigneten Laserimpuls erreichen, dass es in einen angeregten Zustand springt. Geschieht dies in der richtigen Art und Weise, kann man mit Mitteln der Quantenlogik dafür sorgen, dass aufgrund der Coulomb-Wechselwirkung zwischen den Ionen in der Falle eine Bewegung entsteht. So gibt es nicht nur einen Übergang zwischen Anregungszuständen, sondern auch noch einen Kick, damit sich das Ion bewegt. Die Bewegung ist sehr klein, nur wenige Nanometer. Sie bedeutet aber, dass jetzt die ganze Kette anfängt zu schwingen.

Das System weiß im Prinzip gar nicht, von welchem Ion die Bewegung ausging. Dieses Nichtwissen ist auch eine Art von Überlagerung. Man kann deshalb sagen, man hat den internen Zustand mit der externen Bewegung der Ionen verschränkt. Man hat den optischen Übergang umgemünzt in einen Bewegungszustand.

voneinander entfernt sind. Übertragen auf das Quantengatter heißt das: Ist eines der Qubits angeregt, dann ergibt das eine Bewegung, ist es nicht angeregt, dann nicht. Bei der Beobachtung der Bewegung zerstört man die Überlagerung im Qubit nicht.

Im Jahr 2001 verwirklichte die Gruppe von David Wineland in Colorado ein Quantengatter und setzte die Ideen von Cirac und Zoller damit zum ersten Mal experimentell um. Kurz danach gelang das auch Rainer Blatt in Innsbruck. Sein Team setzte auf Ionenfallen, um ein Quantengatter zu bauen. Dabei sperren Physiker geladene Atome mithilfe geeigneter elektromagnetischer Felder in einer kleinen Vakuumkammer ein, manipulieren sie mit Lasern und verschränken so ihre Zustände mit Bewegungen. Inzwischen ist das Verfahren etabliert, und Verschränkungen lassen sich nach der Cirac-Zoller-Methode praktisch auf Knopfdruck herstellen – ein Vorgang, der vorher undenkbar schien.

Vorher fand man lediglich Teilchen, die auf natürliche Weise miteinander verschränkt waren. „In einem nicht linearen optischen Kristall können etwa beim Einfall eines energiereichen Quants zwei miteinander verschränkte Photonen erzeugt werden“, erläutert Ignacio Cirac. Aber wie soll man drei verschränkte Photonen herstellen, oder 30, wie man das für einen Quantencomputer braucht? Er und seine Kollegen haben deshalb einen Weg vorgeschlagen, wie man Ionen absichtlich miteinander verschränken kann. „Heute können wir anbieten: Sag mir, in wel-

chem Zustand deine Teilchen sind, und wir geben dir eine Prozedur, mit der du so viele davon verschränken kannst, wie du willst“, so Cirac.

## RECHNUNGEN – AUS DER ISOLATION GEFÜHRT

Experimentalphysiker haben die Wahl unter vielen theoretischen Vorschlägen für Versuche. Da Ignacio Cirac in Fachkreisen aber einen hervorragenden Ruf genießt, gelingt es ihm und seiner Gruppe von 30 Theoretikern immer wieder, auch Partner für Experimente zu aktuellen Projekten zu gewinnen. So stellte Cirac und zwei ehemalige Mitarbeiter im Juli 2009 mit einer neuen Theorie einen weiteren Grundsatz der Quantenwelt in Frage. Mittlerweile arbeiten einige Teams daran, sie experimentell zu belegen.

Bisher herrschte die Überzeugung, dass die Qubits in einem Quantencomputer nicht von außen gestört werden dürften, damit ihre Überlagerung nicht verloren geht. Deshalb müsse das System komplett von der Außenwelt isoliert werden, Messungen zwischendurch seien unmöglich. Dissipation nennen die Forscher diesen unerwünschten Kontakt mit der Umgebung. Erst am Ende der Rechnung lesen die Experimentatoren das Ergebnis aus, indem sie eine Messung machen – dabei zerstören sie die Überlagerung. „Aber wir haben nun festgestellt, dass man das System beobachten und trotzdem Quantenrechnungen vornehmen kann“, sagt Cirac:



Um große Ideen zu entwerfen reichen eine Tafel und ein Stift. Ignacio Cirac entwickelt Theorien, die Experimentalphysiker praktisch umsetzen.

„Das ist eine These, die allen bisherigen Vorstellungen vom Quantencomputer widerspricht.“

Die Forscher müssen die Beobachtung allerdings in einer ganz speziellen Weise vornehmen. Dann kollabieren zwar die Überlagerungen, aber in einer Art und Weise, die zur Lösung des Problems führt. Wie das Ganze in der Praxis aussehen könnte, ist noch nicht klar. Immerhin hat die Europäische Union Mitte 2009 ein dreijähriges Forschungsprojekt mit dem Namen Quevadis aufgelegt, um entsprechende Experimente zu fördern. „Es gibt letztlich zwei grundsätzliche Arten von Quantencomputern“, fasst Cirac zusammen, „beim einen braucht man völlige Isolation, beim anderen volle Dissipation.“ Möglicherweise lassen sich am Ende die Vorzüge beider Arten kombinieren.

## SIMULATOREN FÜR QUANTENSYSTEME

Noch ein weiteres Projekt treibt Ignacio Cirac um: Er arbeitet mit an der Verwirklichung einer Idee, die der legendäre Physiker und Nobelpreisträger Richard Feynman schon im Jahr 1981 ansprach. Feynman bezweifelte, dass man die Welt mit einem konventionel-

len Computer genau beschreiben kann: „Ich bin nicht glücklich mit all den Analysen, die behaupten, das ginge mit klassischer Physik, denn die Natur ist verdammt noch mal nicht klassisch. Wenn man eine Simulation der Natur machen will, macht man sie besser quantenmechanisch, und – Menschenskind – man erhält dabei auch noch ein wunderbares Problem!“ An diesem „wunderbaren Problem“ arbeiten nun Forschergruppen auf der ganzen Welt, darunter auch die Theoretiker des Max-Planck-Instituts für Quantenoptik: Sie wollen Quantensysteme simulieren.

## DER MIKROKOSMOS WIRD VORHERSAGBAR

Cirac erklärt das Grundprinzip anhand der heute üblichen klassischen Simulationen: „Angenommen, Sie wollen ein Flugzeug entwerfen und sehen, ob es fliegen kann, bevor sie es bauen. Dann simulieren Sie alle wichtigen Komponenten auf dem Computer und können mithilfe der passenden Gleichungen eine Vorhersage treffen.“ Auf diese Weise können Rechner viele Dinge simulieren. „Aber die Quantensysteme aus unserer mikroskopischen Welt kann kein konventioneller Computer nachbilden“, sagt der Physiker.

Etwa das Verhalten von Atomen bei sehr tiefen Temperaturen: Werden sie Elektrizität leiten oder nicht, werden sie Supraleitung zeigen? Hier versagt ein konventioneller Rechner, hier sind Quanten nötig. Es muss nicht gleich ein Quantencomputer sein, es reicht ein einfacheres Quantensystem, wenn es so zu kontrollieren ist, dass es sich bei tiefen Temperaturen wie eine Gruppe von Atomen verhält. Dann lassen sich damit Vorhersagen über das unbekannte System ableiten (siehe MAX-PLANCKFORSCHUNG, 4/2008, Seite 32ff.).

Im Vordergrund steht zurzeit die Frage, warum manche Materialien bereits bei relativ hohen Temperaturen Supraleitung zeigen, also Strom bei re-

lativ hohen Temperaturen ohne Widerstand leiten. „Mit unseren Quantensimulatoren hoffen wir herauszufinden, warum es Hochtemperatur-Supraleitung gibt“, sagt Cirac. Sobald der Mechanismus klar ist, lassen sich solche Materialien möglicherweise gezielt bauen, sodass sie Strom schon bei Temperaturen verlustfrei leiten, die auch breite Anwendungen ermöglichen.

Es gibt immer noch Abenteuer und Überraschungen in der Physik, auch in der Theorie. Ignacio Cirac ist mit dieser Situation sehr zufrieden. „Ich sage immer zu den Leuten, die selbst keine Forschung machen: Stell dir vor, du gehst auf eine Reise und entdeckst einen Stein, den niemand je zuvor gesehen hat. Das fühlt sich doch großartig an. Und dieses Gefühl haben wir jeden Tag.“

## GLOSSAR

### Überlagerung

Teilchen nehmen nicht einen Zustand ein, sondern alle möglichen Zustände zur selben Zeit – so lange, bis eine Messung die Überlagerung zerstört.

### Verschränkung

Zwei oder mehr Teilchen bilden ein Gesamtsystem, Messungen an einem Teilchen wirken sich instantan auf die verschränkten Partner aus – egal wie weit die Partikel voneinander entfernt sind.

### Supraleitung

Unterhalb der sogenannten Sprungtemperatur, die meistens unter minus 260 Grad Celsius liegt, leiten viele Metalle Strom ohne Widerstand. Diese konventionelle Form der Supraleitung verstehen Physiker sehr gut, die unkonventionelle Form der Supraleitung dagegen noch nicht. Sie tritt unter anderem in Kupferoxid-Keramiken auf, von denen der Rekordhalter immerhin schon bei minus 110 Grad Celsius seinen elektrischen Widerstand verliert.

### Superfluidität

Das Phänomen wurde zuerst bei zwei Isotopen des Heliums beobachtet. Aufgrund quantenmechanischer Effekte fließt eine Flüssigkeit oder ein Gas ohne Reibung.





## Certified Coolness® CO2-Ausgleich mit Kunst und Lebenskunst

Sie möchten CO2 ausgleichen? Und gleichzeitig sich und Ihre Freunde beschenken mit schönen und informativen Extras?

**Für Privatkunden:** [www.certifiedcoolness.de](http://www.certifiedcoolness.de)

Sie engagieren sich mit Ihrem Unternehmen für nachhaltige Entwicklungen? Sie wollen Ihre Mitarbeiter und Kunden mit humor- und sinnvollen Aktionen oder mit schönen CO2-Ausgleich-Geschenken überraschen?

**Für Firmenkunden:** Aktionen, Projekte & Firmengeschenke

Sie bieten Ihren Kunden Premiumprodukte und suchen als Add-on das besondere Etwas – geschmackvoll, umweltbewusst und „cool“?

**Für Firmenkunden:** Premiumprodukte mit Certified Coolness-Add-Ons



**Mehr Infos bei Mr Cool Ness**

Telefon: 089/54506938

[mr.cool.ness@certifiedcoolness.de](mailto:mr.cool.ness@certifiedcoolness.de)

Testen Sie unseren Store!  
**GUTSCHEIN im Wert von €2,00**  
Gutscheincode: MAXPLANCKFORSCHUNG  
Gültig bis 30.09.2010 / Ein Gutschein pro Leser  
[www.certifiedcoolness.de](http://www.certifiedcoolness.de)

# Im Spiegel des Neandertalers

Sie haben es getan. Und die ganze Welt weiß es jetzt, wenn auch mit einigen zehntausend Jahren Verspätung. Natürlich haben alle Medien weltweit berichtet: Menschen und Neandertaler hatten Sex! Doch für **Svante Pääbo**, Direktor am **Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie** in Leipzig, ist das keineswegs das Wichtigste an seiner Entdeckung.

TEXT **MARCUS ANHÄUSER**

**S**vante Pääbo sitzt entspannt im Sessel in seinem Büro und grinst. „Viele Menschen finden dieses Thema mit der Vermischung von Mensch und Neandertaler einfach cool“, sagt er. Er nehme sich da gar nicht aus, aber: „Auf Dauer ist es natürlich viel wichtiger, dass wir jetzt ein Genom des engsten Verwandten des Menschen haben.“ In seinem Rücken steht die lebensgroße Rekonstruktion eines Neandertaler-Skeletts. Ob der Urmensch ihm recht gäbe? Wie auch immer.

Pääbo hat allen Grund, entspannt zu sein, denn der Schwede hat innerhalb von fünf Jahren ein Projekt zum







Von Angesicht zu Angesicht: Svante Pääbo mit dem Schädel eines unserer nächsten Verwandten, des Neandertalers.

» Die mtDNA zeigte so viele Unterschiede zu der des Menschen, dass es unwahrscheinlich war, dass der Neandertaler im Stammbaum auf demselben Ast wie *Homo sapiens* saß.

Ziel geführt, von dem man zuvor nur hätte träumen können. Zum ersten Mal liegt das Genom eines ausgestorbenen Vertreters der Gattung *Homo* vor. Die letzten Individuen des Neandertalers lebten vor etwa 30000 Jahren. Jetzt kann man in ihrer Gensequenz lesen und lernen – nicht nur wer oder was die Neandertaler waren: „Wir erfahren vor allem, welche Veränderungen wir in unserem Genom haben, die uns einzigartig machen“, sagt Pääbo. Darauf weist er in allen Interviews immer wieder hin. Es geht nicht nur um den Neandertaler, es geht immer auch um uns.

### DIE PALÄOGENETIK WIRD AUS DER TAUFGE HOBE

Die Präsentation des Neandertaler-Genoms im Fachblatt SCIENCE am 7. Mai 2010 ist ein Höhepunkt in der Karriere des 55-Jährigen, Sohn einer Chemikerin und des Nobelpreisträgers und Biochemikers Sune Bergström. Aber nicht nur für ihn, auch für seine Kollegen und die gesamte Forschungsrichtung – die Paläogenetik –, die er als Pionier in den 1980er-Jahren mit aus der Taufe gehoben hat. Pääbo, der Ägyptologie und dann Medizin studierte, hatte neben seiner Doktorarbeit in Immunologie noch ein anderes Forschungsinteresse: Er wollte die DNA von Mumien entziffern. Das hatte vorher noch niemand gemacht. Es war nicht einmal klar, ob es überhaupt noch DNA in den Mumien zu finden gab.

Nachts machte er sich an die Arbeit, unbemerkt von seinem Doktorvater. „Ich hatte ein bisschen Angst vor ihm; er hätte es vielleicht verboten“, erzählt Pääbo. Als er dann tatsächlich DNA fand, diese färben und sogar extrahieren konnte, war die Sensation perfekt. „Da musste ich es auch meinem Professor erzählen“, sagt er mit einem ironischen Lächeln. Er reichte die Ergebnisse bei NATURE ein und landete 1985 mit

seiner Entdeckung sogar auf dem Titel des Magazins. Der perfekte Start für eine wissenschaftliche Laufbahn.

Nach einer Zwischenstation in Berkeley bekam Pääbo 1990 ein eigenes Labor an der Ludwig-Maximilians-Universität München. Dort untersuchte er Mitte der 1990er-Jahre erstmals DNA vom Neandertaler und lieferte erste stichhaltige Belege dafür, dass der „grobe Klotz“ kein direkter Vorfahre des Menschen gewesen ist. Die Forscher hatten die DNA aus Mitochondrien extrahiert, den Energiekraftwerken der Zelle. Dieses Zellorganell liefert, da es vielfach in der Zelle vorkommt, mehr DNA als der Zellkern – mitochondriale DNA (mtDNA) lässt sich daher einfacher analysieren als Kern-DNA.

Die mtDNA zeigte so viele Unterschiede zu der des Menschen, dass es unwahrscheinlich war, dass der Neandertaler im Stammbaum auf demselben Ast wie *Homo sapiens* saß.

Svante Pääbo wechselte 1997 als einer von fünf Direktoren ans neue Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig. Zu diesem Zeitpunkt war die internationale Forschergemeinde gerade mit der Sequenzierung des menschlichen Genoms befasst. Das 1990 mit öffentlichen Mitteln in den USA gestartete Projekt bekam 1998 Konkurrenz durch die private Biotech-Firma Celera Genomics des US-Genetikers Craig Venter. Der Wettstreit trieb die Forschungsarbeiten voran. Im Jahr 2001 konnten die beiden Forschungsgruppen parallel eine erste Version des Human-genoms präsentieren. An eine Rekonstruktion des Neandertaler-Genoms, für das man eben DNA aus dem Zellkern und nicht aus Mitochondrien benötigt, war zu diesem Zeitpunkt überhaupt noch nicht zu denken.

Im Vergleich zur Sequenzierung von DNA lebender Individuen gilt es eine ganze Reihe von Hürden zu überwinden, wenn man „alte DNA“ ent-

schlüsseln will. Das hatten die Vertreter der Zunft in den 1990er-Jahren schmerzhaft lernen müssen. Eines der Hauptprobleme: Eine Probe aus einem zehntausende Jahre alten Neandertaler-Knochen kann zwar eine Menge Genmaterial enthalten, doch mehr als 95 Prozent stammen gar nicht vom Urmenschen. „Das ist DNA von Bakterien oder Pilzen, die den Knochen nach seinem Tod besiedelt haben“, erklärt Pääbo.

### BUCHSTABENTAU

Und das zweite Problem: Der DNA-Strang zerfällt mit der Zeit in immer kleinere Bruchstücke – wie ein Puzzle, dessen Teile verstreut in der Kiste liegen. Einige Teile hängen noch zusammen, aber das Gesamtbild (die Sequenz) ist längst nicht mehr zu erkennen. Hinzu kommt, dass einige Bausteine chemisch verändert sind. Pääbo und sein Team fanden heraus, dass eine der vier Basen des genetischen Codes mit der Zeit ihre Identität eintauscht. In einem Großteil der Sequenz-Bruchstücke steht anstatt eines „C“ für Cytosin ein „U“ für Uracil, weil das Cytosin eine Aminogruppe verliert. Beim Sequenzieren wird das U, das es in der DNA eigentlich nicht gibt, sondern nur in der RNA, als T für Thymin gelesen. „Wenn man also an der ersten Position einer Sequenz ein T findet, war es in 40 Prozent der Fälle eigentlich mal ein C“, erklärt Pääbo.

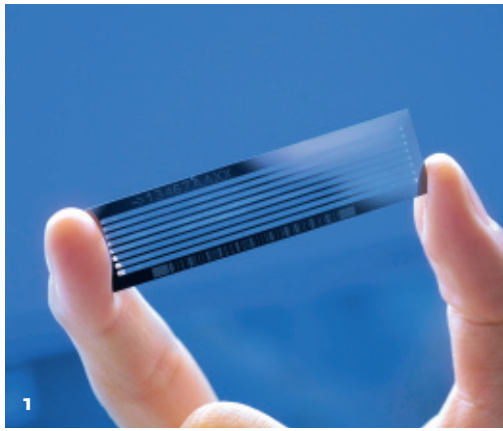
Ein entscheidendes Problem bereiten sich die Wissenschaftler selbst. Sie verunreinigen die Proben mit ihrer eigenen DNA. Denn wo Menschen leben und arbeiten, hinterlassen sie genetische Spuren – ob bei der Ausgrabung am Fundort oder beim Vorbereiten der Gen-Schnipsel im Labor. Was am Tatort eines Verbrechens hilft, den Täter zu überführen, verdirbt den Paläogenetikern die Arbeit. Gelangt ihre DNA – oder die der Putzfrau – in die Probe, ver-





- 1 | Tomislav Maricic begutachtet das Knochenfragment eines Neandertalers im Reinraum.
- 2 | Bevor die Forscher den Reinraum betreten dürfen, müssen sie umfangreiche Vorkehrungen treffen.
- 3 | Für die Analyse benötigen die Forscher tatsächlich nur 400 Milligramm Knochenpulver, das aus dem Knochenfragment herausgebohrt wird.





- 1 Eine sogenannte *Illumina GAll flow cell*, mit deren Hilfe mehrere Proben gleichzeitig im Illumina-Genomanalysegerät analysiert werden können.
- 2 DNA-Cluster auf dem Ausgabebildschirm des Roche/454 Genomanalysegeräts.
- 3 Johannes Krause und Anne Butthof aus dem Team von Svante Pääbo beim Beladen der Illumina Cluster Station.

fälscht sie das Bild, vor allem bei einer Art wie dem Neandertaler, dessen Genom unserem sehr stark ähnelt.

Für alle diese Hindernisse haben Pääbo und sein Team Lösungen gefunden, ohne die es wohl nie zum erfolgreichen Abschluss des Projekts gekommen wäre. Vor allem gelang es den Forschern, die Ausbeute an Neandertaler-DNA um den Faktor 300 zu steigern. Ein ganz wichtiger Schritt, denn zeitweise hatte es so ausgesehen, als ob die Sequenzierung noch zwei Jahrzehnte dauern und 60 Millionen Euro kosten könnte.

### FEIN SÄUBERLICHER UMGANG MIT ALTER DNA

Die Wissenschaftler reichern die Neandertaler-DNA an, indem sie etwa molekulare Scheren nutzen, die bevorzugt mikrobielles Genmaterial und nicht humanes Erbgut zerschneiden. „Auf diese Weise reichern wir die Proben auf bis zu 20 Prozent an, was die Sequenzierung überhaupt erst ökonomisch erschwinglich macht“, sagt Pääbo. Um

dem Identitätswechsel des Cytosins zu begegnen, schrieben die Forscher bioinformatische Programme, mit denen sie ihre Computeralgorithmen für die Sequenzierung um die Wahrscheinlichkeit korrigierten, mit der ein „T“ eigentlich ein „C“ ist. „Das ermöglicht es uns, bei einem 50 Basenpaare langen Stück sicher zu entscheiden, ob es von einem Neandertaler oder von einem Bakterium stammt“, so Pääbo.

Die Kontamination mit der eigenen DNA war ein Problem, an dem die Gruppe ziemlich zu knabbern hatte. Zahlreiche Vorkehrungen waren getroffen worden. So gehörte es seit Längerem zur Routine, die Proben wie in der Chipindustrie in einem Reinraum zu bearbeiten. Die Luft wird hier laufend gefiltert und die Wissenschaftler arbeiten nur mit Schutzkleidung. Wenn der Raum nicht genutzt wird, ist er von UV-Licht blau erleuchtet, um DNA-Reste zu zerstören. Doch für eine Arbeit, die das Team im Jahr 2006 im Fachmagazin *NATURE* veröffentlichte, genügten all diese Vorkehrungen nicht. „Wir dachten, wir hätten dank dieser Maßnahmen

nur etwa ein Prozent Verunreinigungen, tatsächlich waren es aber 14 Prozent“, sagt Pääbo. Was war passiert?

