



ERDE 3.0

# Spektrum

DER WISSENSCHAFT

KLIMASCHUTZ  
Lässt sich CO<sub>2</sub> aus  
der Atmosphäre  
auswaschen?

JANUAR 2011

Spektrum  
DER WISSENSCHAFT

1/11

MIKROBIOLOGIE

Bakterien bekämpfen –  
mit ihren eigenen Waffen

NANOBILDER

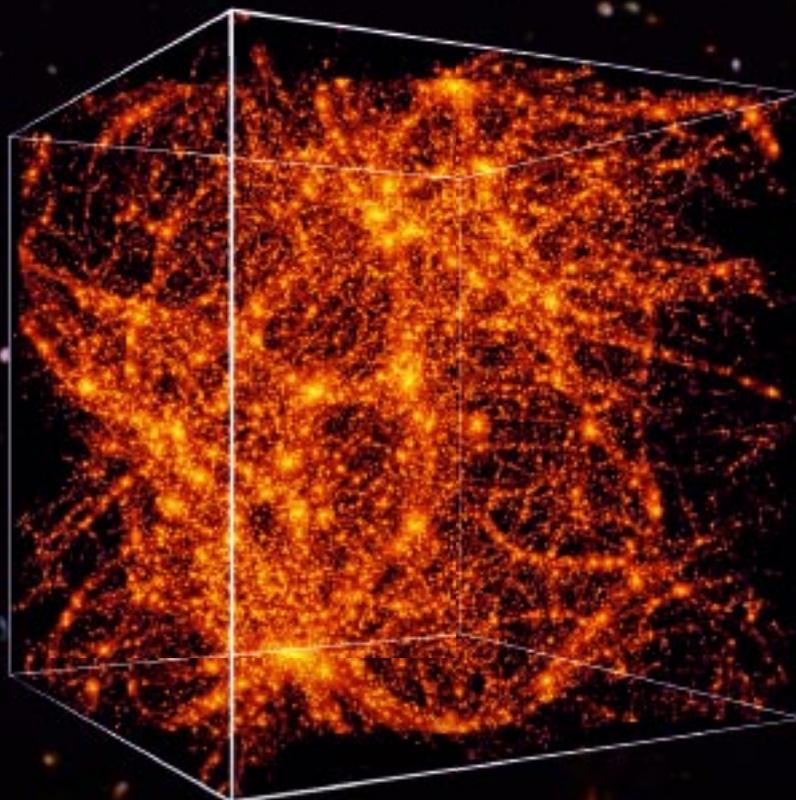
Erstmals lassen sich Vorgänge  
auf Molekülebene filmen

STREITGESPRÄCH

Bringt die Genomforschung  
die personalisierte Medizin?

## Der verborgene Bauplan des Kosmos

Besteht die Dunkle Materie aus Super-WIMPs?



7,90 € (D/A) · 8,50 € (L) · 14,- sFr.  
D6179E







Reinhard Breuer  
breuer@spektrum.com



Carsten Könneker  
Chefredakteur  
koenneker@spektrum.com

## Zwischen Paralleluniversen

Zu den Formen des Glücks zählte Aristoteles einst das Leben als Forscher und Philosoph. Das notierte ich an dieser Stelle im November 1998 anlässlich meines ersten Editorials in »Spektrum«. Natürlich wollen auch wir Wissenschaftsjournalisten ein wenig an diesem Glück teilhaben. Weil es Vergnügen bereitet, »jenes aristotelische Glücksgefühl zu vermitteln, das wir empfinden, wenn wir die Welt begreifen«. Außerdem haben die Aufgaben für Wissenschaftsjournalisten in den letzten Jahren an Komplexität und Spannung zugenommen.

Da ist einmal die Selbstzersplitterung der Wissenschaft. Als Folge der wachsenden Spezialisierung lässt sie die Reichweite der Kommunikation sowohl zwischen Forschern schrumpfen als auch zwischen ihnen und der Öffentlichkeit. Zugleich aber hat die Geschwindigkeit, mit der Wissenschaftler ihre Ergebnisse der Welt kundtun, rasant zugenommen – kleine und kleinste Sensationen werden per Internet gnadenlos fast instantan hinausposaunt. Das Wettrennen um Beachtung fördert einen weiteren fatalen Trend: die Neigung zur Ankündigung und zur Übertreibung. In diesem Getümmel das Gehaltvolle vom Aufgeblasenen zu scheiden, halte ich für die Aufgabe des Wissenschaftsjournalismus im Allgemeinen und von »Spektrum« im Besonderen.

Hinter unserem Magazin steht aber noch etwas anderes, für mich ganz Entscheidendes: ein Team, das jeden Monat versucht, das nächste Heft zum besten unter allen bisherigen zu machen. In den zwölf Jahren, die ich als Chefredakteur fungierte, habe ich viele Freunde gefunden, mit denen zusammen es stets eine große Freude war, die bisweilen exotischen Themen – zwischen Paralleluniversen und Quantenverschränkung – verständlich und spannend aufzubereiten. Dass auch Sie als Leser weiterhin das Glück verspüren, das wir bei unserer Arbeit immer wieder empfinden, obliegt nun meinem Nachfolger und Freund Carsten Könneker, der Sie künftig an dieser Stelle begrüßen wird. Ich bin davon überzeugt, dass er »Spektrum« in diese Richtung fortführen wird.