### EINE NEUE GENERATION VON SEQUENZIERMASCHINEN

Die Leipziger hatten ihre Proben in die USA geschickt zum Hersteller der neuesten Generation von Hochdurchsatz-Sequenziermaschinen. Dort gab es aber kein Reinstlabor. „Wir wussten, dass das problematisch werden könnte, wollten aber die neuen Maschinen testen, bevor wir in sie investieren“, erklärt der Max-Planck-Direktor. Und genau dort gelangte fremde DNA in die Proben. „Das ärgert einen. Aber im Nachhinein war es gut, weil wir auf diese Weise ein Problem entdeckten, das wir lösen mussten. So macht man in der Wissenschaft Fortschritt, man kann es nicht beim ersten Mal perfekt machen.“

Mittlerweile stehen die Maschinen in Leipzig und jedes Stück Neandertalersequenz wird mit einem Etikett aus vier Basen markiert und ist damit zweifelsfrei von nicht markierter, menschlicher

» Und wieder einmal ermöglichte eine technische Entwicklung einen wissenschaftlichen Durchbruch.

DNA zu unterscheiden. So reiht sich eine Verbesserung an die nächste. Die neue Generation von Hochdurchsatz-Sequenziermaschinen der US-Firma 454 Life Science war ein technologischer Quantensprung. Erst diese Entwicklung rückte eine Rekonstruktion der drei Milliarden langen Basensequenz in greifbare Nähe: „Damals dachte ich zum ersten

Mal daran, das es möglich sein könnte, das gesamte Genom des Neandertalers zu sequenzieren“, so Svante Pääbo.

Und wieder einmal ermöglichte eine technische Entwicklung einen wissenschaftlichen Durchbruch. Die Bedeutung dieser neuen Generation von Sequenziermaschinen könne man gar nicht hoch genug einschätzen, sagt

Pääbos Mitarbeiter Adrian Briggs, der erst kürzlich seine Doktorarbeit im Leipziger Labor abgeschlossen hat: „Wir mussten mehr als eine Milliarde Bruchstücke sequenzieren. Das wäre mit Maschinen auf dem Stand von 2004 schlicht unmöglich gewesen.“ Briggs rechnet vor: „Eine solche Maschine hätte dafür um die 10000 Jahre

### DER UNBEKANNTE DRITTE

Nur wenige Wochen bevor das Leipziger Labor wegen des Neandertaler-Genoms im weltweiten Fokus stand, hatten Svante Pääbo und sein Mitarbeiter Johannes Krause schon einmal mit einem Ansturm der Presse zu kämpfen. Krause hatte Ende März in *NATURE* von einem aufregenden Fund aus einer Höhle im Altai-Gebirge in Südsibirien berichtet: Dort lebte offenbar vor etwa 40000 Jahren ein bisher unbekannter Hominide – zu einem Zeitpunkt also, da der *Homo sapiens* schon lange seinen Siegeszug um die Welt begonnen, die Neandertaler aber noch einige 1000 Jahre vor sich hatten.

Bestätigen sich die Ergebnisse der Max-Planck-Forscher, wäre das die erste Menschenart, die nicht anhand von Fossilien, sondern allein durch eine Genanalyse entdeckt wurde. Die Genprobe stammte aus einem kirschkerngroßen Glied eines kleinen Fingers, den die russischen Forscher aus Nowosibirsk, mit denen das Pääbo-Labor seit einigen Jahren zusammenarbeitet, eigentlich einem Menschen zugeordnet hatten.

Johannes Krause sequenzierte das Genom der Mitochondrien, jener Zellorganellen, die eine eigene DNA besitzen (mtDNA). Der Vorteil: Die Sequenz ist mit rund 16000 Basenpaaren nur sehr

kurz, und zugleich gibt es mehrere 100 Kopien in jeder Zelle. Als sich der Forscher die ersten Ergebnisse der Sequenzierung ansah, traute er seinen Augen nicht. „Das war ein ganz aufregender Moment. Da stimmte irgendetwas nicht“, sagt der 29-Jährige. Entdeckung oder Artefakt? Er war misstrauisch. War etwas bei der Analyse schiefgegangen? Hatte sich ein Fehler in die komplexen bioinformatischen Programme und Algorithmen eingeschlichen, mit denen die Paläogenetiker die Genschnipsel rekonstruieren?

Doch viele Kontrolltests bestätigten das ungewöhnliche Ergebnis. Krause hat jede Position der Sequenz mehr als 150-mal sequenziert. „Ich habe sogar noch die Kollegen zu einem Meeting um halb sieben am Freitagabend einberufen, um mit ihnen die Ergebnisse zu besprechen“, sagt der Wissenschaftler. Aber auch den Kollegen fiel keine andere Erklärung ein: Diese Sequenz stammte nicht von einem Menschen und nicht von einem Neandertaler, sondern von einem unbekanntem Dritten.

Die Abweichung ist deutlich: Während sich die mtDNA des Neandertalers an durchschnittlich 202 Positionen von der des Menschen unterscheidet und die des Schimpansen an mehr als 1400, sind

es beim Fingerknochen aus der südsibirischen Denisova-Höhle 385 Positionen. Anhand der Mutationsrate, der molekularen Uhr, errechneten Krause und sein Team, dass dieser vermeintliche Hominidenzweig sich vor rund einer Million Jahren von dem Ast trennte, auf dem später Neandertaler und *Homo sapiens* entstanden.

Aufregend ist der Fund auch, weil er einen Beitrag zu einem neuen Bild von der Evolution der Hominiden leistet. Der moderne Mensch hat offenbar über viele 10000 Jahre die Erde mit anderen Menschenarten bewohnt, die alle irgendwann ausstarben, während *Homo sapiens* die Welt eroberte. Schon der Fund des „Hobbits“, des kleinen *Homo floresiensis* auf der indonesischen Insel Flores, liefert seit 2004 Stoff für diese These.

Doch bevor die Leipziger Max-Planck-Forscher sich definitiv festlegen, wollen sie erst die DNA des Zellkerns sequenzieren und analysieren. „Im Moment gibt es ständig neue Ergebnisse, die auch Bisheriges wieder in Frage stellen. Es ist alles viel komplexer, als wir zunächst dachten“, sagt Johannes Krause. Hat es wie beim Neandertaler vielleicht sogar eine Vermischung gegeben? Bis Ende des Jahres hofft er auf eine endgültige Antwort.





Die nachgebaute Neandertaler-Szenerie zeigt, dass die Forscher der Abteilung Pääbo auch mit Spielwitz an ihre Arbeit gehen.

gebraucht oder 10000 Maschinen ein Jahr – was bei einem Preis von mehreren 100 000 Dollar unmöglich zu finanzieren gewesen wäre.“

### DATENANALYSE DAUERTE FAST EIN JAHR

Den Unterschied zwischen alter und neuer Generation dieser ansonsten unscheinbaren Kästen verdeutlicht vielleicht am besten ein Blick auf die etwa handtellergrößen Trägerplatten mit Vertiefungen, in denen die DNA-Fragmente sequenziert werden: Auf den alten Maschinen gibt es 96 Einbuchtungen pro Platte, bei der 454 Life Science-Maschine sind es 1,6 Millionen. „Das bedeutet, dass man mehr als eine Millionen DNA-Fragmente pro Platte parallel sequenzieren kann, im Vergleich zu 96 pro Platte bei der alten Generation“, sagt Briggs.

Dass sich die Forscher den neuesten Schrei der Sequenzieretechnik leisten konnten, verdanken sie einer zusätzlichen Finanzspritze aus dem strategischen Innovationsfonds des Präsidenten. „Das muss man auch mal sagen: Es gab in der Max-Planck-Gesellschaft einfach Leute, die das Potenzial erkannt

und die Mittel zur Verfügung gestellt haben“, sagt Pääbo.

Der Aufwand an Zeit, Geld und Arbeit hat sich gelohnt. Im Februar 2009 verkündete das Team, dass das Ziel erreicht sei. Allerdings blieb es erst einmal dabei, veröffentlicht wurde die Sequenz noch nicht: „Wir hatten einfach das Gefühl, wir müssten der Welt sagen: Wir haben es gemacht“, sagt Pääbo. Eine erste Analyse der Daten dauerte dann noch einmal ein knappes Jahr. Und das Ergebnis kann sich sehen lassen: ein echter Meilenstein in der Erforschung der menschlichen Evolution. Pääbo und seine Mitarbeiter haben vier Milliarden Basenpaare sequenziert, aus denen sie mehr als 60 Prozent der Neandertaler-Sequenz durch den Vergleich mit dem Genom des Menschen und dem des Schimpansen rekonstruieren konnten.

„Manche Positionen in der Sequenz haben wir mehrmals sequenzieren können, andere dafür überhaupt nicht“, sagt Johannes Krause, der seit 2005 im Labor von Pääbo arbeitet. Mehr als 80 Prozent des Neandertaler-Genoms werden die Forscher rekonstruieren können: „Für den Rest sind die Fragmente einfach zu klein“, so Krause. Für die

Analyse arbeiteten die Leipziger Forscher mit weiteren Laboren, vor allem in den USA, in einem mehr als 50 Personen umfassenden internationalen Konsortium zusammen.

Dass sich Neandertaler und Mensch in geringem Maße vermischt haben, war die eine Überraschung – und weltweit zu lesen und zu hören. Ein bis vier Prozent der DNA der Menschen außerhalb Afrikas stammen vom Neandertaler. Noch überraschender für die Forscher war aber, dass der bullige Eiszeitmensch nicht nur in Europa, sondern auch in China und Papua-Neuguinea seine genetischen Spuren hinterlassen hat. „Das haben wir nicht erwartet“, sagt Pääbo. Denn bis heute gibt es keinerlei Hinweise, dass in diesen Regionen jemals Neandertaler gelebt haben. Folglich muss es zu sexuellen Kontakten gekommen sein, bevor der frühe moderne Mensch sich von Afrika kommend über Eurasien ausgebreitet hat.

Die einfachste Erklärung wäre ein Zusammentreffen der beiden im Mittleren Osten. In einem Zeitraum zwischen 80000 und 50000 Jahren vor heute lebten die beiden Menschentypen in derselben Region – das belegen paläontologische Funde. Noch ist aller-



Sie haben den Neandertaler-Code geknackt. Vordere Reihe von links: Hernán Burbano, Anja Buchholz, Svante Pääbo, Janet Kelso, Qiaomei Fu und Martin Kircher; hintere Reihe von links: Adrian Briggs, Jesse Dabney, Matthias Meyer, Tomislav Maricic, Johannes Krause, Udo Stenzel und Kay Prüfer.

dings nicht ganz ausgeschlossen, dass die genetischen Spuren nicht schon auf anderem Wege vor etwa 200000 bis 300000 Jahren irgendwo in Afrika in die Abstammungslinie gelangten. Es wäre nur ein deutlich komplizierteres Szenario notwendig.


### WAS MACHT UNS EINZIGARTIG?

Für Svante Pääbo sind aber noch ganz andere Dinge wichtig: „Wir können jetzt einen Katalog erstellen, in dem jene Veränderungen unseres Genoms zu finden sind, die uns wirklich einzigartig machen. Die uns nicht nur vom Schimpansen unterscheiden, sondern auch von unserem nächsten Verwandten.“ Die Alleinstellungsmerkmale der Spezies *Homo sapiens* sozusagen, all die genetischen Einzigartigkeiten, die sich in den vergangenen 300000 Jahren in unserem Genom fixiert haben. Mehr als 200 solcher Bereiche haben die Forscher schon gefunden. Die wichtigsten 20 finden sich auch im SCIENCE-Artikel. „Das sind die Bereiche, die mich am meisten faszinieren“, sagt Pääbo.

Noch ist es zu früh, um konkrete Aussagen zu machen; es sind eher vage Andeutungen. Da gibt es Gene, die mit

kognitiver Entwicklung zu tun haben. Mutationen in diesen Genen stehen beim Menschen im Zusammenhang mit Schizophrenie und Autismus. „Das heißt jetzt aber nicht, dass Neandertaler diese Krankheiten hatten“, warnt Svante Pääbo. Aber es gibt auch das Gen RUNX2. In seiner mutierten Variante führt es beim Menschen zu *Cleidocranialer Dysostose*, bestimmten Verformungen im Skelett: Der Brustkorb wird glockenförmig, die Schulterknochen verändern sich und – der Augenbrauenwulst verdickt sich. Sieht fast aus wie das Skelett, das hinter Svante Pääbo steht. Doch der Paläogenetiker wiegelt ab: „Nein, das wäre zu einfach“, sagt er und lacht.

So leicht kann es nicht sein, die Unterschiede zwischen Mensch und Neandertaler zu offenbaren. Manchmal vielleicht doch? Die Hauptsache ist, dass es jetzt überhaupt möglich ist. Wir werden dem genetischen Geheimnis wieder ein Stück näherkommen, das uns zum *Homo sapiens* macht – indem wir uns in unserem nächsten Verwandten spiegeln. Die Wissenschaftler haben mit ihrer Arbeit gerade erst begonnen. ◀

 [www.film.mpg.de](http://www.film.mpg.de)  
[www.youtube.com/user/MaxPlanckSociety](https://www.youtube.com/user/MaxPlanckSociety)

### GLOSSAR

#### Mitochondrien

Von einer Doppelmembran umschlossene Zellorganellen mit eigener Erbsubstanz (mtDNA), deren Aufgabe es ist, die Zelle mit Energie in Form von ATP zu versorgen. Mitochondrien werden nicht neu gebildet, sondern gehen durch Teilung auseinander hervor. Sie sind vermutlich in einem frühen Stadium der Evolution entstanden, indem sich eukaryotische, also kernhaltige Zellen Bakterien einverleibt und diese umfunktioniert haben (Endosymbiose).

#### Nukleobasen

Die Grundbausteine der DNA und RNA sind die Nukleotide. Sie setzen sich aus einem Phosphatrest, einem Zuckerbaustein sowie einer der fünf Nukleobasen Adenin (A), Guanin (G), Cytosin (C), Thymin (T) oder Uracil (U) zusammen. Letztere sind die Buchstaben des genetischen Codes und bilden die jeweilige Sequenz.

#### Hochdurchsatz-Sequenzierung

Innerhalb kurzer Zeit kann die Buchstabenfolge von immer mehr genetischen Abschnitten ausgelesen werden. Das führt zu einem enormen Anstieg bei der Erzeugung von Sequenzdaten und gleichzeitig zur Reduktion von Kosten. Ganze Genome werden sich in absehbarer Zeit für einige tausend Euro sequenzieren lassen.



# Meer Leidenschaft

Statt als Primaballerina, die sie einmal werden wollte, bewegt sie sich auf dem internationalen Parkett der Wissenschaft – und das mit großem Erfolg: **Nicole Dubilier** erforscht am Bremer **Max-Planck-Institut für marine Mikrobiologie** Bakterien und Würmer in der Tiefsee.

TEXT **KLAUS WILHELM**

**W**elch ein Lachen! Tief, herzlich, einnehmend, natürlich, temperamentvoll, kumpelhaft, auch laut. Immer wieder bricht es aus Nicole Dubilier heraus – so, als könne sie gar nicht anders. Selbst, oder gerade, bei den Themen, die ihr Leben bedeuten: die Wissenschaft, die Familie, das Meer.

Man muss sich die Biologin des Max-Planck-Instituts für marine Mikrobiologie als fröhlichen, gar glücklichen Menschen vorstellen, wenn sie etwa von ihren Exkursionen mit den Forschungsschiffen *Meteor*, *Sonne* oder *Maria S. Merian* in den Atlantik oder Pazifik erzählt. Wenn sie von Symbiosen erzählt, diesen engen Zweckgemeinschaften verschiedener Organismen zum beiderseitigen Nutzen. Vom neuen Kosmos der Molekularbiologie, der die Geheimnisse dieser Symbiosen allmählich enthüllt. Und von Bakterien und Würmern. Ja: von Würmern! Und frisch, zuweilen freimütig in ihrer geerdeten Art erzählen kann sie mindestens so gut wie lachen – und forschen. Sie mag Geschichten und das Leben und ihr Leben. Das zumindest glaubt man sofort zu spüren.

Jetzt sitzt Nicole Dubilier, 53, in ihrem schlichten Büro im ersten Stock des

Bremer Instituts. An der Pinnwand eine Karte mit Geburtstagsgrüßen von der Crew der *Maria S. Merian* und ein humoristischer „Taufschein“ von der Crew der *Meteor* für das Überqueren des Äquators auf hoher See. Ein paar Schreibtische und Regale mit Fachliteratur, ein Ausblick auf den Garten und den Teich des Instituts und in der Ferne den Wald des Bürgerparks – ein Ausblick, der durchaus als Quell der Kreativität dienen dürfte. Von diesem Büro aus leitet „Nicole von Wurm“, wie das selbstironische und doch tief symbolhafte Namensschild an der Bürotür bezeugt, seit 2001 die inzwischen zwölfköpfige Selbstständige Arbeitsgruppe „Symbiose“.

## **DREIERKISTE MIT EINEM WURM UND ZWEI BAKTERIEN**

Dieses Forschungsfeld hat das Energiebündel von der Waterkant – Nicole Dubilier lebt seit Ende der 1970er-Jahre in Hamburg – in der vergangenen Dekade maßgeblich mitgeprägt. Sie entdeckte eine neue Form der Zweckgemeinschaft: eine symbiontische „Dreierkiste“ mit einem Wurm und zwei Bakterien, bei der, anders als angenommen, alle Beteiligten profitieren. Die Entde-



Foto: Björn Schwentker



Gestenreich im Seminarraum: Wenn Nicole Dubilier vor Studenten redet, setzt sie nicht nur auf Diskussion und Humor. Sie spricht auch mit ausgeprägter Mimik und mit ihren Händen.



» Dreimal wollte Dubilier alles hinschmeißen, immer wieder hat sie die Zähne zusammengebissen. Die Frau ist zäh und willensstark. Nach sechs Jahren Kampf thronte der Doktor-Hut auf ihrem Haupt.

ckung war der renommierten Fachzeitschrift *NATURE* einen „Letter“ wert. Der Ritterschlag für jeden Forscher: „Ich war damals mächtig stolz.“ Sie lacht.

Tatsächlich hat der Wurm aus dem Mittelmeer vor Elba „mein wissenschaftliches Leben schlagartig verändert“, so Dubilier. Nichts deutete in jungen Jahren darauf hin: Weder hat sie als Kind Regenwürmer zerlegt, weil die sich so prächtig regenerieren. Noch hat sie zu Beginn ihres Biologiestudiums Leidenschaften für das Getier entwickelt. Im Gegenteil: Wie alle Bio-Zweitsemester musste sie einen Regenwurm präparieren und dessen Anatomie erkunden. Und den für alle Biologie-Studenten berühmt-berüchtigten Satz im *Kükenthal*, dem *Leitfaden für das Zoologische Praktikum*, lesen: „Die Vielfalt der Strukturen, ihre Organisation und Ordnung und die farbliche Abstimmung der Gewebe wird jeden begeistern, der nicht stumpfen Sinnes ist.“ Dubilier lacht: „Dann war ich wohl stumpf.“

Der Blick für die Spannung im Ungeöhnlichen reift zuweilen eben erst später im Leben. Der Wenigborster *Olavius algarvensis* ist bestimmt keine Vorzeigeart der Meereswelt, nicht so imposant wie ein Wal, nicht so erheiternd wie ein Delfin. Aber gewöhnlich ist er nicht. Das würde auch nicht zu Nicole Dubilier passen. Der Exot, gerade mal ein bis zwei Zentimeter lang, durchwühlt das obere Sediment im sandigen Meeresboden der flachen Küstengewässer vor der Insel. Im Mikroskop erscheint sein Körper milchig-weiß und gewunden wie die Röhren eines Tauchsieders.

*Olavius* ist schlank, mit seinen 0,2 Millimetern Durchmesser ein echtes Magermodell der Würmerwelt. Er ist verwandt mit dem schnöden Regenwurm, was seiner Besonderheit kaum

gerecht wird. Denn der marine Wurm frisst nicht einen Bissen und lebt dennoch ausgezeichnet. Er hat weder Mund noch Magen noch Darm noch After. Der komplette Verdauungstrakt fehlt. Auch nach nierenartigen Organen für die Ausscheidung von Abfallstoffen wie Ammonium und Harnstoff suchen Anatomen vergeblich.

#### DER WIRT GARANTIERT DIE NÄHE ZUR NAHRUNGSQUELLE

Schon Anfang der 1980er-Jahre entdeckten US-Wissenschaftler Röhrenwürmer am Grund der Tiefsee – an den Schwarzen Rauchern, kochend heißen Quellen, die ihre Höllensuppe aus der Erde spucken. Eine Suppe, die mit für fast alle Tiere tödlichem Schwefelwasserstoff (Sulfid) angereichert ist, jenem Gas, das faule Eier so übel stinken lässt. Die Röhrenwürmer trotzen der Gefahr durch einen Trick: Sie haben sich irgendwann in ihrer Evolution Bakterien einverleibt, die den Schwefelwasserstoff chemisch umsetzen und damit unschädlich machen.

Mit dem Vorgang gewinnen diese „Sulfidoxidierer“ Energie, die sie wie alle Organismen zum Leben brauchen. Das ganze Spektakel aber ist nichts weiter als eine klassische Symbiose. Denn der Wirt garantiert seinem Gast im Gegenzug die stete Nähe zur Nahrungsquelle. Eine Gemeinschaft zweier Lebewesen zum gegenseitigen Nutzen.

Kurze Zeit später spürte Nicole Dubiliers Doktorvater Olav Giere von der Universität Hamburg eine ähnliche Symbiose in darmlosen Würmern auf – gefunden nicht in der Tiefsee, sondern an der Küste von Bermuda. Auch sie gediehen prächtig in sulfidreichem Sediment. Auch sie schienen Bakterien zu beherbergen.

Derweil quälte sich Nicole Dubilier mit ihrer Promotion – eine Arbeit aus der Physiologie. Das Thema behandelte zwar Würmer, war aber dröge. Das Wetter über dem Schlick von Sylt bei der Feldarbeit eine Katastrophe: „Ich hatte meine persönliche Regenwolke.“ Sie lacht. Immer schon wusste sie, dass Beruf für sie Leidenschaft und Erfüllung sein sollte. Und jetzt das!

Als 15-Jährige hatte sie sich von ihrem ersten Traum verabschiedet: dem klassischen Tanz. Jeden Nachmittag nach der Schule hing Nicole Dubilier mit eisernem Willen an der Ballettstange. Die Aufnahmeprüfung für die renommierte Tanzausbildung an der Stuttgarter Akademie war geschafft. Dann kam es anders. Zu sehr war der Teenager in jenen Tagen politisch interessiert: „Mit den dortigen Ballettmäusen konnte man kein vernünftiges Wort wechseln.“ Sprachlosigkeit ist ihre Sache nicht, Inhaltsleere nicht minder. Und: „Mit 30 wäre die Tanzkarriere ohnehin vorbei gewesen.“ Die Frau handelt überlegt. Mit wachem Geist und scharfem Verstand.

Jahrelang allerdings hing sie der Sehnsucht nach. Nun, zu Zeiten der Promotion, schien der nächste Traum zu platzen: der einer erfüllten Forscherin, eines Menschen, der so von seinem Sujet gepackt ist, dass er selbst unter der Dusche kreativ darüber sinniert. Dreimal wollte Dubilier alles hinschmeißen, immer wieder hat sie die Zähne zusammengebissen. Die Frau ist zäh und willensstark.

Nach sechs Jahren Kampf, 1992, thronte der Doktorhut auf dem Dubilier'schen Haupt. Weitere Jahre dieser Art würde sie allerdings nicht durchhalten, das wusste sie. Denn „es ist frustrierend, wenn man hart arbeitet und nicht erfüllt ist.“ Der Plan: „Ein Jahr



1



2

- 1 Das Mikrotom ist ein Schneidegerät für hauchdünne Scheiben organischen Materials, das in einem Wachsblock eingeschlossen ist.
- 2 Nur noch in ruhigen Momenten auf Ausfahrten kommt Nicole Dubilier dazu, am Mikrotom zu hantieren.
- 3 Wohlgenährt auch ohne Verdauungstrakt: Der mit dem Regenwurm verwandte Oligochaet *Olavius algarvensis* hat zwar weder Mund noch Darm, aber verhungern muss er nicht. Das verdankt der gerade einmal zwei Zentimeter kurze Organismus bakteriellen Endosymbionten.



3





1

- 1 | Dialog in der Landerhalle: Nicole Dubilier diskutiert mit dem „Sea Technician“ Marc Viehweger über Verbesserungen des Instrumentariums.
- 2 | Ohne Lachen geht es nicht: Nicole Dubilier hat sichtlich Spaß bei der Arbeit.
- 3 | Rückblick auf die letzte Seereise: Mit einem Teil ihres Teams – Caroline Verna, Karina van der Heijden, Silke Wetzel und Dennis Fink (von links) – bespricht Nicole Dubilier eine Karte von einem Hydrothermalquellenfeld auf dem Mittelatlantischen Rücken.



2



3

» Die Erstgeborene von vier Kindern kommt aus gutem Hause. Der Vater ein amerikanischer Geschäftsmann, die Mutter eine Nachfahrin von Fanny Mendelssohn, der Schwester des Komponisten Felix Mendelssohn-Bartholdy, und des berühmten Berliner Physiologen Emil du Bois-Reymond.

gebe ich mir noch als Post-Doc“ – mit einem anderen Thema, mit einer anderen Art der Forschung. Sie würde es merken, wenn es sie wirklich packen sollte. Es musste sich nur so anfühlen wie beim Ballett.

Es sollte die Molekularbiologie sein. Es sollte die Symbiose von Würmern mit Bakterien sein. Molekularbiologie deshalb, weil sie auf eine gewisse Weise weniger beschwerlich ist als Physiologie: „Wenn es da einmal klappt, dann ist es gut. Man muss den Versuch nicht fünfmal wiederholen“, sagt die Forscherin. An der Symbiose faszinierte sie der Gedanke der Kooperation, dass nicht nur Egoismus und Konkurrenz die Evolution vorantreiben, sondern auch Zusammenarbeit und Gegenseitigkeit als Motor von Entwicklung wirken. In dieser Lebensform gibt jeder etwas, was dem anderen hilft. „Das hat mich berührt“, sagt sie, „so sehr, dass es mich bekümmert hat, wenn manche Symbionten ihren Partner betrügen.“

Das alles wirkt wie eine typisch weibliche Sicht der Dinge: Kooperation statt Egoismus. Derlei Einwände kontert Nicole Dubilier mit Fakten und dem Herzblut der beseelten Forscherin. Dann erzählt sie davon, dass die Symbiose ein urzeitlicher Prozess ist: Ohne Symbiosen hätte sich das Leben auf der Erde nicht entwickeln können. Vor allem die Symbiose zwischen Bakterien und primitiven Einzellern habe die Ausbreitung und Evolution von pflanzlichen und tierischen Zellen befeuert und das Leben bestimmt.

Noch heute beherbergt nahezu jede pflanzliche, tierische und menschliche Zelle mit ihren winzigen Energiekraftwerken, den Mitochondrien, die Nachfahren früherer bakterieller Symbionten – ohne Mitochondrien könnten wir nicht atmen. Dann erzählt sie da-

von, dass im menschlichen Gedärm unzählige Bakterien gedeihen und sich etwa revanchieren, indem sie die Verdauung unterstützen oder womöglich das Immunsystem stärken. Wohin man auch blickt: Symbiosen, Symbiosen, Symbiosen.

So mag es erstaunen, dass das Forschungsgebiet Symbiose erst Mitte der 1990er-Jahre zaghaft Fahrt aufnahm. Um mehr über die Entstehung dieser Lebensgemeinschaften zu erfahren, brauchte es allerdings ein möglichst schlichtes Modellsystem. Da kamen Olav Gieres darmlose Flachwasser-Bermuda-Würmer mit ihren bakteriellen Symbionten wie bestellt. Die Kulturen der Würmer im Gepäck, machte sich Nicole Dubilier auf zur Harvard University in das Labor von Colleen Cavanaugh, die entscheidend an der Entdeckung der symbiontisch lebenden Tiefsee-Röhrenwürmer beteiligt war. An derart prominenter Stelle holte sie sich das Rüstzeug der molekularen Technik.

### KREATIVITÄT STECKT DER FAMILIE IM BLUT

Es war auch eine Rückkehr in ihr Geburtsland: Nicole Dubilier ist Amerikanerin mit durchaus bewegter Lebensgeschichte. Wer sie hanseatisch schnacken hört, würde zunächst kaum darauf kommen. Doch gelegentlich mischt sich ein amerikanischer Akzent in ihren forschenden deutsch-hamburgerischen Redefluss. Geboren in New York City, aufgewachsen in der Upper East Side, einem der noblen Viertel des Big Apple. Kein Zweifel: Die Erstgeborene von vier Kindern kommt aus gutem Hause. Der Vater ein amerikanischer Geschäftsmann, die Mutter eine Nachfahrin von Fanny Mendelssohn, der Schwester des Komponisten Felix Mendelssohn-

Bartholdy, und des berühmten Berliner Physiologen Emil du Bois-Reymond. Kreativität steckt im Blut der Familie.

Die deutsche Mutter emigriert Mitte der 1950er-Jahre in die USA und heiratet. „Ein Spannungsfeld von Anfang an“, wie die Tochter heute sagt. „Meine Eltern waren wie Feuer und Wasser, das war alles ziemlich chaotisch.“ Da passt es ins Bild, dass die Familie 1970 nach Deutschland zurückkehrt, nach Wiesbaden, wo Nicole Dubilier 1977 in der bundesweit bekannten Helene-Lange-Schule ein 1,3er-Abitur hinlegt. „Die Schule hat mir unheimlich Spaß gemacht“, sagt sie. Es sind aber nicht die Fächer Physik, Chemie oder Biologie – Politik-, Geistes- und Sozialwissenschaften faszinieren sie in jener Zeit. Diskutieren, protestieren, auseinandersetzen. Die Frau ist interessiert an gesellschaftlichen Entwicklungen – auch heute noch.

In diesem Licht klingt die Wahl des Fachs Biologie wie der reine Hohn. Doch „ich wollte auch etwas mit meinen Händen machen, etwas, was Denken und Bewegung verbindet.“ Biologie, am besten Meeresbiologie. Die Liebe zum Meer sitzt tief, geprägt von alljährlichen zweimonatigen Ferien der Familie auf Fire Island, einer schlauchartigen Insel vor Long Island. „Das Paradies für uns Kinder.“ Der andere entscheidende Punkt für die Studienwahl: „Ich wollte angesichts des chaotischen Familienlebens irgendwie Ordnung finden, Logik. In einer Naturwissenschaft, dachte ich, gibt zwei plus zwei immer vier.“ Eine junge Suchende nach der einfachen Wahrheit. Sie lacht.

Dass Forschung erst richtig spannend wird, wenn zwei und zwei – scheinbar – fünf ergeben, hat sie spätestens in Harvard begriffen. Derlei Ungereimtheiten zu lösen, verspricht



» Wenn sie, wie an diesem Nachmittag, mit ihren Mitarbeitern zusammensitzt, ist die Atmosphäre konstruktiv und freundlich. Es geht um die nächste Fahrt mit der *Meteor* an den Mittelatlantischen Rücken – für alle ein großes Ereignis.

wissenschaftlichen Ruhm. So auch Ende der 1990er-Jahre, als Olav Giere und der schwedische Taxonom Christer Erseus vor Elba eher zufällig *Olavius algarvensis* aufspürten. Sofort gab der Fund Rätsel auf: So genau die Forscher auch suchten, im Sediment der Bucht Capo di Sant'Andrea waren keine Sulfide zu finden. Alle zuvor entdeckten darmlosen Ringelwürmer lebten in sulfidreichen Böden. Elektronenmikroskopische Aufnahmen bezeugten zudem, dass mindestens zwei morphologisch unterschiedliche Bakterienarten in den Würmern hausten.

Nichts passte richtig zusammen, bis Nicole Dubilier die sogenannten 16s-rRNA-Gene der Einzeller entschlüsselte. Die 16s-rRNA gilt unter den Experten als eine Art molekularer Personalausweis einer bakteriellen Spezies. Heraus kam eine für die Symbiose-Forschung bahnbrechende Entdeckung: eine harmonische Menage à trois – ein Wirt mit zwei Symbionten; und alle profitieren.

### EINE ENTDECKUNG LÄSST DIE ZWEIFLER VERSTUMMEN

Weil kein oder zu wenig Schwefelwasserstoff im Sediment vorkommt, hat sich *O. algarvensis* eine Schwefelwasserstoffquelle einverleibt. Ein Bakterium, das aus Sulfat Sulfid herstellt und über diesen Prozess Energie gewinnt. Den Schwefelwasserstoff wiederum verwenden die altbekannten sulfidoxidierenden Bakterien als Energiequelle.

So erwächst ein erst mit dem Tod des Wirts endender Kreislauf, in dem die beiden Bakterienarten ihre Stoffwechselprodukte untereinander aus-

tauschen. Dieses biologische Konstrukt funktioniert so prächtig, dass die Bakterien aus Kohlendioxid einen Überschuss organischer Kohlenstoffverbindungen produzieren und den Wurm damit ernähren. Die Mikroben nehmen ihrem Wirt auch alle lästigen Abfallprodukte ab, die er sonst ausscheiden müsste. „Einfach genial“, findet Nicole Dubilier. Der Wurm macht sich weitgehend unabhängig von externen Energiequellen und kann neue Lebensräume ohne hohe Sulfidvorkommen besiedeln. „Meine wissenschaftlich wichtigste Leistung, und keiner hat es vorher geglaubt.“ Doch die Zweifler verstummen.

Nicht zuletzt durch diese Entdeckung etablierte sich Nicole Dubilier im Jahr 2001 längerfristig am Bremer Max-Planck-Institut. „Ich wollte immer an dieses Institut, weil es optimale Arbeitsbedingungen bietet.“ Eine eigene Arbeitsgruppe – jetzt war die Forschungsorganisatorin Nicole Dubilier gefordert. Büro statt Labor, neue Perspektiven entwickeln, gemeinsam mit ihren Mitarbeitern. „Die sind klasse“, sagt sie in einer fast kumpelhaften Art, „das Teamwork macht unheimlich Spaß.“ Fast hätte man es von einer Symbiose-Forscherin erwartet.

Wenn sie, wie an diesem Nachmittag, mit ihren Mitarbeitern zusammensitzt, ist die Atmosphäre konstruktiv und freundlich. Es geht um die nächste Fahrt mit der *Meteor* an den Mittelatlantischen Rücken – für alle ein großes Ereignis. Das muss bestens vorbereitet sein. Und wenn, wie jetzt, alle herumdrücken, nur weil sie eine bestimmte Routine-Aufgabe nicht erledigen

wollen, wird die Chefin auch mal bestimmt: „Das muss jetzt geklärt werden, wer macht das?“ Sie lacht.

Zusammen mit Partnern aus dem Bremer Institut, aus Deutschland und anderen Ländern liefern Dubilier und ihr Team regelmäßig hochklassige Ergebnisse. So haben die Forscher das „Biotop *O. algarvensis*“ inzwischen mit neuen molekularen Methoden noch genauer untersucht und bis zu vier verschiedene Bakterienarten aufgespürt, eine Ménage à plusieurs. Zwei Sulfat-reduzierer, zwei Sulfidoxidierer. Überraschenderweise fixieren alle vier Symbionten Kohlendioxid. Warum die Redundanz? Das ist bislang unklar.

### MODELL FÜR EINE SICH SELBST ERHALTENDE BIOSPHÄRE?

Vielleicht aber werden die unterschiedlichen Stoffwechselsysteme in verschiedenen Sedimenten gebraucht, in eher sauerstoffreichen oberen Sandschichten und in eher nitratreichen tieferen Sandschichten. Klar aber ist: Der Wurm hat ein regelrechtes symbiotisches Kraftwerk im Körper eingebaut. „*O. algarvensis* zeigt, wie begrenzte Ressourcen genutzt werden können, indem aufeinander abgestimmte Mikrobengemeinschaften zusammenwirken“, erklärt Nicole Dubilier. So könnte die Wurm-Bakterien-Symbiose ein Modell für eine sich fast selbst erhaltende Biosphäre sein. Ein System, wie es die Raumfahrt im großen Maßstab für lange Expeditionen wie etwa zum Mars braucht.

Derlei Dinge vermerkt sie auf die immer wieder gestellte Frage, wozu ihre Symbiosen-Wissenschaft denn taugen



Auf der Bühne der Wissenschaft: Früher hat Nicole Dubilier ausgiebig Ballett gemacht. Doch mit 15 gab sie ihren Traum vom klassischen Tanz auf. Ein paar Jahre später startete sie eine überaus erfolgreiche Karriere in der Meeresbiologie.

möge. Dann erzählt Nicole Dubilier etwas vom Kohlenstoffhaushalt der Meere und davon, wie das Wohlbefinden der See unmittelbar mit der Artenvielfalt gekoppelt ist. Und dass viele Prozesse der symbiontischen Bakterien auch wichtig für die Infektionsforschung sein könnten. Ja, das auch. Aber vor allem will die 53-Jährige in unbekanntes Terrain vorstoßen – den Blick offen halten für das Unerwartete, weitgehend frei von den Fesseln angewandter Forschung.

Ein vergleichsweise neues Gebiet ist für Dubilier die Erforschung von Muscheln im Dunkel der Tiefsee. Dort fristen sie ihr Dasein auf Walkadavern, an Schwarzen Rauchern oder kalten Gasaustritten, wo Schwefelwasserstoff entweicht. Die Muscheln kultivieren bakterielle Symbionten in bestimmten Zellen ihrer Kiemen, wo sie ihnen ständig ein Gemisch aus sauerstoffhaltigem Meerwasser und Sulfiden heranpumpen.

Bei Untersuchungen dieser Symbiose entdeckte das Max-Planck-Team aber auch Bakterien, die den Zellkern von Muschelzellen infizieren. Interessanterweise dringen diese Parasiten nur in Kerne von Zellen ohne Symbiose ein. „Deshalb vermuten wir, dass die Symbiose irgendwie vor der Infektion schützen kann“, sagt Nicole Dubilier. Nun haben ihre Mitarbeiter derlei Zellkern-Infektionen sogar bei handelsüblichen Miesmuscheln nachgewiesen.

Das immerhin macht die Erforschung des Phänomens unbeschwerlicher, denn an Flachwassermuscheln ist leichter heranzukommen als an ihre Verwandten in der Tiefsee. Obwohl, ja obwohl allein der Gedanke an eine Exkursion in die Ozeane der Welt Nicole Dubiliers Augen sofort leuchten lässt: „Auf dem Meer bin ich einfach glücklich.“ So empfindet sie es als Privileg, zumindest einmal im Jahr mit der *Meteor* oder der *Merian* hinauszufahren und sich ein paar Wochen lang den Wind um die Ohren blasen zu lassen.

### FASZINIERENDE AUFNAHMEN AUS DER UNTERWASSERWELT

Dabei ist der Alltag an Bord mitunter hart. Ein Alltag, der frühmorgens beginnt, wenn das unbemannte, ferngesteuerte Tauchboot, das *Remotely Operated Vehicle* (ROV), zum Grund des Meeres abtaucht. Wenn sie mit den Piloten, die den ROV steuern, in einem kleinen dunklen Container vor den großen Bildschirmen sitzt, welche die Kamerabilder des ROV zeigen. „Als ob man selbst drin säße“, schwärmt sie. Wenn sie die Piloten instruieren muss, was sie mit den Greifarmen des ROV aus dem Sediment des Meeres fischen sollen – in jüngster Zeit vor allem Muscheln. „Wenn es gut läuft, ist das ein Riesenspaß, und wenn es schlecht läuft, zofft man sich.“ Sie lacht.

Und gegen Abend, wenn das ROV wieder aufgetaucht ist, geht die Arbeit für die Forscher weiter. Im Schiffslabor präparieren und analysieren sie Getier samt Mikroben. „Dann staunen meine Leute, dass ich im Labor immer noch brauchbar bin“, sagt Dubilier. Der Job kann die ganze Nacht dauern. „Eine Muschel aus der Tiefsee in den Händen zu halten, an ihr zu schnüffeln, ob sie nach Sulfid riecht, sie zu begutachten, das ist eine ungeheure Befriedigung.“ Und sie liebt die Momente, wenn sie nach 20 Stunden Rackern, völlig übernächtigt, am frühen Morgen mit den gleichermaßen ermatteten Kollegen auf einen Schnack zusammensitzt.

Auf derlei Fahrten geht sie erst wieder, seit ihr Sohn vor vier Jahren acht geworden ist. Aber auch nur, weil sie weiß, dass ihr Mann die Kinderbetreuung übernimmt. „Der macht es super.“ Auch hier pflegt sie den Gedanken der Kooperation. „Ich habe mit meinem Mann vereinbart, dass wir uns die Erziehungsaufgaben gleichberechtigt teilen, und das ziehen wir auch durch.“ Da spricht sie: Nicole Dubilier, die Mutter, die Meeres-, Mikro- und Molekularbiologin, die Powerfrau, die, wenn man sie nur lässt, bis 80 arbeiten will. Und die dabei nur denken will, „dass mein Team die tollste Forschung der Welt macht.“ Sie lacht. Natürlich. ◀



Ein Test für den Magnet-sinn: Wenn Damien Faivre ein Röhrchen mit einer magnetischen Bakterienkultur erst parallel und dann senkrecht in ein Magnetfeld hält, trübt sich die Flüssigkeit ein. Die Mikroben richten sich nämlich mithilfe ihrer Magnetosomen an dem Feld aus.





# Magnete – von Mikroben gemacht

In der Medizin wären sie ein wichtiges Hilfsmittel: Magnetische Nanopartikel, wie sie magnetotaktische Bakterien produzieren, könnten etwa bei der Suche nach Tumoren helfen. **Damien Faivre** und seine Mitarbeiter am Potsdamer **Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung** untersuchen, wie die Mikroben arbeiten, um sich deren Raffinesse zunutze zu machen.

TEXT **CHRISTIAN MEIER**

**N**icht nur für Seefahrer früherer Zeiten war der Kompass ein unverzichtbares Mittel, um sicher das Ziel zu erreichen. Auch manche im Wasser lebenden Bakterien orientieren sich am Magnetfeld der Erde. Als inneren Kompass tragen sie eine Kette aus winzigen Nanopartikeln des magnetischen Minerals Magnetit in sich.

Diese Teilchen, die die Bakterien selbst herstellen, haben so einzigartige magnetische Eigenschaften, dass sie für die Medizintechnik und andere technische Anwendungen von großem Interesse sind. Allerdings weiß bislang nur die Natur, wie man sie herstellt. Der Chemiker Damien Faivre des Potsdamer Max-Planck-Instituts für Kolloid- und Grenzflächenforschung will mit seinem siebenköpfigen Team das Geheimnis lüften. Wenn die Forscher verstehen, wie die Bakterien die Nanopartikel herstellen, dann, so ihre Hoffnung, kann ein Verfahren entwickelt werden, um die Teilchen zunächst im Reagenzglas und später in industriellem Maßstab zu fertigen.