Herzlich Ihr

Reinhard Breuer

## Relevanz-Radar

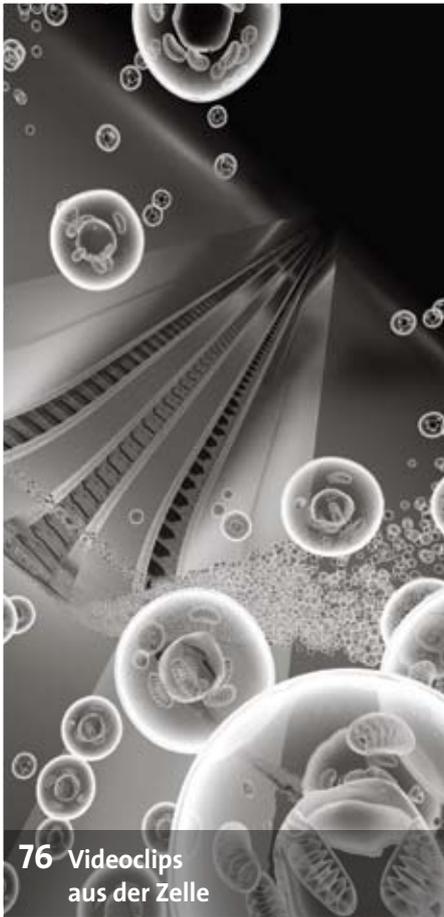
Keine Zeit vor uns war stärker geprägt von dem, was Wissenschaftler erforschen und entwickeln. Gleichzeitig war es nie zuvor so schwierig, die Übersicht zu behalten – immerhin erscheinen jährlich mehr als eine Million Artikel in den einschlägigen Fachjournalen. Ebendiese Orientierung leistet »Spektrum der Wissenschaft«: Wir recherchieren für Sie jene Neuerungen, die über die einzelnen Fachgebiete und den Tag hinaus bedeutsam sind – sei es, weil sie unseren Blick auf die Welt verändern oder unser Leben und unsere Gesellschaft. Hierfür haben wir Redakteure jährlich mehrere zehntausend Artikel aus den wichtigsten internationalen Fachzeitschriften auf dem Radarschirm, prüfen und diskutieren, welche Forschungsergebnisse wir tagesaktuell online oder in großen Hintergrundartikeln im Heft behandeln. Dazu laden wir die jeweils führenden Forscherinnen und Forscher als Autoren ein. Wo es um Kontroversen oder ethisch brisante Fragen geht, bitten wir zum Streitgespräch; so diskutieren in diesem Heft der Genetiker Hans Lehrach und der Philosoph Urban Wiesing über die Zukunft der individualisierten Medizin (S. 60).

In den vergangenen Monaten hat sich die Redaktion auf eine Reise begeben. Das Ziel bestand darin, die Stärken von »Spektrum« als dem deutschen Wissenschaftsmagazin noch klarer herauszuarbeiten. Wir haben mit Leserinnen und Lesern gesprochen, Umfragen durchgeführt, Inhalte auf den Prüfstand gestellt. Unser Artdirector Karsten Kramarczik entwickelte ein Layout, welches die Stärke des Mediums Zeitschrift neu zum Glänzen bringt: ein unaufgeregtes, tiefes Eindringen in die jeweiligen Themen.

In unserer Zeit des Überflusses an Wissen und Halbwissen soll »Spektrum« mehr noch als in den vergangenen 32 Jahren eine verlässliche Quelle für Sie sein. Relevanz, Orientierung, Zusammenhänge – das ist unser redaktionelles Versprechen. Ich würde mich freuen, wenn Sie uns dafür monatlich neu beim Wort nehmen, so wie bislang unter der Chefredaktion meines Freundes und Kollegen Reinhard Breuer, dem ich im Namen des gesamten Teams für seine Arbeit danke!

Herzlich Ihr

Carsten Könneker



**76** Videoclips aus der Zelle



**60** Streitgespräch: Personalisierte Medizin



**30** Die Herkunft der modernen Vögel



**22** Neue Strategien gegen Bakterien

BIOLOGIE & MEDIZIN

PHYSIK & ASTRONOMIE

MENSCH & KULTUR

► **22 Die gefährlichen Tricks der Bakterien**  
*B. Brett Finley*  
 Krankheitserregende Bakterien haben viele gewiefte Strategien in ihrem Repertoire. Nun möchten Mediziner sie mit ihren eigenen Waffen schlagen

**30 Zeitgenossen der Dinosaurier**  
*Gareth Dyke*  
 Als vor 65 Millionen Jahren die Reptilienriesen untergingen, war nicht nur *Archaeopteryx* längst entstanden. Auch moderne Vögel hatten sich bereits entwickelt

**TITELTHEMA**  
 ► **38 Der verborgene Bauplan des Kosmos**  
*Jonathan Feng, Mark Trodden*  
 Das All birgt riesige Mengen einer unbekanntem Substanz, die sich nur durch ihre Schwerkraft verrät. Besteht sie aus Super-WIMPs?

SCHLICHTING!  
**48 Das Heiz-Paradoxon**  
*H. Joachim Schlichting*  
 Warum wird ein Zimmer durch Heizen wärmer? Etwa, weil wir die Energie der Raumluft erhöhen? Mitnichten!

**50 Lichtpulse auf Rekordjagd**  
*Todd Ditmire*  
 Die Geschichte des Lasers ist eine Geschichte der großen Durchbrüche. Nun stehen wieder neue Rekorde bevor

STREITGESPRÄCH  
 ► **60 Der modellierte Patient**  
 Genomforscher schicken sich an, die Ära der personalisierten Medizin einzuläuten – mit welchen Folgen? Eine Diskussion zwischen dem Ethiker Urban Wiesing und dem Molekularbiologen Hans Lehrach

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN  
**66 Unendliche regelmäßige Körper**  
*Christoph Pöppe*  
 Kann es ein geometrisches Gebilde geben, bei dem sich in jeder Ecke genau sieben gleichseitige Dreiecke treffen? Im Prinzip ja – es erstreckt sich allerdings durch den ganzen Raum

38

TITELTHEMA

# Der verborgene Bauplan des Kosmos

## ERDE & UMWELT



- **70 Große Wäsche für das Klima**  
*Klaus S. Lackner*  
Noch ist es nur ein Konzept, und es gibt erst Laborprototypen, doch schon in wenigen Jahren könnten spezielle »Waschmaschinen« das Treibhausgas Kohlendioxid aus der Atmosphäre filtern – und so der globalen Erwärmung entgegenwirken

*Titelmotiv: Computersimulation von Anatoly Klypin, New Mexico State University, und Andrey Kravtsov, University of Chicago, erarbeitet am National Center for Supercomputing Applications (NCSA) in Urbana-Champaign, USA (Würfel); NASA/ESA, STScI (Hintergrund)*

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ► gekennzeichnet

## TECHNIK & COMPUTER

- **76 Bewegte Bilder aus der Nanowelt**  
*Ahmed H. Zewail*  
Ultrakurze Elektronenpulse gewähren Einblicke in extrem schnelle Vorgänge auf der Ebene von Molekülen
- 86 Die kleinsten Bits der Welt**  
*Rainer Waser, Eike Linn, Regina Dittmann, Kristof Szot*  
Memristoren sind elektrische Widerstände mit Gedächtnis. Sie sollen Datenspeicher noch schneller machen und den Energiehunger von Computern drosseln

## SPEKTROGRAMM

- 8 Fangnetz für Mikroben** • Ältester Dinosaurier-Embryo rekonstruiert • Optischer Trick tarnt kurze Ereignisse • Bunte Planeten mit rauer Vergangenheit • Schleimschutz gegen nächtliche Blutsauger • Bakterien erinnern sich an besiegte Feinde

## BILD DES MONATS

- 11 Farbige Frontale**

## FORSCHUNG AKTUELL

- 12 Riesiges Quantenobjekt – völlig schwerelos**  
Bose-Einstein-Kondensat mehr als eine Sekunde lang im Fallturm beobachtet
- 14 Nova produziert Gammastrahlung**  
Überraschende Entdeckung des Satelliten Fermi
- 16 Bewusstsein für Lernen unnötig**  
Jede Gedächtnisform kann sich bewusst und unbewusst manifestieren
- 18 Zweischneidige Killerwaffe**  
Bakterien und Immunzellen nutzen denselben »Locher« – nur andersherum
- 20 Springers Einwürfe**  
Lesen – eine Last fürs Hirn

## WEITERE RUBRIKEN

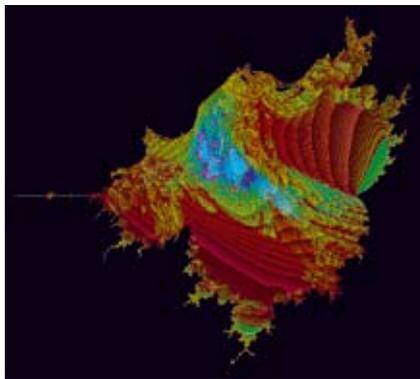
- 3** Editorial
- 6** Leserbrief/Impressum
- 98** Rezensionen  
*Klaus Hübner:*  
Gustav Robert Kirchhoff  
*Bruno P. Kremer:*  
Essbare & giftige Wildpflanzen  
*politische ökologie:*  
Geo-Engineering  
*Bernhard Weingartner:*  
Physik macht Urlaub u. a.
- 104** Im Rückblick  
Vom Lob der Brille bis zur Geburtsstunde der Bionik
- 106** Vorschau

## Fraktales Birnenweibchen

Christoph Pöppe beschrieb den Formenreichtum der Mandelbrot-Mengen in 3-D. (»Mandelbrot dreidimensional«, April 2010, S. 56)

**Eva Baumgartner, per E-Mail:** Dieser anregende Beitrag verursachte mir schlaflose Nächte! Die Arbeit an meinem eigenen 3-D-Fraktal hat mir aber große Freude bereitet.