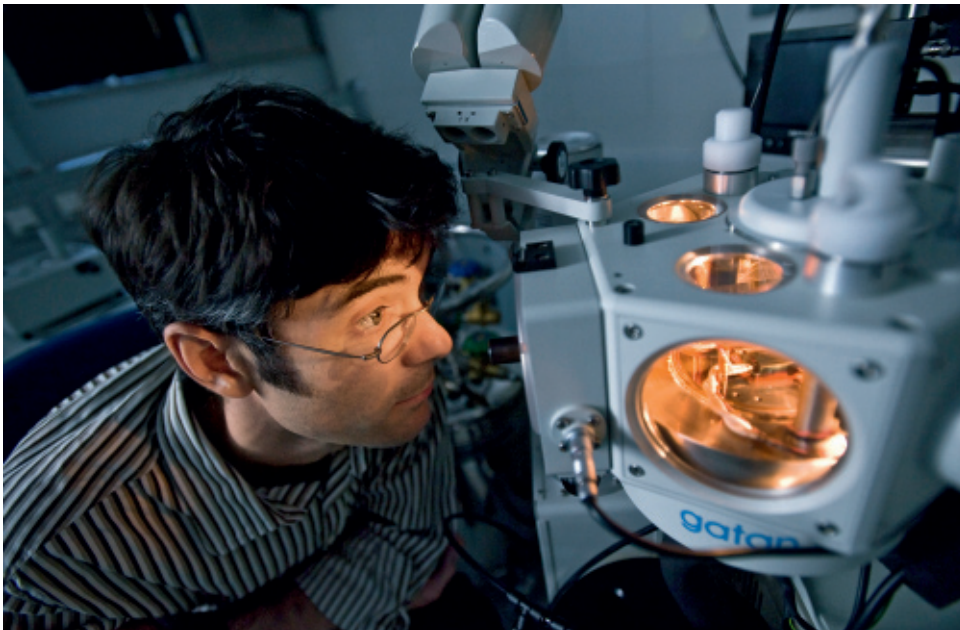
1975 entdeckte der US-amerikanische Mikrobiologe Richard Blakemore, dass sich manche Wasserlebewesen am

Magnetfeld der Erde orientieren, und gab ihnen einen entsprechenden Namen: magnetotaktische Bakterien. Sie suchen allerdings nicht den Weg nach Norden, sondern zum Grund des Gewässers, in dem sie leben. Die Magnetfeldlinien außerhalb Äquaturnähe verlaufen nämlich nicht parallel zur Erdoberfläche, sondern neigen sich schräg nach unten. So führen sie die magnetotaktischen Bakterien zum Gewässergrund, wo Sedimente und Wasser sich vermischen. Dort finden die Tierchen die für ihre Ernährung idealen sauerstoffarmen Bedingungen. Die Schwerkraft können sie nicht zur vertikalen Orientierung nutzen, da sie ebenso schwer sind wie Wasser und ihr Gewicht daher nicht fühlen.

## EIN KOMPASS FÜHRT BAKTERIEN ZUM GEWÄSSERGRUND

Ihren Kompass verdanken sie den Magnetosomen. Diese Organellen bestehen jeweils aus einem weniger als 100 Nanometer großen Magnetit-Teilchen ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), das von einer Membran umhüllt wird, damit die Partikel nicht verklumpen. Rund 20 Magnetosome reihen sich entlang von Proteinfasern im





Bakterium zu Ketten auf. Sie wirken wie eine Kompassnadel und drehen sich in die Richtung des Erdmagnetfeldes, also ungefähr in Nord-Süd-Richtung. Da die Magnetosomen an den Proteinfasern im Bakterium fixiert sind, wird das ganze Tierchen mitgedreht. Wenn die Mikroben dann mit ihren Geißeln rudern, bewegen sie sich entlang der magnetischen Feldlinie wie auf einer Schiene zum Boden des Gewässers.

„Die Bakterien erzeugen perfekte magnetische Nanopartikel“, sagt Faivre. Zum einen stellen die magnetotaktischen Bakterien die Partikel in einer

gleichbleibenden Größe her, was Techniker aufhorchen lassen dürfte. Denn eine einheitliche Partikelgröße ist für sie ein wichtiges Qualitätsmerkmal bei der Nanopartikelproduktion. „Die Bakterien können darüber hinaus auch die Form der Teilchen kontrollieren“, sagt Faivre. Bestimmte Arten magnetotaktischer Mikroben stellen kugel-, andere Arten nadelförmige Nanoteilchen her. Erstaunlich dabei ist, dass jede Bakterienart ihre Partikel in einer einheitlichen Form herstellt. Kurzum: Bei der Synthese der Magnetit-Partikel verwirklichen die Bakterien eine perfekte interne Qualitätskontrolle.

Die Magnetit-Nanoteilchen besitzen für technische Anwendungen außerdem höchst interessante magnetische Eigenschaften. „Sie zeigen eine Remanenz und Koerzitivität, die von künstlich hergestellten Kristallen nicht übertroffen werden können“, sagt Faivre. Die beiden physikalischen Größen bedeuten, dass die Stoffe magnetisch hart sind, ihr permanenter Magnetismus also sehr stabil bleibt. Für viele technische Anwendungen ist das eine gewünschte Eigenschaft, etwa für magnetische Datenspeicher mit bislang ungekannter Speicherdichte.

### MAGNETIT-TEILCHEN ZUR SUCHE NACH TUMOREN

Andere Anwendungen verlangen einheitliche magnetische Eigenschaften. Genau die bieten die magnetischen Nanopartikel der Bakterien dank ihrer einheitlichen Form und Größe. Künstlich hergestellte längliche Magnetpartikel könnten etwa als Kontrastmittel in der Magnetresonanztomografie dienen. Gewebe, in denen sich solche Partikel befinden, würden auf dem Magnetresonanzbild dunkler erscheinen. Wenn es gelänge, die Magnetpartikel zu einem Tumor zu lenken, ließe sich dieser exakt und in einem frühen Stadium lokalisieren. Außerdem könnten die Partikel sicherstellen, dass Medikamente gezielt am Krankheitsherd wirken. Mit Magneten, die von außerhalb des Körpers angelegt werden, ließen sie sich dort festhalten. Der an die Partikel angelagerte Wirkstoff bliebe dann in dem Gewebe, in dem er gebraucht wird, statt durch den Blutstrom fortgespült zu werden.

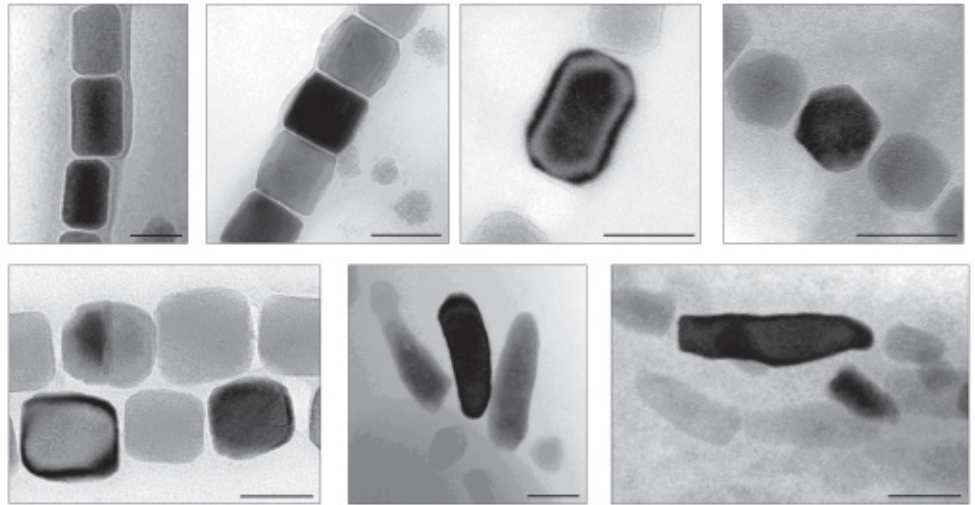
Zwar lassen sich Magnetit-Teilchen bereits künstlich herstellen, die synthetischen Partikel enthalten jedoch anders als die biologischen ein wenig Sauerstoff. Das haben die Forscher um

links	Genauer Blick auf einen Kompass: Damien Faivre führt eine Probe der magnetotaktischen Bakterien in ein Elektronenmikroskop ein und kontrolliert anschließend, ob sie richtig positioniert ist.
rechts	Kompassnadeln nach Maß: Verschiedene Arten magnetotaktischer Bakterien produzieren jeweils sehr präzise Magnetitpartikel von charakteristischer Form und Größe.

Damien Faivre herausgefunden, als sie die Kristallstruktur und chemische Zusammensetzung der magnetischen Nanopartikel mithilfe von Röntgenstrahlung aus der Berliner Synchrotronquelle *Bessy* untersucht haben.

Auch in anderen Punkten hapert es bei der synthetischen Produktion der magnetischen Nanopartikel noch: „Bislang sind die verfügbaren chemischen Prozesse nicht in der Lage, magnetische Nanopartikel einheitlicher Größe und Form unter umweltfreundlichen Bedingungen herzustellen“, sagt Faivre. Umweltfreundlich bedeutet in diesem Fall, dass sich die Teilchen bei Raumtemperatur, normalem Luftdruck und ohne schädliche Lösungsmittel produzieren lassen, statt unter den energieintensiven Bedingungen hohen Drucks und hoher Temperatur. Daher will der Chemiker nun verstehen, wie die Natur die gleichförmigen Magneteilchen hinkriegt. „Die Natur strukturiert Materie bis ins kleinste Detail, das heißt hinunter bis zur kleinsten Einheit, dem Molekül“, sagt Faivre. „Wir können von der Natur lernen, indem wir versuchen zu verstehen, wie natürliche Vorbilder komplexe physiko-chemische und biologische Phänomene beeinflussen“, so der Forscher. „Sobald die biologischen Prozesse vollständig verstanden sind, könnten sie kopiert werden, um neuartige Materialien zu entwickeln.“

Erste Erkenntnisse darüber, wie die Natur Magnetit-Nanopartikel herstellt, haben die Forscher bereits gewonnen. Die magnetotaktischen Bakterien kontrollieren das Wachstum der magnetischen Teilchen mit einem biologischen Prozess namens Biomineralisation, was so viel bedeutet wie biologisch gesteuertes Kristallwachstum. Etwa 20 bis 30 Proteine, sogenannte magnetosomale Proteine, sind für diese Kontrolle zuständig. Biologen wissen auch bereits,



in welchen Abschnitten des Bakterien-Genoms die Erbinformation steht, die als Anleitung zur Herstellung der magnetosomalen Proteine dient.

### REAGENZGLASTEST FÜR DIE WIRKUNG EINZELNER PROTEINE

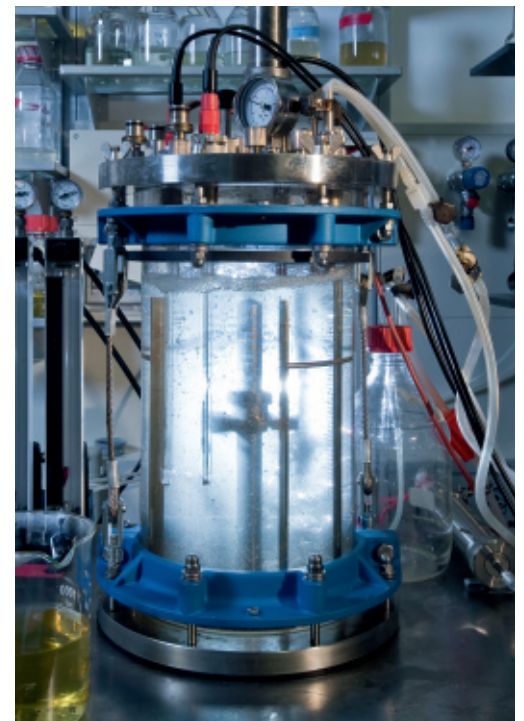
Damien Faivre und sein Team wollen nun herausfinden, welche Rolle einzelne Proteine oder deren Komponenten bei der Biomineralisation spielen. Prinzipiell gibt es zwei Methoden, die ihnen dabei helfen können. Die erste besteht darin, sogenannte Deletionsmutanten zu erzeugen. Das sind Bakterien, in denen ein Gen deaktiviert wird. Das Genom dieser Deletionsmutanten ist bis auf dieses inaktive Gen identisch mit dem des Wildtyps. Indem sie die Unterschiede zwischen Bakterien, die das deaktivierte Gen tragen, und unveränderten Mikroben untersuchen, können Forscher etwas über die Rolle des abgeschalteten Gens lernen. Sie prüfen, ob die Deletionsmutante Magnetosome herstellt, und wenn ja, ob sie sie in der gleichen Größe und Form synthetisiert

wie der Wildtyp. Zwar liefert diese Methode wertvolle Erkenntnisse. „Da magnetotaktische Bakterien aber sehr langsam wachsen, ist dieser In-vivo-Ansatz sehr langwierig“, sagt Faivre. Es dauere bis zu zwei Jahre, um ein einziges Protein zu untersuchen.

Sein Team nutzt daher die effizientere zweite Methode, um die Aufgaben der magnetosomalen Proteine zu klären. Dabei wird das Gen des zu untersuchenden Proteins in das Genom des schnell wachsenden Bakteriums *Escherichia coli* eingebaut. Die Zellmaschinerie von *E. coli*, welche angeleitet durch die Erbinformation Proteine herstellt, wird außerdem dazu angeregt, das eingepflanzte magnetosomale Protein in besonders großen Mengen herzustellen. Die Forscher brauchen nämlich größere Mengen des Proteins, um im Reagenzglas die gleiche Protein-Konzentration zu erreichen, wie sie in dem viel kleineren magnetotaktischen Bakterium vorliegt.

Anschließend isolieren die Forscher die hergestellten Proteine und untersuchen ihre Wirksamkeit im Reagenzglas. Dazu mischen sie das Protein zusam-





Janet Andert (links) füllt eine Kultur magnetotaktischer Bakterien in einen Fermenter (rechts in einer Detailaufnahme). Damit sich die Bakterien optimal vermehren, passt Antje Reinecke unterdessen die Bedingungen an.

men mit Eisenverbindungen, welche wie das Magnetit zwei- und dreiwertiges Eisen enthalten, in eine Lösung und verändern langsam den pH-Wert, bis die Bestandteile der Lösung ausfallen und Magnetitpartikel entstehen. Das Protein beeinflusst bei diesem Prozess die Größe oder Form der sich bildenden Partikel. „Auf diese Weise lässt sich ein Protein innerhalb von drei bis vier Monaten untersuchen“, sagt Faivre.

Von vornherein ist klar, dass nicht alle magnetosomalen Proteine gleich wichtig für die Herstellung der Magnetosome sind. Daher sammeln die Forscher schon vor der Untersuchung einzelner Proteine Informationen darüber, welche von ihnen wahrscheinlich entscheidend in die Biomineralisation eingreifen. Dieses Verfahren spart Zeit, da es unnötige Reagenzglas-Versuche erspart.

Für die Vorauswahl verwenden die Forscher zum einen Bioinformatik-Software. Diese erlaubt es ihnen, nach Gemeinsamkeiten zwischen Genen von verschiedenen magnetotaktischen Bakterien zu suchen. Ähnlichkeiten zwischen verschiedenen Bakterienarten weisen auf wichtige Gene und damit auf wichtige Proteine hin. Zum anderen nutzen die Forscher eine Methode namens Biokombinatorik. Dabei testen sie, welche Peptide – das sind gewissermaßen Bruchstücke von Proteinen – sich mit der Oberfläche von Magnetit-

Kristallen verbinden. Solche Peptide erlauben einen unmittelbaren Kontakt zwischen Proteinen und magnetischen Partikeln. Sie könnten somit Bestandteile wichtiger magnetosomaler Proteine sein, zumindest spricht der direkte Kontakt zwischen Protein und magnetischem Teilchen für eine wichtige Funktion eines Eiweißes. Die Peptide werden anschließend in DNA-Sequenzen, übersetzt. Nach diesen Sequenzen durchsucht ein Computerprogramm dann das Genom magnetotaktischer Bakterien, um die zugehörigen Proteine zu identifizieren.

### EIN PROTEIN, DAS DIE PARTIKELGRÖSSE STEUERT

Bislang haben japanische und US-amerikanische Forscher die Rolle eines magnetosomalen Proteins bei der Synthese von Magnetitpartikeln im Innern von Magnetosomen geklärt. Es trägt den wenig einprägsamen Namen Mms6 und taucht nur bei magnetotaktischen Bakterien auf. Mms6 sitzt in der Membran, welche die Magnetitpartikel einhüllt. Die Forscher haben herausgefunden, dass es die Größe der magnetischen Nanopartikel mitbestimmt. Es ist bisher das einzige Protein, das die Größe von Magnetitpartikeln entscheidend steuert. Dagegen

haben Forscher noch kein Protein identifiziert, das die Form der magnetischen Nanopartikel kontrolliert.

Bei der Untersuchung von Mms6 stießen die Forscher zudem auf ein bedeutsames Phänomen: Allein das aus 25 Aminosäuren bestehende Peptid an einem Ende des Proteins, also ein kleiner Teil von Mms6, wirkt sich auf die Größe der gebildeten Magnetitpartikel aus. Diese Tatsache sei von grundlegender Bedeutung, sagt Faivre. „Denn die künstliche Massenproduktion von Proteinen mithilfe von Wirtsorganismen ist limitiert, wohingegen sich synthetische Peptide praktisch in unbegrenzter Menge herstellen lassen.“

Unterdessen geht die Suche nach den Proteinen, die bei der Bildung der magnetischen Nanopartikel mitmischen, weiter. „Bislang konnten 20 Proteinkandidaten in der Magnetosommembran des magnetotaktischen Bakteriums *M. gryphiswaldense* identifiziert werden, von denen man annimmt, dass sie besondere Effekte auf die Größe und Form von Magnetitkristallen haben“, sagt Faivre.

Einige davon erforscht Faivres Team derzeit am Potsdamer Max-Planck-Institut. Außerdem untersuchen die Wissenschaftler, wie es die einzelnen Magnetosome schaffen, sich zu einer Kette aneinanderzulagern, sodass sich Teilchen für Teilchen jene winzige Kom-

passnadel aufbaut, welche den Bakterien den Weg zum Futter weist. Sie haben nachgewiesen, dass es sich beim Aufbau der Kette um ein komplexes Zusammenspiel von genetisch gesteuerten Prozessen und magnetischen Kräften handelt. Dazu verwendeten sie unter anderem eine „Ferromagnetische Resonanz“ genannte Methode, die der Kernspinresonanz ähnelt. Mit ihrer Hilfe lassen sich die magnetischen Eigenschaften von Festkörpern untersuchen. So kann die Methode etwa auf-

zeigen, ob die Magnetisierung eines Kristalls eine Vorzugsrichtung aufweist. Mit der Methode lassen sich sowohl die einzelnen Magnetit-Nanopartikel untersuchen als auch die Ketten, die sie miteinander bilden.

Durch ihre Forschung hoffen Faivre und seine Mitarbeiter, dass sie alle Proteine und eventuell andere biologische Komponenten, Lipide genannt, finden werden, welche die Biomineralisation der Magnetitpartikel steuern. Entscheidend ist, dass sie die verschiedenen Rol-

len verstehen, welche die Proteine bei der Synthese der Partikel spielen. „Dann wäre es möglich, quasi auf Bestellung magnetische Nanopartikel mit 20, 50 oder 100 Nanometer Durchmesser und bestimmter Form, etwa rund oder nadelförmig, herzustellen“, sagt der Chemiker. Dazu würde man dann nur die dafür nötigen Proteine wie aus einem Baukasten entnehmen müssen. Bislang ist das nur ein Traum, aber die ersten Schritte dahin haben die Potsdamer Forscher gemacht. ◀

## GLOSSAR

### Magnetosom

Von einer Membran umhülltes Magnetit-Teilchen. Die Partikel sind weniger als 100 Nanometer groß; verschiedene magnetotaktische Bakterien stellen sie in unterschiedlichen, aber jeweils charakteristischen Größen und Formen her.

### Magnetotaxis

Fähigkeit mancher Lebewesen, sich am Magnetfeld der Erde zu orientieren.

### Magnetresonanztomografie

Das Verfahren (auch Kernspintomografie genannt) beruht darauf, dass manche Atome wie etwa Wasserstoff ein magnetisches Moment besitzen. Ihr Verhalten in einem magnetischen Feld hängt von dem Gewebe ab, in dem sie sitzen. So lassen sich unterschiedliche Gewebearten identifizieren. Geeignete magnetische Substanzen verstärken die Kontraste zwischen ihnen.

### Biomineralisation

Organismen stellen anorganische Minerale und Verbundwerkstoffe aus anorganischen und organischen Substanzen in sehr präziser Weise her, indem sie deren Entstehung biochemisch kontrollieren. Prominente Beispiele sind neben den Kristallen der Magnetosomen Perlmutter oder das Siliziumdioxid-Skelett von Kieselalgen.

## Mai Tai® SP

Der neue Mai Tai® SP Laser ist ein höchst stabiler und voll automatisierter Kompakt-Ultrakurzpuls-Laser, ideal zum Seeden von Ultrakurzpulsverstärkern. Die Bandbreite lässt sich computergesteuert im Bereich von >60 nm bis <10 nm einstellen und ermöglicht somit transformbegrenzte Pulse von <25 fs bis 100 fs. Die aktive Stabilok® Technik und die passiven EternAlign™ Permanentoptikhalter gewährleisten immer die höchste Strahlrichtungs- und Leistungsstabilität, so dass der Laser keine Justage benötigt. Flexibilität und Stabilität des Mai Tai SP sind einzigartig und bisher unerreicht.

**Newport Spectra-Physics GmbH**  
 Guerickeweg 7 – 64291 Darmstadt  
 Telefon: +49 (0) 61 51 / 708 – 0 • Telefax: +49 (0) 61 51 / 708 – 217 oder – 950  
 E-Mail: germany@newport.com

© 2010 Newport Corporation.