Auf <http://members.aon.at/evab> finden Sie dieses und weitere Bilder sowie ein Java-Applet namens »zoomcut« zum Vergrößern und Durchschneiden der dreidimensionalen virtuellen Struk-



»Birnenweibchen«, Computergrafik von Eva Baumgartner

turen. Räumliche Tiefe wird durch abnehmende Farbsättigung dargestellt. Die dunklen Schattierungen sind Tiefenschichtenlinien und sollen die Struktur besser sichtbar machen.

Zur Berechnung verwende ich die Iterationsfunktion  $z^2+c$  mit der gewöhnlichen Addition und einer speziellen Multiplikation, die kommutativ, aber nicht assoziativ ist und für die es ein inverses Element gibt. Der dreidimensionale Raum hat eine reelle und zwei imaginäre Achsen. Nennen wir den reellen Einheitsvektor  $e$  und die beiden imaginären Einheitsvektoren  $i$  und  $j$ , so lauten die Multiplikationsregeln für Punkte in diesem Raum (»perplexe Zahlen«):  $ei = ie = ej = je = 1$ ;  $i^2 = -j$ ;  $j^2 = -i$ ;  $ij = ji = -1$ .

## Angreifbare Theorie

Laut dem Archäologen Curtis W. Marean stand Homo sapiens vor mehr als 120 000 Jahren kurz vor der Ausrottung. Nur wenige Menschen überlebten damals an der Südküste Afrikas. (»Als die Menschen fast ausstarben«, Dezember 2010, S. 58)

**Tobias Kersten, Ludwigsburg:** Afrika ist ein riesiger Kontinent mit über 30 Millionen Quadratkilometer Fläche,

### BRIEFE AN DIE REDAKTION

... sind willkommen! Schreiben Sie uns auf [www.spektrum.de/leserbrieft](http://www.spektrum.de/leserbrieft) oder schreiben Sie mit Ihrer kompletten Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft  
Leserbrieft  
Sigrid Spies  
Postfach 104840  
69038 Heidelberg  
E-Mail: [leserbrieft@spektrum.com](mailto:leserbrieft@spektrum.com)

Die vollständigen Leserbrieft finden Sie ebenfalls unter [www.spektrum.de/leserbrieft](http://www.spektrum.de/leserbrieft)

und es gab auch schon vorher (und später) teilweise ausgedehnte Eis- oder Kaltzeiten. Es ist für mich kaum nachvollziehbar, dass ausgerechnet diese eine die Menschheit fast ausgerottet haben soll.

Wenn das afrikanische Klima dermaßen extrem geworden sein soll, dass der Kontinent kaum noch in der Lage war, ein paar tausend Frühmenschen zu ernähren, muss es auch bei den anderen Eiszeiten Hinweise auf ein massives Aussterben vieler großer Tiere gegeben haben. Das Gebiet in Südafrika kann auf Grund der beschriebenen idealen Lebensbedingungen auch unabhängig von einer »Klimakatastrophe« besiedelt gewesen sein.

## Spektrum

DER WISSENSCHAFT

**Chefredakteur:** Dr. Carsten Könneker (v.i.S.d.P.)  
**Redaktionsleiter:** Dr. Hartwig Hanser (Monatshefte), Dr. Gerhard Trageser (Sonderhefte)  
**Redaktion:** Thilo Körkel (Online-Koordinator), Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Jan Osterkamp (Spektrumprogramm), Dr. Christoph Pöppe, Dr. Adelheid Stahnke  
E-Mail: [redaktion@spektrum.com](mailto:redaktion@spektrum.com)  
**Ständiger Mitarbeiter:** Dr. Michael Springer  
**Entwicklungsredaktion:** Dr. Reinhard Breuer (Ltg.)  
**Art Direction:** Karsten Kramarczik  
**Layout:** Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Anke Heinzlmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer  
**Schlussredaktion:** Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle  
**Bildredaktion:** Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe  
**Redaktionsassistent:** Britta Feuerstein, Petra Mers  
**Redaktionsanschrift:** Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729  
**Verlag:** Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3-5, 69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751; Amtsgericht Mannheim, HRB 33814  
**Verlagsleiter:** Richard Zinken  
**Geschäftsleitung:** Markus Bossle, Thomas Bleck  
**Herstellung:** Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733  
**Marketing:** Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: [service@spektrum.com](mailto:service@spektrum.com)  
**Einzelverkauf:** Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744  
**Übersetzer:** An diesem Heft wirkten mit: Dr. Thomas Brückner, Dr. Markus Fischer, Dr. Werner Gans, Christian Hammer, Dr. Michael Springer.  
**Leser- und Bestellservice:** Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ute Park, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: [service@spektrum.com](mailto:service@spektrum.com)

### Vertrieb und Abonnementverwaltung:

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: [spektrum@zenit-presse.de](mailto:spektrum@zenit-presse.de), Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn  
**Bezugspreise:** Einzelheft € 7,90 (D/A) / € 8,50 (L/Sfr. 14,-); im Abonnement € 84,00 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 69,90. Die Preise beinhalten € 8,40 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 8,40 Portomehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70). Die Mitglieder des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBio) und von Mensa e.V. erhalten 5dW zum Vorzugspreis.  
**Anzeigen:** iq media marketing gmbh, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH, Bereichsleitung Anzeigen: Marianne Dölz; Anzeigenleitung: Katrin Kanzok, Tel. 0211 887-2483, Fax 0211 887 97-2483; verantwortlich für Anzeigen: Ute Wellmann, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2481, Fax 0211 887-2686  
**Anzeigenvertretung:** Hamburg: Matthias Meißner, Brandstwierte 1, 6. OG, 20457 Hamburg, Tel. 040 30183-210, Fax 040 30183-283; Düsseldorf: Ursula Haslauer, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2053, Fax 0211 887-2099; Frankfurt: Thomas Wolter, Eschersheimer Landstraße 50, 60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 2424-4507, Fax 069 2424-4555; München: Jörg Bönsch, Nymphenburger Straße 14, 80335 München, Tel. 089 545907-18, Fax 089 545907-24; Kundenbetreuung Branchenteams: Tel. 0211 887-3355, [branchenteams@iqm.de](mailto:branchenteams@iqm.de)  
**Druckunterlagen an:** iq media marketing gmbh, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686  
**Anzeigenpreise:** Gültig ist die Preisliste Nr. 32 vom 01.01. 2011.  
**Gesamtherstellung:** L.N. Schaffrath Druckmedien GmbH & Co. KG, Marktweg 42-50, 47608 Geldern

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2011 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.

Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechtsinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbrieft zu kürzen.

ISSN 0170-2971

### SCIENTIFIC AMERICAN

75 Varick Street, New York, NY 10013-1017  
Editor in Chief: Mariette DiChristina, President: Steven Inchocombe, Vice President, Operations and Administration: Frances Newburg, Vice President, Finance, and Business Development: Michael Florek, Managing Director, Consumer Marketing: Christian Dorbandt, Vice President and Publisher: Bruce Brandfon



Erhältlich im Zeitschriften- und Bahnhofsbuchhandel und beim Pressefachhändler mit diesem Zeichen.





IMMUNOLOGIE

## Fangnetz für Mikroben

Neutrophile Granulozyten sind zwar der häufigste Typ weißer Blutkörperchen, aber sie leben nur etwa sechs Stunden. Bei ihrem Tod setzen sie als *neutrophil extracellular trap* (NET) bezeichnete Netze aus DNA frei. Diese sind mit Bakterien tötenden

Proteinen gespickt und vernichten krank machende Keime. Wissenschaftler um Arturo Zychlinski vom Max-Planck-Institut für Infektionsbiologie in Berlin haben jetzt entschlüsselt, wie das eigentlich fest im Zellkern als Chromatin verpackte Erbgut zur weit aufgespannten Mikrobenfalle wird.

Der Abwehrmechanismus folgt einer speziellen Variante des kontrollierten Zelltods, bei der sich der Granulozyt von innen heraus selbst auflöst. Dabei zersetzt sich zuerst die Hülle des Zellkerns. Die ursprünglich kompakte Chromatin-DNA faltet sich zu einem lockeren Netz auseinander, das antibakterielle Proteine aus dem Zellplasma und den Granula – den namens-

gebenden Einlagerungen der Granulozyten – bindet. Dann erst zerfällt die Zelle und setzt die Mikrobenfalle frei.

Wie die Forscher herausfanden, sind die Granula auch die Urheber der ganzen Reaktion. Sie setzen schon zu Beginn des Vorgangs die beiden Enzyme Neutrophil-Elastase und Myeloperoxidase frei, die das Netz entstehen lassen. Im ersten Schritt greift Neutrophil-Elastase die Histone an – jene Proteine, um die sich die DNA im Zellkern wickelt, so dass sich das eng gepackte Chromatin bilden kann.

Sind diese Eiweißstoffe zerstört, fällt der dichte Chromatinkomplex auseinander. Dafür, dass sich die DNA vollständig entfaltet, sorgt dann die Myeloperoxidase – auf bislang unbekannt Weise. Das Ergebnis ist ein weit aufgespanntes Netz, das vielen Schadorganismen vom Bakterium bis zum Schimmelpilz zum Verhängnis wird.

*J. Cell Biol.* 191, S. 677–691, 2010



VOIKER BRINKMANN UND ABDUL HAKIM, AUS: V. PARVANNOPOLIOS ET AL., JCB VOL. 191, S. 677–691, 2010

Das elektronenmikroskopische Bild einer Mäuselunge zeigt ein *Klebsiella*-Bakterium, das sich in einem von neutrophilen Granulozyten ausgeworfenen Fangnetz verheddert hat.