Markenfamilie – Corion® • New Focus™ • Oriel® Instruments • Richardson Gratings™ • Spectra-Physics®

AD-051012-GR



# Gene gegen das Verdursten

In vielen Regionen der Erde bedroht Wassermangel die Landwirtschaft. Neue Pflanzensorten müssen deshalb besonders widerstandsfähig gegenüber Trockenheit sein. Für Wissenschaftler am **Max-Planck-Institut für Pflanzenzüchtungsforschung** in Köln ist die Gerste ein ideales Modell für die genetischen Strategien zur Anpassung an Trockenstress.

TEXT **MARIA VON KORFF, MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PFLANZENZÜCHTUNGSFORSCHUNG**

**P**flanzen verfolgen unterschiedliche Strategien, um trotz Trockenheit überleben und wachsen zu können. So vermeiden sie etwa Schädigungen durch Wassermangel, indem sie mehr Wurzeln bilden, die Wasseraufnahme verbessern oder die Verdunstung über die Blätter verringern. Auch eine Speicherung und Remobilisierung von Reservekohlenhydraten sowie eine Anpassung des Entwicklungszyklus hilft in trockener Umgebung zu bestehen.

Außerdem können Pflanzen unempfindlicher gegenüber Trockenheit werden. Eine solche Trockenstresstoleranz wird von vielen Genen beeinflusst, die alle den Ertrag pro Niederschlagsmenge erhöhen. So können

Pflanzen ihre Zellen durch spezielle Proteine vor Wassermangel schützen. Diese Enzyme sorgen dafür, dass Zellproteine und -membranen ihre normale Struktur beibehalten und weiterfunktionieren. Außerdem reichert die Zelle osmotisch wirksame Stoffe wie Prolin, Sorbitol oder Glycinbetain in ihrem Speicherorganell, der Vakuole, an. Diese Stoffe sorgen dafür, dass der Wasserverlust der Zelle so gering wie möglich gehalten wird.

Versagen all diese Strategien, sinkt der osmotische Innendruck der Zelle, während die Konzentration intrazellulär gelöster Stoffe steigt. Der daraus resultierende osmotische Stress schädigt die Zellmembranen und großen Moleküle in den Pflanzenzellen. Wenn

akuter Wassermangel die Fotosynthese verhindert und die Chloroplasten weiterhin starker Sonneneinstrahlung ausgesetzt sind, entstehen außerdem Sauerstoffradikale wie Super- und Peroxide. Diese greifen Enzyme und Zellmembranen in den Zellen direkt an und zerstören sie.

## **ALTERNATIVE ZU GENTECHNISCH VERÄNDERTEN PFLANZEN**

Am Max-Planck-Institut für Züchtungsforschung in Köln untersuchen wir unter anderem, wie sich die Gerste an Trockenheit angepasst hat. Dabei verfolgen wir einen alternativen Ansatz zur Entwicklung transgener Pflanzen, indem wir die natürliche genetische



Diversität der Kulturarten und der nahen Verwandten unserer Kulturarten (Wildformen) nutzen. Da sich die Gerste und andere Getreidepflanzen einander genetisch sehr ähneln, lassen sich diese Erkenntnisse auch auf andere Kulturpflanzen wie den Weizen übertragen.

Die Gerste gehört zusammen mit Einkorn, Emmer, Lein und Linse zum ältesten Kulturgetreide, seit der Mensch vor rund 10000 Jahren begann, Pflanzen gezielt zur Nahrungsmittelgewinnung anzubauen und zu züchten. Die heutige Kulturgerste ist aus der zweizeiligen Wildform *Hordeum vulgare L. ssp. spontaneum* hervorgegangen. Die gesamte Gattung umfasst 30 verschiedene Wildarten. Heute

ist die Kulturgerste nach Mais, Reis und Weizen die viertwichtigste Getreideart der Erde.

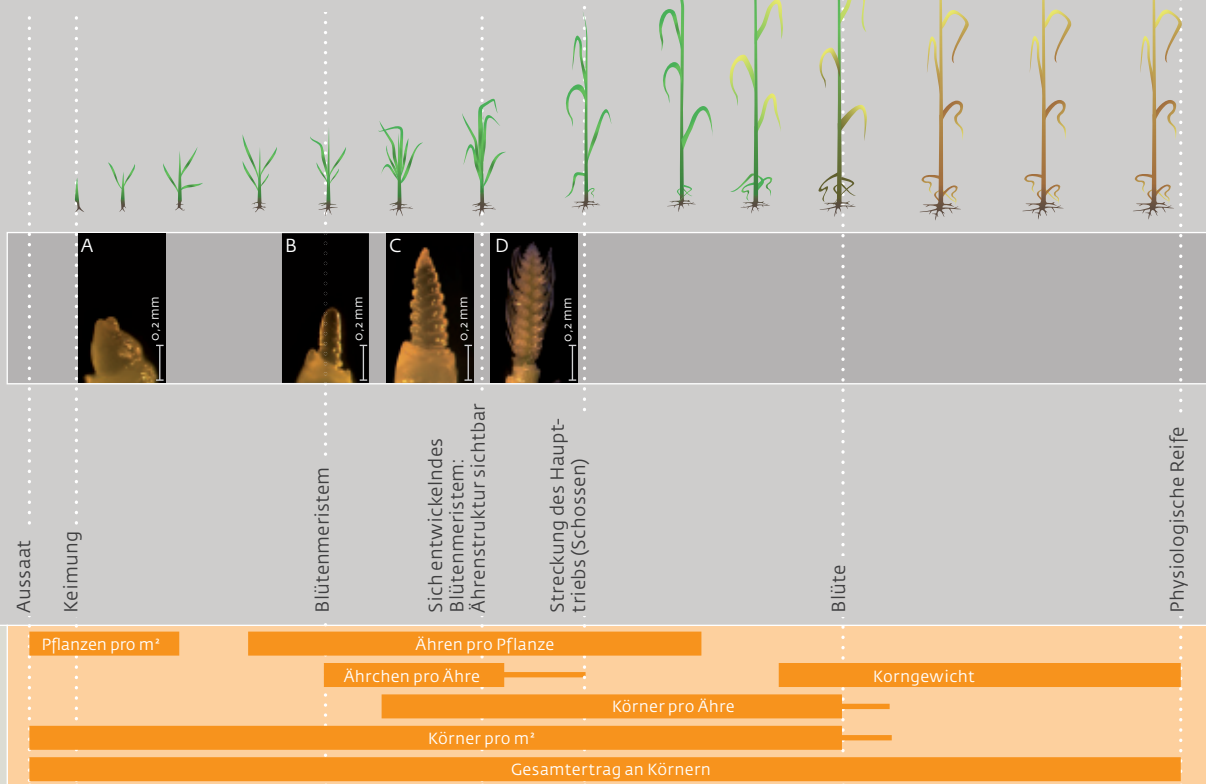
Die Gerste ist das Getreide mit der weitesten geografischen Verbreitung: Sie wächst in Trockengebieten Vorderasiens, in Tibet in Höhen von mehr als 4000 Metern, in den Subtropen und an der Polargrenze des Getreideanbaus. Die meisten Varianten gibt es jedoch an ihrem natürlichen Ursprungsort und in den Gebieten, in denen sie als Erstes vom Menschen kultiviert wurde: dem sogenannten Fruchtbaren Halbmond im Nahen Osten sowie in Nord- und Ostafrika. Gerste verfügt somit über ein hohes genetisches Anpassungspotenzial, das wir für die Züchtung von widerstandsfähigen Sorten nutzen.

Gerstensorten, die an sehr trockenen Standorten wachsen, haben besondere Schutzmechanismen entwickelt. Wildgersten aus dem Fruchtbaren Halbmond lagern etwa verstärkt Anthocyane in die Stängel, Blätter oder Ähren ein. Diese Farbstoffe verleihen der Pflanze eine Rotfärbung und schützen sie wie eine Art Sonnencreme vor zu hoher Sonneneinstrahlung. Zudem reflektiert eine starke Behaarung an Stängeln und Blättern das Sonnenlicht. Außerdem wird Wasser, das aus den Blättern verdunstet, durch die Haarschicht länger über den Blättern gehalten und verringert auf diese Weise den Wasserverlust der Pflanze.

Darüber hinaus kann die Gerste ihren Entwicklungszyklus an Wasserangebot und Temperatur anpassen. So bildet



Die Blütenbildung der Gerste verläuft in verschiedenen Phasen. Zunächst bildet sich aus vegetativem Wachstumsgewebe (Meristem, A) das Blütenbildungsgewebe (Blütenmeristem, B). Aus diesem entsteht die Ähre mit den noch nicht entwickelten Blütenanlagen (C), die sich während des Halmwachstums zu fertigen Blütchen ausbilden (D). Die Dauer dieser Phasen schwankt unabhängig voneinander und hängt sowohl von der Umwelt als auch den Genen der Pflanze ab. Jede Entwicklungsphase beeinflusst den Ertrag auf unterschiedliche Weise: In der frühen Entwicklungsphase bis zur Ausbildung der fertigen Ähre wird die Anzahl der Ähren pro Pflanze festgelegt. Die Anzahl der Körner pro Ähre wird vor allem während der späteren Halmverlängerung bestimmt.



Gerste besonders in südlichen, trockenen Regionen im Frühling frühzeitig blühen; dies sorgt dafür, dass sie ihre Entwicklung vor dem Einsetzen der Sommerhitze abgeschlossen hat. In den gemäßigten Breiten entwickelt sich Gerste dagegen langsamer. Sie kann so die lange Wachstumsperiode ausnutzen. In Deutschland wächst Gerste einjährig als Sommergerste oder, wie im Mittelmeerraum, über das Jahr hinweg als Wintergerste.

Man kennt heute vier Hauptgene der Gerste, die bei geeigneter Tageslänge und Temperatur zur Blütenbildung führen: Das *photoperiod response Gen Ppd-H1* in der Wintergerste löst die Blütenbildung aus, sobald die Tage im Frühling wieder länger werden. Gleichzeitig wirkt das Vernalisationsgen *Vrn-H2* als Gegenspieler zu *Ppd-H1*; es erlaubt nämlich nur dann die Blütenbildung, wenn die Pflanze niedrigen Temperaturen ausgesetzt war. Nach einem ausreichenden Kältereiz reguliert

das Vernalisationsgen *Vrn-H1* die Bildung der Ähre, während das Vernalisationsgen *Vrn-H3* ähnlich wie *Ppd-H1* vermutlich alle Phasen der Vorblütenentwicklung beschleunigt.

### MUTATIONEN LASSEN GERSTE LANGSAMER WACHSEN

Im Gegensatz zur Wintergerste ist das *Ppd-H1*-Gen bei der Sommergerste mutiert und deshalb inaktiv. Außerdem fehlt ihr das *Vrn-H2*-Gen. Die Sommergerste entwickelt sich daher trotz langer Tageslichtdauer langsamer, und die Blüten werden später gebildet. So kann sie die lange Wachstumsperiode in gemäßigten Klimaten ausnutzen.

Wir suchen Gene, die nur einzelne Phasen der Blütenentwicklung beeinflussen. Dadurch lässt sich die Blütenbildung in verschiedenen Umwelten fein regulieren und letztlich der Ertrag steigern. Trockenheit verkürzt vor allem die Blütenbildung, Halm und Ähre wieder-

um wachsen besonders schnell, wenn die Tage lang sind. Die umfangreiche Sammlung von Wildgersten aus dem Fruchtbaren Halbmond an unserem Institut stellt dabei eine wertvolle Quelle für neue genetische Varianten dar, denn die systematische Züchtung ertragreicher Sorten seit Beginn des vergangenen Jahrhunderts hat die genetische Variation in unseren Elitesorten immer stärker eingengt. Evolutionsgeschichtlich gesehen ist diese Zeitspanne jedoch gering, und die natürlichen Vorfahren unserer heutigen Kulturarten lassen sich meist noch mit diesen kreuzen.

Wir haben etwa 900 Sorten von Wildgersten untersucht und diejenigen mit deutschen Gerstensorten gekreuzt, die in der Vorblütenentwicklung variieren. Daraus entstehen Sorten, die unterschiedlich hohe Erträge abwerfen. Die dafür ursächlichen Merkmale und Genformen geben sie an ihre Nachkommen weiter. Mithilfe molekularer Marker identifizieren wir etwa jene Re-



Positive Eigenschaften der Wildgerste wie etwa Stressresistenz testen Wissenschaftler in Kreuzungen zwischen Wild- und Kulturgerste auf dem Feld. So bilden Pflanzen mit langsamem Halm- und Ährenwachstum besonders viele fruchtbare Blüten und Körner und werfen somit höheren Ertrag ab.

gionen im Gerstengenom, welche die Ährenentwicklung verlängern. Da das Gerstengenom bisher nicht entschlüsselt wurde, vergleichen wir das Erbgut mit dem bereits sequenzierten Reisgenom. So können wir Blütingene der Gerste ausfindig machen, denn Reis und Gerste haben ähnliche Gene, die zudem auch noch ähnlich auf den Chromosomen angeordnet sind.

## VON DER LABOR- ZUR FELDFORSCHUNG

Außerdem nutzen wir Erkenntnisse aus der Pflanzengenomforschung an der Ackerschmalwand *Arabidopsis thaliana*, denn der Stoffwechselweg, der die Blütenbildung auslöst, ist in der Ackerschmalwand bereits intensiv untersucht worden. Da viele der beteiligten Gene und Funktionen auch in der Gerste aktiv sind, lassen sich daraus Rückschlüsse auf die Regulation der Vorblüteentwicklung in der Gerste ziehen.

Diese Studien finden zunächst unter kontrollierten Bedingungen im Gewächshaus statt, wo wir den Effekt einzelner Umweltparameter – Tageslichtlänge, Temperatur und Wasser – auf die einzelnen Gene und Merkmale testen. Die Auswirkungen der verschiedenen Genformen aus der Wild- und Kulturgerste müssen wir jedoch für eine Anwendung in der Getreidezüchtung zunächst im Freiland beobachten. Dazu kooperieren wir mit dem Center for Agricultural Research in the Dry Areas (ICARDA) in Syrien; das ICARDA besitzt das globale Mandat für Forschung an Gerste und Agrarproduktion in halbtrockenen Gebieten.

An diesem internationalen Agrarforschungszentrum untersuchen wir die Anpassungsstrategien der Gerste an Trockenheit unter natürlichen Bedingungen im Feld. In detaillierten genetischen Studien wollen wir dann an unserem Institut die Gene und Genregionen identifizieren, die den Ernteertrag von Gersten bei Trockenheit stei-

gern. Solche Erkenntnisse nutzen nicht nur den Ackerbauern im Nahen Osten. Sie liefern auch wertvolle Informationen für die Züchtung von Kulturpflanzen in anderen Gebieten der Erde, in denen diese an immer trockenere Sommer angepasst werden müssen.

Schon heute erleben wir im Zusammenhang mit dem Klimawandel eine Häufung extremer Witterungsbedingungen. So prognostizieren globale Klimamodelle eine Erderwärmung bis zum Ende des 21. Jahrhunderts um 2 bis 5 Grad Celsius und eine Zunahme von Hitzewellen, Dürrezeiten, Hochwasser und Starkniederschlägen. Besonders stark trifft es die Entwicklungsländer in Afrika südlich der Sahara und in Asien, wo die Ernteerträge nach Berechnungen des Weltklimarats bis 2020 um die Hälfte sinken könnten.

Mittel- und Nordeuropa gehören zwar zu den potenziellen Gewinnern des Klimawandels, denn stärkere Winterniederschläge und höhere Durch-





- 1 | Farbstoffe im Stängel blocken einen Teil der Sonnenstrahlung und bewahren die Pflanze vor Schäden durch zu viel Licht.
- 2 | Gerste schützt sich vor Trockenheit: Ein dichter Haarteppich wirkt als Sonnenschutz und verringert die Verdunstung von Wasser.
- 3 | Gerste ist ein Selbstbefruchter und blüht, wenn sich die Ähren noch in der Blattscheide befinden. Erst nach erfolgreicher Befruchtung wächst die Ähre vollkommen aus der Blattscheide, die Blüten öffnen sich und zeigen die Staubblätter.

schnittstemperaturen könnten die Agrarproduktion erhöhen. Dazu müssen jedoch die heutigen Agrarpflanzen an die veränderten Klimabedingungen angepasst werden. Diese Aufgabe gestaltet sich immer schwieriger, denn über die Erntemenge und -qualität entscheiden nicht der saisonale Mittelwert, sondern in erster Linie die klimatischen Extremwerte. So leiden besonders die kontinentalen und südlichen Regionen Europas schon jetzt unter längeren Trockenperioden in den Sommermonaten. Aber auch in Deutschland stagnieren seit zehn Jahren die Getreidernten, mit Ausnahme der Wintergerste. Deshalb forschen auch Wissenschaftler in Europa an der Entwicklung von Pflanzensorten, die möglichst hohe Erträge bei gleichzeitig niedrigem Wasserbedarf abwerfen.

Dazu kommt, dass in vielen Gebieten der Erde die Wasservorräte knapp werden. Das Wasserangebot ist damit der weltweit wichtigste landwirtschaftliche Produktionsfaktor. Eine Erhöhung der Nahrungsmittelproduktion hängt in Zukunft also vor allem davon ab, ob sich die landwirtschaftlichen Flächen ausreichend mit Wasser versorgen lassen. So hat es im Jahr 2008 in vielen landwirtschaftlichen Gebieten des Fruchtbaren Halbmonds nicht mehr als 150 Millimeter Niederschlag gegeben.

Unter solchen Bedingungen produzieren trockenresistente Gerstensorten noch etwa 500 Kilogramm pro Hektar Ertrag. Was für einen deutschen Landwirt mit rund 60 bis 100 Tonnen pro Hektar Ertrag fast einen totalen Ernteausfall bedeutet, erhält den selbstversor-

genden Bauern in vielen Regionen des Nahen Ostens dagegen ihre Lebensgrundlage: Sie sind dann nicht gezwungen, ihr Vieh zu verkaufen und Arbeit in der Stadt zu suchen. Das wichtigste Ziel der Züchtungsforschung in Köln und Syrien ist deshalb, die genetische Basis stabiler Erträge auch unter extremen Anbaubedingungen zu entschlüsseln.

Vor diesem Hintergrund werden stabile oder gar steigende landwirtschaftliche Erträge zukünftig vor allem davon abhängen, ob es gelingt, neue Kultursorten zu entwickeln. Es werden insbesondere Getreidearten immer wichtiger, die heute schon ein integraler Bestandteil extensiver Bodenbearbeitungssysteme sind und aufgrund ihres geringen Wasserverbrauchs in Trockenlagen gedeihen – und das ist neben Hybridroggen vor allem die Winter- und Sommergerste. ◀

## GLOSSAR

### Sommer-/Wintergerste

Wintergerste benötigt eine Kälteperiode zur Bildung von Blütenständen. Sie wird in Mitteleuropa Ende September ausgesät und im Juli geerntet. Wintergerste bringt 20 Prozent höhere Erträge, da sie die Feuchtigkeit im Winter optimal nutzt. Ihr Anteil an der Gersteproduktion nimmt deshalb seit Jahren zu. Sommergerste dagegen wird im März oder April gesät und im August geerntet. Wintergerste wird vor allem als Futtermittel, Sommergerste als Brauergerste verwendet.

### Vernalisationsgen

(lateinisch *vernus* – Frühling)  
Ein Gen, das Wachstum erst dann erlaubt, wenn die Pflanze Temperaturen unter 10 Grad Celsius ausgesetzt war. Zwischen der Kälteperiode und dem Wachstum oder der Blütenbildung können bei manchen Pflanzenarten Monate liegen. Die meisten Getreidearten benötigen eine Kälteperiode, bevor sie blühen.

### Fruchtbarer Halbmond

Eine der Ursprungsregionen, in denen der Mensch sesshaft wurde und von der nomadischen Lebensweise zu Ackerbau und Viehzucht überging. Sie umfasst Gebiete des heutigen Libanon, Syriens, Iraks, Irans und den Südosten der Türkei. Einige der weltweit bedeutendsten Kulturpflanzen wie Weizen, Gerste, Linsen und Erbsen sowie vier der fünf wichtigsten Haustierarten wurden hier domestiziert. Die nahe verwandten Wildformen der Kulturarten haben heute noch ihr natürliches Verbreitungsgebiet im Fruchtbaren Halbmond.



Für Forscher, Entdecker, Wissenschaftler  
– und solche, die es werden wollen:

# Junge Wissenschaft



Das einzige europäische Wissenschaftsmagazin mit begutachteten Beiträgen junger Nachwuchsforscher.

Wissenschaftliche Erstveröffentlichungen und das Neueste aus Mathematik, Informatik, Naturwissenschaft und Technik.

Nur im Abo. Viermal im Jahr News aus Forschung und Technik, Veranstaltungen, Porträts, Studien- und Berufsprofile.

## Vorteilsabo sichern!

[abo@verlag-jungewissenschaft.de](mailto:abo@verlag-jungewissenschaft.de)

Stichwort: „Vorteilsabo“

## Leseprobe anfordern!

[leseprobe@verlag-jungewissenschaft.de](mailto:leseprobe@verlag-jungewissenschaft.de)  
oder per Fax 0211/385489-29

[www.verlag-jungewissenschaft.de](http://www.verlag-jungewissenschaft.de)

**Vorteilsabo**  
nur **20,-€\***

für Schüler, Studenten, Referendare und Lehrer  
(4 Ausgaben für 20,00 EUR statt 30,00 EUR)\*  
\*zzgl. Versandkosten



# Die Vernetzung der Vielfalt

Grundlagenforschung findet für **Steven Vertovec**, Direktor am **Max-Planck-Institut zur Erforschung multireligiöser und multiethnischer Gesellschaften** in Göttingen, nicht unbedingt nur im Elfenbeinturm statt. Mit Fakten und Vorschlägen beteiligte sich seine Abteilung für gesellschaftliche Vielfalt am neuen Entwurf für ein Integrations- und Diversitätskonzept der Stadt Frankfurt am Main.

TEXT **BIRGIT FENZEL**

**F**riede, Freude, Falafel“ – das fiel vor einiger Zeit dem Journalisten einer kleinen Berliner Tageszeitung in einer Glosse zum Thema Integration ein. Wenn Liebe tatsächlich durch den Magen gehen würde, sollte angesichts der in den Innenstädten allgegenwärtigen Dönerbuden, Pizzaschnellimbisse und Running-Sushi-Lokale das Thema längst vom Tisch sein. Dass offenbar nach wie vor Handlungsbedarf besteht, zeigt sich jedoch darin, dass selbst ausgewiesene Experten kommunaler Integrationspolitik wie die Stadt Frankfurt nach neuen Wegen für ein konstruktives Zusammenleben von Menschen unterschiedlicher Kulturen suchen.

Die Mainmetropole hat darin einige Erfahrung. Schließlich war der Magistrat der Stadt Ende der 1980er-Jahre auf die Idee gekommen, ein Amt für multikulturelle Angelegenheiten (AmkA) einzurichten. Dessen Aufgabe war und ist es, die Gestaltung des friedlichen Zusammenlebens von Menschen deutscher und ausländischer Nationalität, unterschiedlicher Herkunft und Religi-

onszugehörigkeit intensiver zu fördern. Die Aktion entsprach so gar nicht dem damals herrschenden Zeitgeist, der Einwanderung als gesellschaftliche Realität allgemein lieber ignorierte oder unter Integration schlicht verstand, dass die Minderheit der neuen Mitbürger sich der Mehrheit – also der deutschen Leitkultur – anzupassen hätte.

## NEUES KONZEPT VERLANGT EINEN RADIKALEN KURSWECHSEL

Zum 20. Geburtstag machten sich die Frankfurter „Multikulti“-Pioniere von Amts wegen ein besonderes Geschenk: einen Entwurf für ein Integrations- und Diversitätskonzept, in dem auf 236 Seiten Gastautorinnen und -autoren ihre Sicht auf die gesellschaftlichen Realitäten in der Stadt darlegen. Für den wissenschaftlichen Teil waren die Kulturanthropologin Regina Römhild, inzwischen Professorin an der Berliner Humboldt-Universität, und Max-Planck-Direktor Steven Vertovec zuständig. Gedacht als Gesprächsleitfaden für eine offene Diskussion mit den

Foto: Parade der Kulturen – F. Bischof









» Aufgrund ihrer Tradition als Handelsstadt und ihrer miteinander verwobenen Infrastrukturen im Transport-, Finanz- und Geschäftswesen kann man die Mainmetropole als Europas wichtigsten urbanen Kreuzungspunkt bezeichnen.



Frankfurt ist eine Global City. In ihr leben Menschen aus 176 Nationen, und hinsichtlich der Herkunftsländer der Einwohner ist die Mainmetropole ähnlich divers wie etwa London.

Bürgerinnen und Bürgern der Stadt, birgt das Werk einige Überraschungen. Denn abgesehen davon, dass es das AmKA zumindest nominell obsolet erscheinen lässt, legt es einen radikalen Kurswechsel nahe.

„Es ist ein Abschied vom Multikulti“, sagt Steven Vertovec. Denn die gängigen Vorstellungen vom Multikulturalismus als Nebeneinander von Menschen aus unterschiedlichen Kulturen passen nach seinen Beobachtungen so gar nicht mehr zu den gesellschaftlichen Bedingungen, wie er sie nicht nur in Frankfurt vorfand. Schon seit mehr als zwei Jahrzehnten erforscht der Sozialanthropologe die Phänomene der internationalen Migration, des Kosmopolitismus und Multikulturalismus in den Metropolen der Welt.

Im Jahr 2007 war Vertovec Gründungsdirektor des Max-Planck-Instituts zur Erforschung multireligiöser und

multiethnischer Gesellschaften und baute dort die Abteilung für gesellschaftliche Vielfalt auf. Heute arbeiten in dem schlichten Neubau am Rande der Göttinger Innenstadt junge Wissenschaftler verschiedener Fachrichtung daran, nach neuesten Ansätzen und Methoden der Soziologie, Sozialpsychologie oder Anthropologie Daten und Fakten über die urbane Bevölkerung zusammenzutragen; das Material soll ihnen Aufschluss über die wechselnden Formen, Dynamiken und Folgen gesellschaftlichen Miteinanders geben.

So gesehen passte die Anfrage aus dem Frankfurter AmKA, ob er nicht gemeinsam mit der Kulturanthropologin Römhild wissenschaftliche Grundlagen in den Entwurf einbringen könnte, dem 52-Jährigen sehr gut ins Konzept. „Frankfurt interessiert mich auch, weil es eine Global City ist“, nennt er einen weiteren Grund für sein Interesse, eine

Generalinventur der Frankfurter Einwanderungsgesellschaft vorzunehmen. Aufgrund ihrer Tradition als Handelsstadt und ihrer miteinander verwobenen Infrastrukturen im Transport-, Finanz- und Geschäftswesen könne man die Mainmetropole als Europas wichtigsten urbanen Kreuzungspunkt bezeichnen. Trotz ihrer mit 670000 Menschen vergleichsweise geringen Einwohnerzahl sei Frankfurt eine „Stadt der Superlative“, die als einzige deutsche Stadt neben Weltstädten wie New York, Tokio und London stehe.

Diese Global Cities verbindet aus Sicht des Sozialanthropologen nicht nur ihre Rolle als Synapsen der globalen Wirtschaft, die sie als Sitz von Zentralen transnationaler Unternehmen und Institutionen, Finanzzentren und Drehscheiben internationalen Verkehrs innehaben. Auch in ihrer gesellschaftlichen Struktur entdeckte der Forscher mit dem Faible für Vielfalt spannende Parallelen.

## FRANKFURT IST DEUTSCHLANDS INTERNATIONALSTE STADT

Wie alle Weltstädte weist auch die Mainmetropole eine stark international geprägte Bevölkerung auf: 40 Prozent der Frankfurter Bürgerinnen und Bürger haben entweder eigene Migrationserfahrung oder familiären Einwanderungshintergrund. Damit sei Frankfurt die internationalste Stadt in Deutschland, sagt der Max-Planck-Forscher. Dabei ist sie hinsichtlich der Herkunftsländer ihrer Zuwanderer genauso bunt gemischt, wie er es von anderen Global Cities aus früheren Forschungsarbeiten kennt.

Steven Vertovec zieht aus einem Stapel auf seinem Schreibtisch eine Grafik, die auf der Basis von Daten aus der Einwohnerstatistik von Frankfurt erstellt wurde: ein Kreis mit vielen farbigen Segmenten, die die prozentuale Verteilung der Frankfurter nach ihrer Herkunft in Tortenstücke aufteilen. Ein ähnliches Bild hat Vertovec bereits aus

seiner Londoner Studie in der Schublade – ein sehr ähnliches, denn in beiden Städten leben fast gleich viele verschiedene Nationen zusammen: 179 in London, 176 in Frankfurt.

„Was wir hier herausgefunden haben, widerspricht der gängigen Wahrnehmung, nach der die größeren Gruppen immer noch aus der Türkei und aus dem Süden oder Osten Europas kommen“, erklärt der Wissenschaftler. So zeigt seine Grafik zwar einerseits, dass die klassischen Herkunftsländer der Gastarbeiter der ersten Generation – insbesondere Türkei und Italien – immer noch die größten Abschnitte in der Grafik bilden. „Doch andererseits nehmen ihre Anteile gegenüber einer hohen Zahl neuer Einwanderer von kleinen bis kleinsten Gruppen aus aller Welt ab“, beschreibt er den Trend in der Statistik, der so gar nicht dem Bild entspricht, dass frühere Untersuchungen entworfen haben, etwa die *Frankfurter Integrationsstudie* aus dem Jahr 2008.

Diese noch gar nicht so alte Arbeit habe lediglich zwischen „Ausländern“ verschiedener Nationalität und „Deutschen“ unterschieden, wobei immerhin schon eine weitere Differenzierung zwischen Deutschen mit und ohne Migrationshintergrund vorgenommen werde. Doch wie Vertovec und Römhild herausgefunden haben, treffen solche statistischen Scherenschnitte nicht die Realität.

Vielmehr fanden sie in Frankfurt eine dynamische Vielfalt gesellschaftlicher Realitäten vor, die Steven Vertovec schon in London als Grundzug „einer neuen Migration“ identifiziert hatte. Wie in Frankfurt bilden auch dort die Einwanderer aus den traditionellen Ursprungsländern – in diesem Fall aus den ehemaligen Kolonien oder

Sprachliche Vielfalt: Auch die Medien haben sich auf die große Zahl ausländischer Bürgerinnen und Bürger in Frankfurt eingestellt. Hier ein Zeitungsständer im Gallusviertel.







den Ländern des Commonwealth – längst nicht mehr die größte Gruppe der Zuwanderer. Vielmehr werde der Anteil von Neubürgern aus dem Mittleren Osten oder aus der Europäischen Union immer größer.

Als er 2007 seine London-Studie veröffentlichte, hatte Vertovec für diesen neuen Pluralismus in der Einwanderungsgesellschaft den Begriff der „Supervielfalt“ eingeführt, den es bis dato noch nicht im Soziologielexikon gab. Wobei sich seine Vorstellung vom Sinn dieser Wortschöpfung nicht allein auf die Beobachtung beschränkt, dass ein großer Teil der Gesellschaft über Migrationserfahrungen aus erster oder zweiter Hand verfügt. Supervielfalt sei Diversität auf allen sozialen Ebenen – vor allem aber auch innerhalb der einzelnen Gruppen, erläutert er die weitgefasste Bedeutung seiner Worterfindung.

Als Beispiele für diese umfassende Heterogenität nennt er unterschiedliche ethnische Zugehörigkeiten, Sprachen, religiöse Traditionen, regionale und lokale Identitäten, kulturelle Werte und

Praktiken. Hinzu kämen in jeder dieser Einwanderergruppen eine Vielzahl unterschiedlicher sozialer Lagen und Aufenthaltstitel, die mit den Gründen zusammenhängen, aus denen die Menschen in die Stadt gekommen seien. Als europäisches Finanz- und Dienstleistungszentrum sei der ökonomische Erfolg der Metropole eng mit Mobilität und Einwanderung verknüpft, wobei die Stadt nicht nur Arbeitsplätze für hochqualifizierte Migrantinnen und Migranten in ausländischen und multinationalen Unternehmen biete, sondern auch in damit verknüpften Branchen und Dienstleistungen.

#### **FOKUS AUF DIE HERKUNFT VERDECKT SOZIALE UNTERSCHIEDE**

Dadurch finde man eine Vielfalt von Migrationspfaden, die auch Menschen gleichen geografischen Ursprungs unterscheiden. Es sei schließlich etwas anderes, ob jemand Asyl beantrage oder zum Studium nach Frankfurt komme, gibt der Forscher zu bedenken. So konnte er in der Mainmetropole alle

möglichen Migrationspfade feststellen: angefangen bei einer steigenden Anzahl von Saison- und Pflegekräften, über ausländische Fach- und Führungskräfte, Bildungsmigranten mit Stipendien und Studentenvisa, bis hin zu Flüchtlingen und Asylbewerbern oder Menschen, die aus Gründen der Familienzusammenführung hierher gekommen sind.

So verschieden wie die Motive fallen auch die Bedürfnisse der Zuwanderer aus. „Das gilt auch für die Art des Kontakts mit anderen und mit öffentlichen Einrichtungen“, sagt Vertovec. Daher finde man manchmal bei Menschen verschiedener Herkunft, aber mit gleichem Migrationskanal, mehr Gemeinsamkeiten als zwischen Menschen gleicher Nationalität, die jedoch ganz andere Absichten an die Stadt am Main führten. Der alleinige Fokus auf nationale Herkunftsgruppen verdeckt jedoch diese sozialen Unterschiede innerhalb der Gruppen, so der Forscher. „Daraus abgeleitete Aussagen etwa über ‚die Türken‘ sagen genauso wenig über die sich dahinter verbergenden sozialen Schich-

Bunt gemischt sind die Nationen in Global Cities. Folkloristische Umzüge durch die Straßen gehören in solchen Städten mit ihrer „Supervielfalt“ zum üblichen Erscheinungsbild.



ten, Lebensstile oder religiösen Haltungen aus wie vergleichbare Aussagen über ‚die Deutschen‘.“

Als ein weiteres Schlüsselmerkmal der Frankfurter Supervielfalt identifizierten Vertovec und seine Kollegin Römhild extreme Unterschiede im Rechtsstatus der Zuwanderer und teilweise sehr große Gegensätze der sozialen Lagen. Eine wesentliche Ursache dafür seien die Neuerungen im nationalen Zuwanderungsgesetz. Doch auch die restriktivere Ausrichtung der europäischen Außengrenzen und Zuwanderungsbestimmungen gegenüber Drittstaatsangehörigen und Flüchtlingen hätten „ein immenses Spektrum“ an höchst unterschiedlichen Rechtslagen hervorgebracht, das sich zwischen einer legalen, langfristig gesicherten Aufenthaltsberechtigung und einem rechtlich völlig ungesicherten, illegalen Aufenthalt bewege.

Selbst Experten verlieren angesichts dieser Vielzahl von Kriterien zur Bestimmung der Aufenthaltsdauer und der Hierarchie von Berechtigungen und Einschränkungen leicht den Durchblick. Vertovec weiß das aus Gesprä-

chen mit einem auf diese Fragen spezialisierten Frankfurter Rechtsanwalt, der die Rechtslage als „höchst unübersichtlich“ bezeichnet habe. Als weitere Faktoren mit Einfluss auf die soziale Lage vieler Migrantinnen und Migranten nennt er deren jeweiligen Bildungshintergrund, ihre berufliche Qualifikation sowie die damit verbundenen Chancen auf dem Arbeitsmarkt.

### DIE KOMMUNEN MÜSSEN SICH STÄRKER ENGAGIEREN

„Allerdings können vorhandene Qualifikationen aufgrund einer nach wie vor mangelnden Anerkennung von ausländischen Bildungsabschlüssen oft nicht geltend gemacht werden“, beschreibt der Forscher ein weiteres Problem vieler Zuwanderer. Das gelte besonders für Migrantinnen und Migranten mit eingeschränktem, prekärem Rechtsstatus. Deren soziale Lage werde insbesondere auch davon beeinflusst, ob sie Unterstützung von sozialen, familiären Netzwerken und zivilgesellschaftlichen Organisationen vor Ort erfahren.

Gerade in dieser Hinsicht sieht Vertovec nicht nur in Frankfurt größeren Handlungsbedarf. Verstärktes Engagement der Kommunen für die sozial schwächsten Einwanderer sei nicht nur menschenrechtlich geboten, sondern auch essenziell für jede Form von Integration. Denn jede Kategorie, besonders auch die eines illegalen oder unregulierten Rechtsstatus, hat einen tief greifenden Einfluss darauf, wie Einwanderer ins Land kommen, sich niederlassen, erwerbstätig werden, Wohnungen finden oder Zugang zu Schulen, sozialen Diensten, zum Gesundheitswesen oder anderen öffentlichen Dienstleistungen erhalten; ob sie an ihren Herkunftsort gebunden bleiben oder nicht und wie sie sich sozial und kulturell auf andere Migranten und auf Deutsche einstellen.

Interessant nicht nur für die Frankfurter dürften auch die Erkenntnisse sein, welche die Forscher bei ihrer Analyse von Daten aus dem Melderegister gewonnen haben. Es ging ihnen um die geografische Verteilung der Supervielfalt im gesamten Stadtraum. „Unsere Ergebnisse zeigen deutlich, dass sie nicht konzentriert auftritt, sondern in der Stadt weit verbreitet ist“, sagt Steven Vertovec. Diese Befunde widersprechen nach Ansicht der Forscher ganz klar den verbreiteten Befürchtungen von städtischen „Ghettos“ und „Parallelgesellschaften“.

Geen verfestigte ethnische Strukturen spricht zudem die statistisch erfasste Tatsache, dass in Stadtteilen mit einem traditionell sehr hohen Ausländeranteil dieser im Zeitraum von 1998 bis 2006 am stärksten abgenommen hat. Nach den Beobachtungen der Sozialanthropologen verzeichnen die daran angrenzenden nördlichen Stadteile den größten Zuwachs.

Auch bei solchen Untersuchungen lohne sich ein differenzierter Blick auf die Daten. „Denn je nachdem, ob zwischen Ausländern und Deutschen mit



Migrationshintergrund oder zwischen Menschen mit oder ohne Migrationserfahrung unterschieden wurde, zeigten sich Unterschiede im Siedlungsverhalten“, erklärt der Forscher. Während sich etwa echte Migranten bevorzugt entlang des nördlichen Mainufers mit den Schwerpunkten Bahnhofsviertel und Gallus ansiedelten, ziehen Deutsche mit Migrationshintergrund offenbar vor allem Stadtteile wie Griesheim und die nordwestlichen Bezirke sowie die bevölkerungsreichen Stadtbezirke des nördlichen Stadtgebiets vor.

Angesichts solcher Unterschiede werde deutlich, dass ein Integrationskonzept, das lediglich auf das Merkmal „ausländische Staatsbürgerschaft“ abzielt, zu kurz greift. Näher an der gesellschaftlichen Realität und damit wirksamer seien Integrationsmaßnahmen, die den Unterschied zwischen Migrationshinweis und Migrationserfahrung und die spezifische Bevölkerungsverteilung beachten.

## VIELE MENSCHEN ZIEHEN ZU – UND GENAUSO VIELE WEG

Der Blick in die Statistik verriet Vertovec noch eine weitere rekordverdächtige Eigenschaft der Mainmetropole: „Zirka 300000 Menschen – etwa die Hälfte der Gesamtbevölkerung – kommen täglich in die Stadt und verlassen sie wieder. Damit hat Frankfurt die höchste Pendlerbilanz in Deutschland“, sagt der Forscher. Nicht minder rekordverdächtig erscheint auch die ausgeprägte Lust am Umzug. Den Melderegisterdaten zufolge sind in einem Zeitraum von etwa 15 Jahren genauso viele Menschen, wie die Stadt im Durchschnitt Einwohner hat, nach Frankfurt hin- und von dort wieder weggezogen. Ein besonders hohes Maß an Fluktuation unter den Bewohnern führe nicht zwangsläufig zu sozialer Instabilität, meint Vertovec. Im Gegenteil sieht er darin durchaus Vorteile für die Stadt. „Denn neue Konsumenten und neue Berufstätige kurbeln tendenziell die lokale Wirtschaft an.“

Chancen statt Risiken sieht Vertovec auch in der transnationalen Orientierung, wie sie in Frankfurt und anderen

Weltstädten zunehmend festzustellen sei. Billige Auslandstarife der Telefongesellschaften, erschwingliche Reisekosten und das Internet hätten in den vergangenen Jahren dazu geführt, dass Migrantinnen und Migranten mehr denn je einen starken Bezug zu Orten und Menschen im Ausland pflegen und aufrechterhalten können. Es sei eine gängige Befürchtung, dass solche transnationalen Orientierungen dieser Menschen mit einem mangelnden Zugehörigkeitsgefühl und mit mangelnder Loyalität zu der Gesellschaft, in die sie eingewandert sind, einhergehen.

Gerade diese Befürchtung sei oft einer der Gründe für verstärkte Integrationsmaßnahmen, die Migranten kulturell und sozial „eindeutiger“ auf ihre neue nationale Heimat festlegen sollen. „Tatsächlich ist jedoch in der kultur- und sozialwissenschaftlichen Forschung längst belegt, dass das Leben in spätmodernen Gesellschaften generell – und keineswegs nur bei Migranten – multiple Orientierungen und Mehrfachidentitäten in zunehmend transnationalen Dimensionen mit sich bringt“, sagt Vertovec. Wie er aus vielen Interviews weiß, fühlen sich diese Menschen durchaus mit ihren Herkunftsländern und Gemeinschaften verbunden und profitieren dabei von den neuen, kostengünstigen Kommunikationsmöglichkeiten. Vertovec: „Heute haben sie die Möglichkeit, solche Gefühle zu pflegen und zu intensivieren und sich gleichzeitig ein neues Leben, eine Lebensgrundlage, soziale Bindungen und politisches Engagement an ihrem neuen Wohnort aufzubauen.“

Vernetzung der Vielfalt erscheint aus Sicht der Wissenschaftler die zeitgemäßere Alternative zum Multikulti der Pionierjahre für die künftige Arbeit der Frankfurter Integrationsmanager. Praktisch geht es in den vielen Vorschlägen, die sie als Anknüpfungsmöglichkeiten präsentieren, im Wesentlichen darum, Menschen miteinander in Dialog zu bringen und über gemeinsame Interessen Schranken abzubauen. Da das AmkA auf eine „beachtliche Fachkompetenz“ und viele bestehenden Kontakte zu verschiedenen Gruppen zurückgreifen kön-

ne, sei es in der „einzigartigen Position“, als öffentliche Einrichtung eine führende Rolle in der Entwicklung von Kontakten und Netzwerken zu übernehmen, so die Forscher zur neuen Aufgabe der Frankfurter Integrationsmanager.