PALÄONTOLOGIE

## Ältester Dinosaurier-Embryo rekonstruiert

Ein kleiner *Massospondylus* erblickte nie das Licht der Welt und wird dennoch unsterblich – zumindest für die Wissenschaft: Vor 190 Millionen Jahren, im frühen Jura, war der Dinosaurier aus der Familie der weit verbreiteten Prosauropoden kurz vor dem Schlüpfen gewesen. Doch die Eier versteinerten und überdauerten unter der Erdoberfläche, bis sie 1976 in Südafrika entdeckt wurden.

Der 20 Zentimeter große Fötus ist der älteste je gefundene Embryo eines Landwirbeltiers. Hochleistungsmikroskope erlaubten Robert Reisz von der University of Toronto (Kanada) nun eine detaillierte Rekonstruktion des versteinerten Skeletts. Sie offenbart relativ lange Vordergliedmaßen und einen überproportional großen Kopf

des kleinen Dinosauriers. Ganz anders sahen die erwachsenen Tiere mit ihren langen Halsen, kurzen Vorderbeinen und verhältnismäßig mickrigen Köpfen aus. Diese Unterschiede verraten den Wissenschaftlern, dass Nacken und Hinterläufe schneller wuchsen als der

Rest des Körpers und die typischen Proportionen erst nach und nach entstanden. Möglicherweise benötigten die ungelinkten Jungdinosaurier daher gerade am Beginn ihres Lebens intensive elterliche Fürsorge.

*J. Vert. Paleontol.* 30, S. 1653–1665, 2010

Die Rekonstruktion des ungeschlüpfen Prosauropoden basiert auf 190 Millionen Jahren alten Skelettfunden aus Südafrika.



ILLUSTRATION LINKS: HEIDI RICHTER, U. TORONTO; FOTO RECHTS: DANIE SCOTT, U. TORONTO AT MISSISSAUGA (UTM)

## PHYSIK

## Optischer Trick tarnt kurze Ereignisse

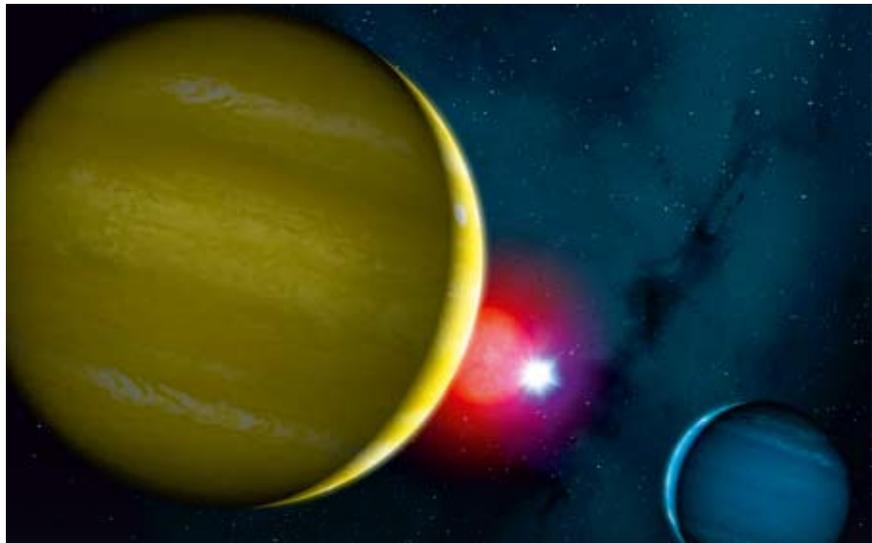
Wissenschaftler um Martin McCall vom Imperial College in London haben eine Möglichkeit gefunden, kurze Ereignisse für äußere Beobachter unsichtbar zu machen. Sie berechneten auf der Basis grundlegender optischer Prinzipien, dass ein geeigneter Aufbau eine räumliche und zeitliche Lücke in einem kontinuierlichen elektromagnetischen Wellenzug öffnen und anschließend wieder schließen kann – ohne dabei Spuren zu hinterlassen.

Dazu benötigt man nichtlineare optische Materialien, die ihren Brechungsindex – und damit die Geschwindigkeit, mit der sich Licht in ihnen fortpflanzt – als Reaktion auf elektrische und magnetische Felder verändern. Wie die Forscher zeigten, kann man mit einer geeigneten Anordnung solcher Materialien den vorderen Teil eines Wellenzugs kurzfristig beschleunigen und den hinteren verlangsamen.

Dadurch öffnet sich für einen kurzen Zeitraum eine Lücke, das so genannte Null. Nach dieser Zeit wird das hintere Ende des Wellenzugs beschleunigt und der vordere Bereich gebremst, so dass bei einem hinreichend weit entfernten Beobachter der ursprüngliche geschlossene Wellenzug ankommt.

Was in der Lücke zwischen den beiden Teilen des Wellenzugs geschieht, kann mit dem Licht nicht interagieren und ist, sofern es nicht selbst Licht erzeugt, für den Beobachter unsichtbar. Prinzipiell sei es möglich, ein solches Gerät mit heute schon vorhandenen Materialien zu konstruieren. Auf diese Weise, schreiben die Forscher, könne man so einen Materie-Transporter simulieren, bei dem ein Gegenstand an einem Ort verschwindet und sofort an einem anderen Ort wieder auftaucht.