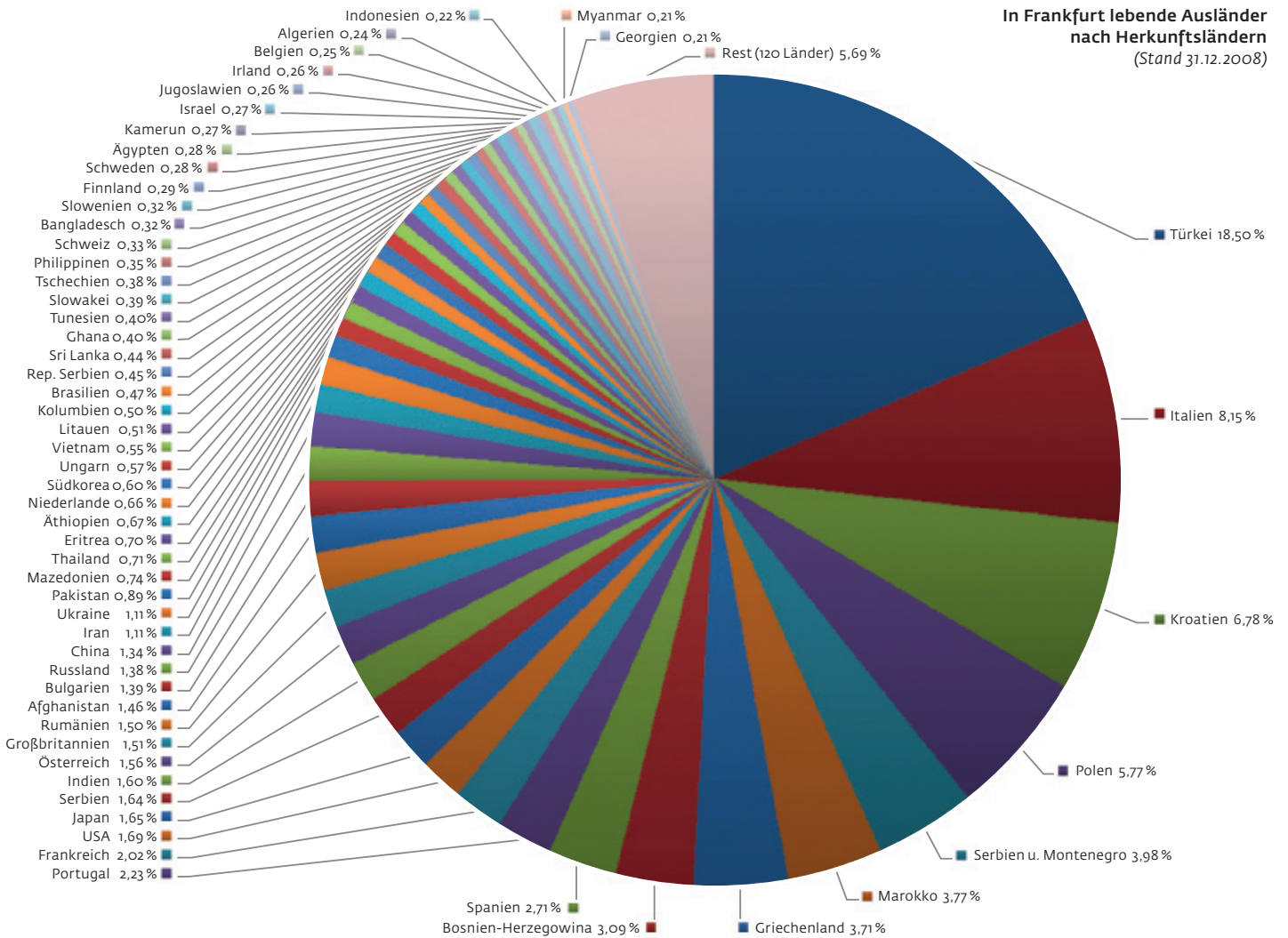
So könne das AmkA übergreifende Themen finden und zur Diskussion stellen, die alle Milieus betreffen und ihr Engagement herausfordern, oder Initiativen von lokalem, allgemeinem Interesse entwickeln – etwa ein Gemeinde- oder Jugendzentrum zu gründen und zu betreiben, Straßenfeste zu organisieren, etwas mit Kindern zu unternehmen, örtliche Flohmärkte zu veranstalten, sich gemeinsam Wissen oder spezielle Fähigkeiten anzueignen.

## GARTENFREUNDE GESTALTEN KLEINE PARADIESE

Auch die Förderung von sozialen Verbindungen auf Nachbarschaftsebene steht auf der langen Liste von Vorschlägen, die von Amts wegen umgesetzt werden könnten. Dabei könne das AmkA aus einem Erfahrungsschatz schöpfen, der viele funktionierende Projekte aus 20 Jahren Integrationsarbeit beinhalte. Als gelungenes Beispiel nennen die Forscher die Frankfurter Initiative der „Interkulturellen Gärten“, bei der Gartenfreunde unterschiedlichster Provenienz zusammen bunte Gemüse- und Blumenparadiese gestalten.

Dabei genüge es häufig seitens der Stadt, geeignete Räume anzubieten. „Oft mangelt es nicht an Ideen für gemeinsame Aktivitäten, wohl aber an Ressourcen und Raum, in dem diese Ideen verwirklicht werden können“, sagt Vertovec. Deshalb sollten öffentliche Einrichtungen ihre Möglichkeiten nutzen, positive dauerhafte Kontakte und Interaktionen zu fördern. Kontakte und Interaktionen dieser Art sollten sich in nachhaltigere soziale Netzwerke entwickeln, die ethnische und religiöse Grenzen sowie gesetzliche Einschränkungen überwinden und Flüchtlinge, Asylsuchende und Menschen mit eingeschränktem oder unregelmäßigem Rechtsstatus gleichermaßen mit einbeziehen.

**In Frankfurt lebende Ausländer nach Herkunftsländern**  
(Stand 31.12.2008)



Letztlich gehe es darum, Menschen miteinander in Dialog zu bringen und über gemeinsame Interessen Schranken abzubauen. „Die von uns angeregte Diskussion um die Lebenssituation, die Veränderungen und das Zusammenleben in den Stadtteilen ist von dem Anliegen motiviert, den Stadtteilbezug von Integrationspolitik zu verstärken“, erklären Vertovec und seine Kollegin Römhild. Was das genau für einen Stadtteil oder eine Nachbarschaft bedeute, könne jeweils nur für diesen konkreten Ort und im Gespräch mit den Beteiligten dort erarbeitet werden.

Auch sei für alle diese Strategien und die potenziell daraus resultierenden Maßnahmen und Programme eine gemeinsame Sprache notwendig. „Von daher kann die Vernetzungspolitik mit der Förderung des Erwerbs der deutschen Sprache Hand in Hand gehen“, sagt Steven Vertovec. Allerdings will er dabei die Latte gar nicht so hoch gelegt wissen. Es gehe nicht um eine

generelle Sprachkompetenz, sondern um das Lernen von sprachlichen Fertigkeiten für die Interaktion in verschiedenen Bereichen des Alltags, etwa am Arbeitsplatz, im Gespräch unter Eltern in der Schule oder in öffentlichen Einrichtungen.

Bei seinen Feldforschungen zur gesellschaftlichen Vielfalt hat Vertovec auf einem Flohmarkt zufällig eine Szene beobachtet, die er in diesem Zusammenhang gern beschreibt, weil sie ein passendes Bild dazu entwirft: „Zwei Männer, von denen keiner so richtig Deutsch konnte, haben sich über das Werkzeug unterhalten, das der eine verkaufte und der andere haben wollte. Sie haben die Vorzüge und den Preis diskutiert, Witze gerissen und sich glänzend in einer Sprache unterhalten, die hörbar nicht ihre Muttersprache war und die sie auch nur leidlich beherrschten.“ Das sei doch ein gutes Beispiel dafür, wie gelungene Vernetzungspolitik im echten Leben aussehen könnte. ◀

## GLOSSAR

### Transnationalisierung

Wissenschaftlicher Begriff, der die sozialen, kulturellen, politischen und wirtschaftlichen Bindungen zu fassen sucht, die Migranten zu ihren Herkunftsländern aufrechterhalten.

### Supervielfalt (Super Diversity)

Konzept, das den Wandel der internationalen Migration und der Bevölkerungsstruktur der Zuwanderungsländer seit den 1980er-Jahren beschreibt. Statt großer Migranten-Gruppen aus nur wenigen Ländern kommen kleinere Gruppen aus sehr vielen verschiedenen Ländern.

### Global Cities

Von der Stadtsoziologin Saskia Sassen geprägter Begriff. Global Cities sind untereinander vernetzte Finanz- und Dienstleistungszentren, die zentrale Steuerungsfunktionen in der globalen Wirtschaft ausüben.



# Vielleicht-Maschine mit Zukunft

Mit Kernfusion ließe sich die Energieversorgung der Zukunft sichern. Das große Vorbild ist unsere Sonne, die ihre Energie aus der Verschmelzung leichter Atomkerne gewinnt. Grundlegende Erkenntnisse zur Entwicklung dieser neuen Energiequelle stammen vom Garching **Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP)**, das in diesem Jahr sein 50-jähriges Bestehen feiert.

TEXT **ELKE MAIER**

Den Anfang machte die Sagengestalt Prometheus: Um den Menschen das Feuer wiederzugeben, das der Göttervater Zeus ihnen genommen hatte, hielt er einen Pflanzenstängel in den Himmel und entzündete ihn am funkensprühenden Gespann des Sonnengottes Helios. Der Gedanke, die solare Glut einzufangen, fasziniert die Menschen bis in die Gegenwart. Heute arbeiten weltweit Forscher daran, das Sonnenfeuer auf der Erde selbst zu entfachen und für die Energiegewinnung nutzbar zu machen, darunter die Mitarbeiter des Max-Planck-Instituts für Plasmaphysik (IPP) in Garching und Greifswald. Die Herausforderungen dabei sind weitaus größer, als die Pioniere der Fusionsforschung vor einigen Jahrzehnten erwartet hatten.

Ende der 1940er-Jahre begannen Wissenschaftler zu untersuchen, wie man aus Kernfusion Energie gewinnen könnte. Bereits 1929 hatten die Physiker Fritz G. Houtermans und Robert d'Escourt Atkinson vermutet, die Sonnenglut stamme aus der Verschmelzung leichter Atomkerne. Zehn Jahre später beschrieben Hans Bethe und Carl Friedrich von Weizsäcker den Reaktionszyklus, in dessen Verlauf bei rund 15 Millionen Grad Celsius im Sonneninneren Wasserstoffkerne zu Helium verschmelzen. Damit waren die theoretischen Grundlagen für die Fusionsforschung geschaffen.

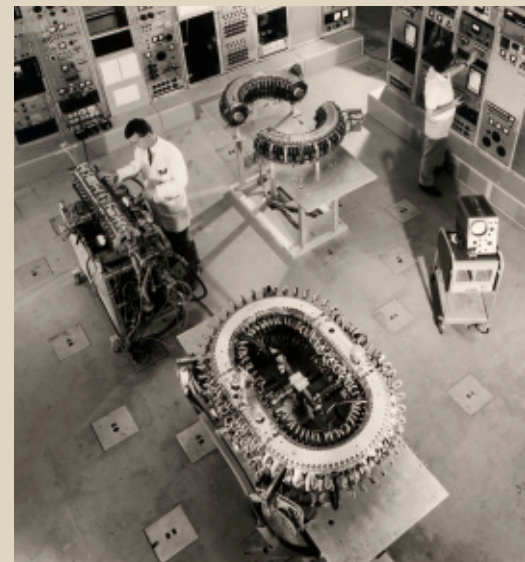
Um die Kernfusion unter irdischen Bedingungen in Gang zu setzen, müsste es den Forschern gelingen, ein extrem dünnes, ionisiertes Gas – ein Plasma – aus den Wasserstoffisotopen Deuterium und Tritium wärmeisolierend einzuschließen und auf mehr als 100 Millionen Grad zu erhitzen. Denn nur bei diesen Temperaturen ist die Geschwindigkeit der Teilchen so hoch, dass zwei positiv geladene Atomkerne ihre gegenseitige Abstoßung überwinden und miteinander verschmelzen. Gelingt das, ist die Energieausbeute gewaltig: Ein Gramm Brennstoff könnte dieselbe Menge an Energie liefern wie die Verbrennung von elf Tonnen Kohle.

Doch wie sollte man es bewerkstelligen, ein derart heißes Plasma unter Verschluss zu halten? In jedem Gefäß würde der Kontakt des Brennstoffs mit dem Wandmaterial augenblicklich zur Abkühlung führen, und die Fusion käme zum Stillstand. Den entscheidenden Einfall hatte 1951 der amerikanische Astronom Lyman Spitzer von der Princeton University. Er schlug vor, das Plasma in einen

magnetischen Käfig zu bannen; die Magnetfelder würden die elektrisch geladenen Teilchen berührungsfrei in der Schwebe halten.

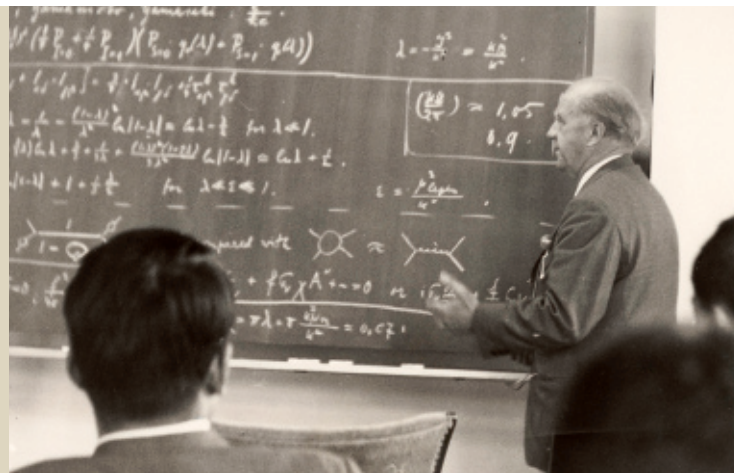
Die Begeisterung war zunächst groß, zumal die Bestandteile für den Brennstoff nahezu unbegrenzt vorhanden sind. Deuterium kommt in den Ozeanen vor, Tritium lässt sich aus Lithium gewinnen, das man in Gesteinen findet. In 20 Jahren, so meinten Experten 1955, würden die Energieprobleme der Menschheit ein für alle Mal gelöst sein. Etwas zurückhaltender gab man sich in Los Alamos, wo der Engländer James Tuck sein geplantes Experiment *Perhapsatron* nannte – *Vielleicht-Maschine*. Mit diesem Namen lag er nicht ganz falsch, denn schon bald zeichnete sich ab, dass sich das flüchtige Plasma nur schwer bändigen ließ. Eine ganze Reihe von Instabilitäten störte den magnetischen Einschluss und führte dazu, dass die geladenen Teilchen entwischten. So stellte man sich Ende der 1950er-Jahre darauf ein, dass der Weg zum Fusionskraftwerk wohl länger sein würde als erhofft.

Zu dieser Zeit gab es auch in Deutschland Pläne, die Fusionsforschung auszuweiten. Am Göttinger Max-Planck-Institut für Physik lag ein Schwerpunkt auf allgemeiner Plasmaphysik und Kernfusion. Werner Heisenberg, der damalige Direktor des Instituts, setz-



Wendelstein 1a, der erste Stellarator des IPP, nahm noch im Gründungsjahr 1960 seinen Betrieb auf (vorne). Im Hintergrund: die Stellaratoren Wendelstein 1b (rechts) und Wendelstein 4 (links).

Visionär der Fusionsforschung:  
Werner Heisenberg auf einem  
Symposium in Feldafing im Juli 1965.



te sich dafür ein, die „Arbeiten auf dem Gebiet der thermonuklearen Reaktionen“ auszubauen. Sein Antrag auf Forschungsmittel, den er 1956 beim Bundesministerium für Atomfragen einreichte, hatte Erfolg. Auf den positiven Bescheid folgte die räumliche Ausdehnung des Göttinger Instituts. Am 28. Juni 1960 gründete man in Garching bei München das IPP, zunächst als Institut für Plasma-physik GmbH, bevor es 1971 in das Max-Planck-Institut für Plasma-physik umgewandelt wurde. Gesellschafter waren Werner Heisenberg und die Max-Planck-Gesellschaft. Bereits 1961 schloss das IPP einen Assoziationsvertrag mit der Europäischen Atomgemeinschaft (EURATOM) ab und ist seither Teil des Europäischen Fusionsforschungsprogramms. In den Anfangsjahren war noch völlig offen, welche Ansätze zum Ziel führen würden. Daher forschten die Garchinger Wissenschaftler auf breiter Front, um verschiede-

SÜDDEUTSCHE ZEITUNG VOM 22. NOVEMBER 1955



Schließlich werde man daran gehen (...) die stärkste in der Natur vorkommende Energiequelle, die im Innern der Sonne und der meisten Sterne liege, für den friedlichen Aufbau der Erde in den Dienst zu stellen (...) Dieses Problem übertreffe an Kühnheit alles bisher Dagewesene.«

ne Einschlussmethoden zu testen. Auch weltweit erprobten Plasmaphysiker viele Konzepte, um das flüchtige Teilchengemisch zu bändigen – und verwarfen die meisten davon.

Zwei Anlagentypen überdauerten den Selektionsprozess: Der Stellarator, dessen Prinzip auf Lyman Spitzer zurückgeht, baut den Magnetfeldkäfig allein mithilfe äußerer Spulen auf; demgegenüber nutzt der Tokamak, ausgetüfelt von den russischen Physikern Igor E. Tamm und Andrej D. Sacharow, zusätzlich einen im Plasma fließenden Strom, der gleichzeitig für die Aufheizung des Brennstoffs sorgt. Weil dieser Plasmastrom in Pulsen von einem Transformator erzeugt wird, können Tokamaks nur gepulst arbeiten, während sich Stellaratoren für den Dauerbetrieb eignen.

Doch in den 1960er-Jahren blieben die experimentellen Fortschritte mit beiden Anlagentypen unbefriedigend. Vor allem der viel zu hohe Teilchenverlust machte den Physikern zu schaffen. Gegen Ende des Jahrzehnts schienen die Wissenschaftler in einer Sackgasse angelangt – als 1968 eine Nachricht aus Russland eintraf: Forscher meldeten von dort, mit ihrem Tokamak T<sub>3</sub> bezüglich Temperatur, Dichte und Einschlusszeit des Plasmas Werte erreicht zu haben, die alle bisherigen Ergebnisse übertrafen. In anderen Ländern war man zunächst skeptisch. So reiste Anfang 1969 ein englisches Team eigens nach Moskau, um die Angaben der russischen Kollegen zu überprüfen. Für ihre neuartigen Lasermessungen hat-

ten die Engländer fünf Tonnen physikalische Apparatur im Gepäck. Als die Messungen die Angaben nicht nur bestätigten, sondern teilweise sogar übertrafen, brach in der wissenschaftlichen Welt eine Tokamak-Euphorie aus.

Der neuen Entwicklung konnte man sich auch in Deutschland nicht entziehen. Im Jahr 1973 ging am IPP der erste Tokamak *Pulsator* in Betrieb; gleichzeitig experimentierten die Wissenschaftler weiterhin mit ihren Stellaratoren. Daneben verfolgten sie noch eine andere kühne Idee: Mithilfe des Hochleistungslasers *Asterix* wollten die Forscher winzige, tiefgefrorene Deuterium-Tritium-Kügelchen im freien Fall mit gebündelten Laserlichtstrahlen beschießen. Durch die energiereichen Lichtblitze innerhalb von milliardstel Sekundenbruchteilen extrem komprimiert und auf Zündtemperatur gebracht, sollten die Kügelchen als „Mini-Wasserstoffbomben“ detonieren und dabei Energie abgeben.

Im Jahr 1974 wurde jedoch beschlossen, die Arbeiten im IPP ausschließlich auf den magnetischen Einschluss von Plasmen auszurichten und die 1967 begonnenen Untersuchungen zur Laserfusion einzustellen. Am 1. Januar 1975 wurde die Laserfusion in eine Projektgruppe ausgegliedert, aus der 1981 das neue Max-Planck-Institut für Quantenoptik hervorging.

Mit dem Stellarator *Wendelstein 7-A* gelang es am IPP im Jahr 1980 weltweit zum ersten Mal, ein heißes Plasma ohne zusätzlichen Plasmastrom einzuschließen. Bis dahin war das nur mit kalten Plasmen gelungen. „Garching shows stellarators may be good after all“, war daraufhin in der Zeitschrift *PHYSICS TODAY* zu lesen. Dabei waren Reaktionsgefäß und helikale Spulen von *Wendelstein 7-A* in der Institutswerkstatt als zeitlich begrenzte Übergangslösung gefertigt worden – die dann fast ein Jahrzehnt bestehen blieb und Berühmtheit erlangte.

Den nächsten großen Erfolg konnten die Forscher 1982 verbuchen: Der Tokamak *ASDEX* lieferte den Beweis, dass sich die Wärmedämmung durch eine spezielle Magnetfeldanordnung (Divertor genannt) verdoppeln lässt. Die Physiker erzielten so einen Plasmazustand mit besonders guter Wärmeisolation, das sogenannte H-Regime. Seither arbeiten Fusionsanlagen weltweit mit Divertor.

Heute ist das IPP das einzige Institut, das Tokamak und Stellarator im Vergleich untersucht. Im 1993 gegründeten Teilinstitut in Greifswald entsteht derzeit der Stellarator *Wendelstein 7-X*, während die Garchinger Forscher mit dem Tokamak *ASDEX Upgrade* experimentieren. Die Erfahrungen fließen in das europäische Gemeinschaftsprojekt *JET* im englischen Culham ein sowie in den internationalen Testreaktor *ITER*, der seit 2007 im südfranzösischen Cadarache entsteht. Läuft alles nach Plan, könnte Mitte dieses Jahrhunderts das erste Kraftwerk ans Netz gehen – und damit das Feuer des Prometheus wieder auf der Erde entzünden.



## Was ist das All? Und wenn ja, wie oft?

Tobias Hürter, Max Rauner,  
**Die verrückte Welt der Paralleluniversen**

272 Seiten, Piper Verlag, München 2009, 14,95 Euro



Wo leben wir eigentlich? Und wenn ja, wie oft? Hätte ein Physiker vor ein paar Jahren derartige Fragen gestellt, hätten ihn die meisten seiner Kollegen für nicht ganz zurechnungsfähig erklärt. Und im 16. Jahrhundert wären ihm solche Gedankenspiele vermutlich noch schlechter bekommen. Damals wurde der Dominikanermönch Giordano Bruno auf dem Scheiterhaufen verbrannt, weil er unter anderem behauptet hatte, das All sei unendlich. Zu Beginn des 21. Jahr-

hunderts dürfen sich Forscher glücklicherweise ungestraft mit der Unendlichkeit beschäftigen. Und auch mit der Frage, wie oft es uns eigentlich gibt. Dieser Stoff, aus dem die Fantasien der Physiker sind, dient den Wissenschaftsjournalisten Tobias Hürter und Max Rauner als Thema für ihr Buch über das Multiversum.