*J. Opt. 13, S. 024003, 2010*



Um den Doppelstern NN Serpentis kreisen zwei Gasriesen. Mit etwas Vorstellungskraft ergibt sich daraus wie in dieser Illustration ein buntes Bild aus weißer und roter Zwergsonne mit blauem und gelbem Begleiter.

## ASTRONOMIE

## Bunte Planeten mit rauer Vergangenheit

Immer präzisere Messungen vermitteln Astronomen zunehmend detaillierte Vorstellungen ferner Welten. Zum Beispiel von NN Serpentis, einem rund 1670 Lichtjahre entfernten Doppelstern im Sternbild Schlange: Hier kreisen zwei Gasriesen um einen größeren roten und einen kleineren weißen Zwergstern – die sich ihrerseits alle gut drei Stunden umrunden.

Insgesamt herrscht in diesem Exoplanetensystem also ein komplexes Gezerre gegenseitiger Anziehung zwischen den Himmelskörpern. Ihre entsprechend komplizierten Bahnen konnten Forscher nur mit enormem Beobachtungsaufwand und mit Hilfe eines glücklichen Zufalls aufklären: Von der Erde aus sehen wir genau auf die Zentralebene des Sternpaares, so dass die beiden sich regelmäßig gegenseitig verdecken. Das daraus resultierende Flackern des Doppelsterns wird seit Jahrzehnten aufgezeichnet; nun hat ein internationales Astronomenteam um Tom Marsh

von der britischen University of Warwick die Daten ausgewertet und aus regelmäßigen Musterabweichungen auf die Existenz der beiden Gasriesen geschlossen.

Für Sternfreunde mit Fantasie entsteht aus den Messdaten ein farbenfrohes Bild: Beide Planeten könnten blau-rot wie unser Jupiter oder gelb-orange wie Saturn leuchten, dabei sind sie schätzungsweise annähernd so groß wie die rote Sonne im Zentrum. Vor rund einer Million Jahren lagen die Größenverhältnisse noch ganz anders. Denn damals war der Weiße Zwerg ein aufgeblähter Rote Riese, der den zweiten Stern wohl erst geschluckt und dann in den heutigen engen Orbit gezerzt hat. Dieses Manöver ging mit gehörigem Masseaustausch zwischen den Sonnen einher, spekulieren die Forscher, und sorgte nebenbei für genug verstreutes Baumaterial, aus dem dann die beiden Planeten entstehen konnten.

*A. & A. 10.1051/0004-6361/201015472, 2010*

ZOOLOGIE

## Schleimschutz gegen nchtliche Blutsauger

Manche Korallenfische verbringen ihre Nchte in einem charakteristischen, von ihnen selbst abgesonderten Schleimkokon. Taucher und Meeresbiologen haben das meist schlicht zur Kenntnis genommen, ohne sich fr seinen Zweck zu interessieren. Nicht so Alexandra Grutter von der University of Queensland in Brisbane (Australien): Ihre Experimente zeigen, dass die aus Schleimfden bestehende Hulle lstige Blutsauger fernhlt. Dies soll den Fischen eine ungestrte Nachtruhe beschern.

Grutters Team untersuchte hierfr mehrere Kugelkopf-Papageifische (*Chlorurus sordidus*) in Aquarien. Bei

der Hlfte der Tiere entfernten sie nachts heimlich den Schleimkokon; dann setzten sie zu allen Fischen Blut saugende Meeresasseln (Gnathiidae), die in deren Lebensraum hufg vorkommen. Tatschlich attackierten die Blutsauger weitaus hufger Fische ohne Schleimkokon.

Die allabendliche Produktion des Schleimnetzes verschlingt rund 2,5 Prozent der tglich verbrauchten Energie, errechnete Grutter. Das lohnt sich fr den Fisch nur, wenn ein entsprechend groer Nutzen dabei herauspringt. Die Asselabwehr drfte die Kraftanstrengung wert sein: Whrend tagsber Putzerfische die Parasi-



ALEXANDRA GRUTTER, UNIVERSITÄT QUEENSLAND

Ein schlafender Kugelkopf-Papageifisch (*Chlorurus sordidus*) in seinem schleimigen Kokon. Der Zweck dieser Hulle war bisher unklar. Offenbar hlt er den Fischen Blut saugende Asseln von den Schuppen.

ten bekmpfen, wren ihnen die schlafenden Papageiefische ohne ihr schleimiges Schutznetz nachts wehrlos ausgeliefert.