Es geht dabei nicht um Fiktion, sondern um eine ernst zu nehmende Theorie. Kurz gefasst besagt sie: Das Universum ist nur eines von unendlich vielen, und jeder Mensch hat unendlich viele Doppelgänger auf anderen Planeten. Tatsächlich lässt etwa die Quantenmechanik sehr viele Zustände der Welt gleichzeitig zu. Und die Stringtheorie erlaubt 10 hoch 500 Varianten einer vierdimensionalen Wirklichkeit.

Nach einem Ausflug in die Geschichte der Kosmologie beschreiben die Autoren auf äußerst unterhaltsame Art die Fakten und Hintergründe des modernen „Viel-Weltbildes“. Hürter und Rauner gelingt es dabei, selbst vertrackte Sachverhalte verständlich zu erklären. Darüber hinaus helfen witzige Comics von Vitali Konstantinov, allzu Abstraktes wie die vier Level des Multiversums „nach aufsteigender Verrücktheit“ zu veranschaulichen. Schließlich stellt sich das Autorenduo auch den Fragen nach dem Sinn. „Wo ist Gott?“ heißt das letzte der 14 Kapitel. So vermittelt das Buch jede Menge Denkanstöße. Kurze Biografien der erwähnten Forscher ergänzen die Darstellung, ein Sachregister fehlt leider.

Nach der Multiversums-Theorie gibt es auch eine Welt, die der unseren aufs Haar gleicht – mit einem Unterschied: In ihr wäre das vorliegende Buch nicht geschrieben worden. Und das wäre sehr schade!

Helmut Hornung

## Lebe gut, stirb später

Tobias Hülswitt, Roman Brinzanik,  
**Werden wir ewig leben?** Gespräche über die Zukunft  
von Mensch und Technologie

308 Seiten, Edition unsel, Suhrkamp-Verlag, Berlin 2010, 15 Euro



Der Sieg über den Tod, der Triebfeder vieler Mythologien und Religionen ist, beflügelt auch die Wissenschaft. Biologen erforschen das Altern, um seine Prinzipien besser zu verstehen und ein gesundes Leben zu ermöglichen. Demografen berechnen, dass wir alle zehn Jahre konstant zweieinhalb Jahre an Lebenserwartung hinzugewinnen. Neue Technologien, sei es in der Hirn- und Stammzellforschung, der Nano- und Biotechnologie, fordern unser Bild von der Natur des

menschlichen Körpers und Geistes heraus. Wie weit kann der Mensch sein Leben radikal verlängern? Was ist natürlich, was künstlich? Können (und wollen) wir ewig leben?

Die Gespräche, die der Physiker Roman Brinzanik und der Schriftsteller Tobias Hülswitt mit einem Futurologen und der Natur- und Geisteswissenschaftlerin, Ethikern und Schriftstellern geführt haben, regen eine Debatte über das Altern und seine Grenzen an, laden zum Nachdenken ein über den (Un-)Sinn des Sterbens, den demografischen Wandel und seine Chancen und Herausforderungen.

Zu Beginn der Dialogreihe entwirft der Erfinder und Futurologe Ray Kurzweil eine Zukunftsvision, in der Künstliche Intelligenz mit der menschlichen verschmilzt, Alterskrankheiten durch Gentechnik und Nanomedizin besiegt werden und schließlich niemand eines natürlichen Todes sterben muss. Was daran ist Wissenschaft, was religiöses Heilsversprechen, was Science-Fiction?

Viele Fragen, die Kurzweil provoziert, werden nach und nach von Wissenschaftlern aus unterschiedlichen Perspektiven beantwortet, unter ihnen der Chemie-Nobelpreisträger Jean-Marie Lehn, der Stammzellforscher Hans R. Schöler und der Hirnforscher Wolf Singer. Der Biologe Peter Gruss, der Demograf James W. Vaupel und der Ethiker Bert Gordijn loten die sozialen Konsequenzen vieler neuer Technologien aus. Mit Jesuitenpater Friedhelm Mennekes, dem Schriftsteller Hans-Ulrich Treichel und dem Philosophen Aaron Ben-Ze'ev sprechen die Autoren darüber, was menschliche Identität ausmacht, über das Verhältnis der Künste zu Technik, über Melancholie und Vergänglichkeit.

## Die Realität der Utopie

Bert Hölldobler, Edward O. Wilson,

### **Der Superorganismus,**

Der Erfolg von Ameisen, Bienen, Wespen und Termiten

632 Seiten, Springer-Verlag, Heidelberg 2010, 79,95 Euro

Am Ende jedes Gesprächs steht immer dieselbe hypothetische Frage: „Wollen Sie 400 Jahre alt werden?“ Die Antworten verraten viel über die unterschiedlichen Persönlichkeiten. Sie überraschen, stimmen nachdenklich und fordern Widerspruch heraus – sie sind das Extrakt des Buchs. Wer zu faul wäre, sich durch die wissenschaftlichen Argumentationen zu lesen, würde allein durch diese Antworten viel lernen, über sich und seine Positionen zum Leben und zum Tod.

„Wenn ich gesund bliebe? Selbstverständlich!“, antwortet beispielsweise Jean-Marie Lehn. „Und meine Frau wäre dabei?“, fragt Hans Schöler nach, „dann könnten wir unsere Ur-Ur-Ur-Ur-Enkel kennenlernen.“ Knappe Ressourcen, eskalierende Umweltprobleme und Generationenkonflikte fürchten die einen. Andere wünschen, „möglichst ohne Schmerzen zu sterben, auch wenn das schon bald wäre, anstatt länger zu leben“. Fast niemand würde Lebensqualität und Menschenwürde einem hohen Alter opfern.

Ob wir einst ewig leben, ist so nur vordergründig die zentrale Frage. Die Fragen dahinter handeln von Liebe und Tod, dem Schicksal und dem Versuch des Menschen, diesem zu entinnen – den großen Fragen des Lebens, mit denen sich schon viele griechische Dramatiker und moderne Literaten beschäftigten. Während der Leser anfangs vielleicht irritiert ist, fügt sich das Bild zum Schluss zu einer Einheit: Auf nur 308 Seiten gelingt es den Autoren, dieses komplexe Thema facettenreich zu beleuchten. Ein kurzer, kompakter und aktueller Beitrag zu einer überfälligen Debatte. Barbara Abrell



Eine Gesellschaft, in der das Allgemeinwohl oberste Priorität hat. Eine Gesellschaft ohne Hierarchien, Dominanz und Unterordnung. Eine Gesellschaft, in der jedes Individuum seinen festen Platz hat und seine Auf-

gaben zum Wohle aller erledigt. Was wie eine naive Utopie politischer Idealisten klingt, ist im Tierreich durchaus Realität – selten zwar, aber höchst erfolgreich. Vor allem in der Gruppe der Insekten haben sich Ameisen, Bienen und Termiten zu kooperativen, arbeitsteiligen und egalitären Gesellschaften zusammengeschlossen.

Solche Superorganismen behandeln die beiden Soziobiologen Bert Hölldobler und Edward O. Wilson in ihrem neuen Buch. Sie greifen darin die Fortschritte auf, die die Forschung seit dem Erscheinen ihres preisgekrönten Werks *The Ants* vor 20 Jahren gemacht hat. Beide Wissenschaftler haben sich beinahe ihr gesamtes Forscherleben mit Ameisen beschäftigt. So nimmt es kaum Wunder, dass diese auch den Schwerpunkt des neuen Buches bilden.

Dabei sind Ameisen nicht die Einzigen, die sich zu Superorganismen zusammengeschlossen haben. Bis auf gelegentliche Exkurse zu Honigbienen und Termiten werden andere Tiergruppen jedoch ausgespart. Das ist einerseits schade, da man als Leser gerne mehr darüber erfahren würde, warum sich ausgerechnet eine einzelne Garnelenart zum Superorganismus weiterentwickelt hat und wie Nacktmulle und

Zwergmangusten in ihren Staaten zusammenleben – die einzigen Wirbeltiere unter den ansonsten von Gliederfüßlern (Arthropoden) dominierten Superorganismen.

Andererseits bieten die 14000 Ameisen-Arten mehr als ausreichend Anschauungsmaterial. Die Autoren beschreiben die Bedingungen, unter denen sich Superorganismen entwickeln können, und wie diese funktionieren. Besonders detailliert schildern Hölldobler und Wilson Kommunikation und Arbeitsteilung innerhalb von Ameisenstaaten. Denn während Erstere die Voraussetzung für das geordnete Zusammenleben innerhalb der Staaten ist, bildet die Arbeitsteilung mit einem Kastensystem aus fortpflanzungsfähigen und sterilen Individuen die Grundbedingung für einen Superorganismus.

Die Gliederung des Buchs ist der ungeheuren Vielfalt geschuldet, mit der die verschiedenen Arten ihr Zusammenleben organisieren. Allerdings bleiben dadurch die einzelnen Arten dem Leser eher fremd. Wer etwa die Waldameisen kennenlernen möchte, deren Hügel ihn beim Spaziergang beeindruckt haben, muss sich die Informationen in den einzelnen Kapiteln erst mühsam zusammensuchen.

Auch wenn sich *Der Superorganismus* mit seinem teilweise anspruchsvollen Duktus in erster Linie an wissenschaftlich Interessierte richtet, bietet er doch faszinierende Einblicke in die Welt der staatenbildenden Insekten und den aktuellen Forschungsstand auf diesem Gebiet. Und so mancher Leser wird sich nach der Lektüre fragen, ob nicht die Ameisen die Krone der Schöpfung darstellen. Die heimlichen Herrscher sind sie in jedem Fall: Auf der Erde leben mindestens zehn Billionen Ameisen. Harald Rösch



## Das Frühstücksei im Tomografen

Klaus Roth, **Chemische Köstlichkeiten**

240 Seiten, Verlag Wiley-VCH, Weinheim 2010, 29,90 Euro



Das herrliche Buch des Berliner Biochemikers Klaus Roth sammelt 17 Aufsätze, die zwischen 2006 und 2009 in der Zeitschrift *Chemie in unserer Zeit* erschienen sind.

Etwa ein Drittel der Beiträge widmet sich der Chemie des Kochens, der Küche und der Lebensmittel; die anderen Themen sind weit gestreut und reichen von der „chemischen Produktion gemäß Thora und Koran“ über den Klang der Stradivari bis zur „Stöchiometrie der Olympischen Spiele“. Auch die Chemie der CDs und DVDs, die schreckliche und heute wohl weitgehend vergessene Geschichte des Skorbuts und die Biografie des von den Nazis vertriebenen Biochemikers Hans Adolf Krebs werden behandelt.

Die Beiträge sind nicht nur gründlich recherchiert und mit Fußnoten versehen, sondern oft auch außerordentlich unterhaltend geschrieben. Darüber hinaus hat

der Herausgeber, wenn es sich anbot, selbst experimentiert: Ein Highlight – sowohl was die Unterhaltsamkeit als auch den Aufwand angeht – ist die „oologisch-chemische Betrachtung“ über das Frühstücksei: Roth hat einen Kernspintomografen mit rohen, halbhartem und hartgekochten Eiern bestückt und deren Härtegrad beobachtet. Herausgekommen ist die erste „nicht-invasive Methode zur kulinarischen Bewertung weichgekochter Frühstückseier“, wie das Diagramm stolz vermerkt.

Ein Beitrag beschäftigt sich auch mit dem chemischen Geheimnis der Geigenvirtuosen und lauscht dem Klang einer Stradivari mit chemisch gespitzten Ohren. Klaus Roth hat wunderbare Zitate der Geigerin Ann-Sophie Mutter eingeholt, die von der „endlosen Love-Story“ mit ihrer Stradivari spricht. So gab es eine Unzahl von Untersuchungen, die versucht haben, dem Geheimnis der Stradivari auf den Grund zu gehen. In verschiedenen Versuchen sollten weltberühmte Geiger als Zuhörer den Klang einer Stradivari vom Klang einer normalen Geige unterscheiden – und sind damit erbärmlich gescheitert. Allerdings sind diese

Versuche nicht zu 100 Prozent aussagekräftig, weil sie nicht wirklich doppelblind ausgeführt worden sind: Der Geiger, der spielte, wusste, welche Geige er spielt, und könnte unbewusst sein Spiel den Erwartungen der Zuhörer angepasst haben. Nur einige wenige Solisten lassen sich nicht vom Stradivari-Mythos anstecken. Und so lautet die ernüchternde Antwort, der auch Roth zustimmen scheint: Es gibt sehr wahrscheinlich gar kein Geheimnis, der angeblich einmalige Klang der Stradivari ist vermutlich nur eine Einbildung.

Das Buch dürfte eine Fundgrube für den Chemie-Unterricht ab Klasse 10 sein und ist vermutlich auch für Schulbibliotheken ideal. Selbst wer viel Vorwissen mitbringt, findet immer wieder Neues und Ungewöhnliches. Nur eines kann man nicht glauben: In der oologischen Betrachtung zitiert Roth Literatur aus dem Jahr 1970, die nachweisen will, dass ein Eierstecher, mit dem man ein kleines Loch in die Eierschale macht, um das Platzen des Frühstückseis im Wasser zu verhindern, absolut wirkungslos sei. Das widerspricht der Alltagserfahrung des Rezensenten und schreit nach neuen Versuchsreihen... Gottfried Plehn

### Weitere Empfehlungen

- Ben Goldacre, **Die Wissenschaftslüge**, Die pseudowissenschaftlichen Versprechen von Medizin, Homöopathie, Pharma- und Kosmetikindustrie 420 Seiten, Fischer Taschenbuch Verlag, Frankfurt 2010, 9,95 Euro
- Josef Honerkamp, **Die Entdeckung des Unvorstellbaren**, Einblicke in die Physik und ihre Methode 386 Seiten, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2010, 24,95 Euro
- Garry Marcus, **Murks**, Der planlose Bau des menschlichen Gehirns, 260 Seiten, Verlag Hoffmann und Campe, Hamburg 2009, 22 Euro
- Rudolf Taschner, **Rechnen mit Gott und der Welt**, Betrachtung von allem plus eins, 207 Seiten, Ecowin Verlag, Salzburg 2009, 22 Euro

# Standorte

- Institut / Forschungsstelle
- Teilinstitut / Außenstelle
- Sonstige Forschungseinrichtungen

## Niederlande

- Nimwegen

## Italien

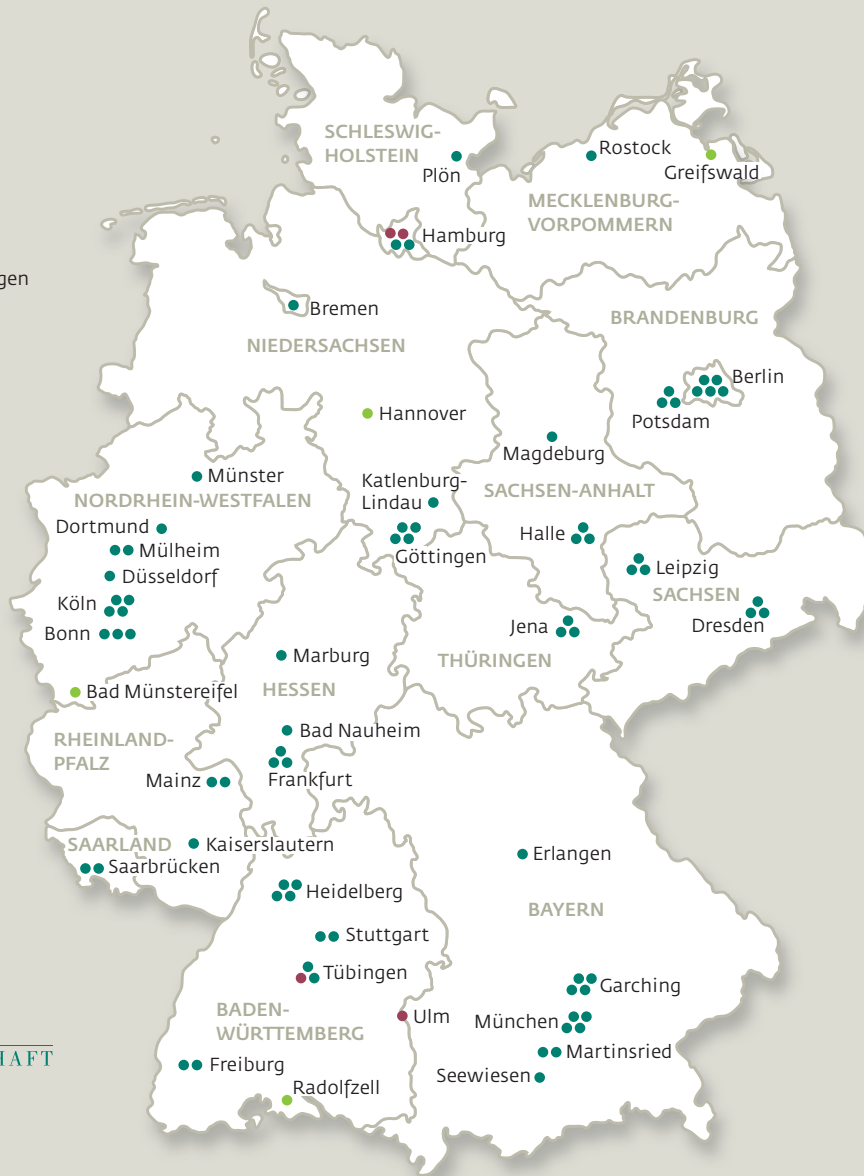
- Rom
- Florenz

## USA

- Florida

## BRASILIEN

- Manaus



MAX-PLANCK-GESellschaft

## Impressum

**MAXPLANCKFORSCHUNG** wird herausgegeben vom Referat für Presse- und Öffentlichkeitsarbeit der Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e.V., vereinsrechtlicher Sitz: Berlin. ISSN 1616-4172

### Redaktionsanschrift

Hofgartenstraße 8, 80539 München  
Tel. 089 2108-1562, Fax 089 2108-1405  
E-Mail: mpf@gv.mpg.de  
Internet: www.magazin-dt.mpg.de

### Verantwortlich für den Inhalt

Dr. Christina Beck (-1276)

### Redaktionsleitung

Peter Hergersberg (-1536), Helmut Hornung (-1404)

### Redaktion

Dr. Christina Beck (Biologie, Medizin; -1276)  
Peter Hergersberg (Chemie, Physik, Technik; -1536)  
Helmut Hornung (Astronomie; -1404)  
Dr. Harald Rösch (Biologie, Medizin; -1756)

### Assistenz/Bildredaktion

Susanne Schauer (-1562)

### Wissenschaftlicher Beirat

Prof. Dr. Gerhard Wegner  
Prof. Dr. Heinz Wässle  
Prof. Dr. Wolfgang Prinz

### Gestaltung

Julia Kessler, Sandra Ostertag  
Voßstraße 9, 81543 München  
Tel. 089 27818770  
E-Mail: projekte@designergold.de

### Litho

kaltnermedia GmbH  
Dr.-Robert-Zoller-Str. 1, 86399 Bobingen

### Druck & Vertrieb

Vogel Druck- & Medienservice GmbH  
Leibnizstr. 5, 97204 Höchberg

### Anzeigen

Beatrice Rieck  
Vogel Druck- & Medienservice GmbH  
Leibnizstr. 5, 97204 Höchberg  
Tel. 0931 4600-2721, Fax 0931 4600-2145  
E-Mail: beatrice.rieck@vogel-druck.de

**MAXPLANCKFORSCHUNG** berichtet über aktuelle Forschungsarbeiten an den **Max-Planck-Instituten** und richtet sich an ein breites wissenschaftsinteressiertes Publikum. Die Redaktion bemüht sich, auch komplexe wissenschaftliche Inhalte möglichst allgemeinverständlich aufzubereiten. Das Heft erscheint in deutscher und englischer Sprache (**MAXPLANCKRESEARCH**) jeweils mit vier Ausgaben pro Jahr; die Auflage dieser Ausgabe beträgt 65 000 Exemplare (**MAXPLANCKRESEARCH**: 10 000 Exemplare). Der Bezug ist kostenlos. Ein Nachdruck der Texte ist nur mit Genehmigung der Redaktion gestattet; Bildrechte können nach Rücksprache erteilt werden. Die in **MAXPLANCKFORSCHUNG** vertretenen Auffassungen und Meinungen können nicht als offizielle Stellungnahme der **Max-Planck-Gesellschaft** und ihrer Organe interpretiert werden.

Die **Max-Planck-Gesellschaft** zur Förderung der Wissenschaften unterhält 80 Institute und Forschungseinrichtungen, in denen rund 21 200 Personen forschen und arbeiten, davon etwa 5 100 fest angestellte Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler. Der Jahresetat 2010 umfasst insgesamt 1,3 Milliarden Euro. Die **Max-Planck-Institute** betreiben Grundlagenforschung in den Natur-, Lebens- und Geisteswissenschaften. Die **Max-Planck-Gesellschaft** ist eine gemeinnützige Organisation des privaten Rechts in der Form eines eingetragenen Vereins. Ihr zentrales Entscheidungsgremium ist der Senat, in dem Politik, Wissenschaft und sachverständige Öffentlichkeit vertreten sind.



MAXPLANCKFORSCHUNG wird auf Papier aus vorbildlicher Forstwirtschaft gedruckt und trägt das Siegel des Forest Stewardship Council (FSC)



# „NA, DÄMMERT'S IHNEN?“

Alles zum Thema Wärme-Isolierung für Ihr Zuhause und viele weitere Infos jetzt auf [www.energiwelt.de](http://www.energiwelt.de)



VORWEG GEHEN  
BME