*Biol. Lett.* 10.1098/rsbl.0916, 2010

MIKROBIOLOGIE

## Bakterien erinnern sich an besiegte Feinde

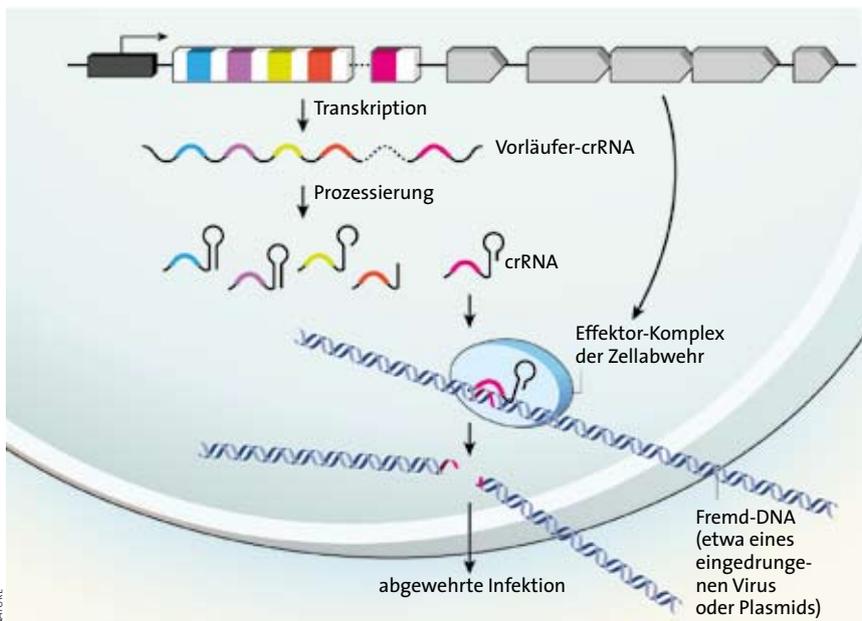
Bakterien haben einen eleganten Weg gefunden, sich gegen Viren oder schdliche Plasmid-Fremdgene zu verteidigen. Dabei erkennt eine kurze RNA fremde DNA-Sequenzen und markiert sie fr eine Zerstörung durch Schnittenzyme, beschreibt ein Team um Sylvain Moineau von der Universit

Laval in Quebec (Kanada). Die Forscher haben den Mechanismus bei *Streptococcus*-Bakterien genauer untersucht. Das Erbgut der Bakterien enthlt Abschnitte fremder DNA, die zuvor als schdlich erkannt und neutralisiert wurde – quasi das Gegenstck zum immunologischen Gedchtnis bei

Tieren. Aus diesen genetischen Blaupausen entstehen dann Kopien, so genannte crRNAs, welche die ursprngliche Fremd-DNA erkennen knnen. Die crRNAs patrouillieren stndig durch die Zelle. Stoßen sie dabei auf ihre schdliche Zielsequenz – also etwa auf die DNA eines Virus –, heften sie sich daran. Dies alarmiert die Zellabwehr, welche die eingedrungene DNA zerhackt.

Die Forscher hoffen nun, das Immungedchtnis von Bakterien gezielt manipulieren zu knnen. So ließe sich eine unerwünschte Ausbreitung von Antibiotikaresistenzen verhindern, wenn Bakterien resistenzbertragende Plasmide als feindlich erkennen und zerstören wrden.

*Nature* 468, S. 67–71, 2010



NATURE

Bestimmte DNA-Sequenzen, die von frheren Attacken auf das Bakterium oder seine Ahnen stammen, kodieren fr crRNAs. Diese binden an eingedrungene Fremdgene von Viren oder Plasmiden und bilden einen Effektor-Komplex mit Schnittenzymen.



## FARBIGE FRONTALE

Auf dieser Frontalaufnahme präsentiert sich ein häufiger Kellerbewohner ungewohnt farbenprächtig: der Weberknecht *Phalangium opilio*. Sein Kopf, die beiden seitlich platzierten Linsen der Augen und die angrenzenden Netzhäute und Sehnerven treten dabei in einer konfokalmikroskopischen Projektion plastisch hervor, die aus einem Stapel mehrerer Einzelbilder zusammengestellt wurde. Die verschiedenen Farben kennzeichnen dabei die Tiefen der einzelnen Schichten. Igor Siwanowicz vom Max-Planck-Institut für Neurobiologie aus München erzielte mit seiner Aufnahme den ersten Platz beim Olympus BioScapes Digital Imaging Competition, der jedes Jahr herausragende Mikroskopiebilder auszeichnet.

# Riesiges Quantenobjekt – völlig schwerelos

Mit einer speziellen Apparatur gelang es Physikern, ein Bose-Einstein-Kondensat mehr als eine Sekunde lang im schwerelosen Zustand zu beobachten. In dieser Zeit dehnte es sich auf zwei Millimeter Länge aus – eine für Quantenobjekte gigantische Größe.

VON CLAUD LÄMMERZAHN, HAUKE MÜNTINGA UND REINHOLD WALSER

Die meisten Alltagsphänomene gehorchen der klassischen newtonschen Physik. Im submikroskopischen Bereich der Elementarteilchen gelten dagegen die teils paradox wirkenden Gesetze der Quantenmechanik. Besonders interessant für Physiker ist die Schnittstelle zwischen den beiden Domänen. In diesen Übergangsbereich fällt beispielsweise die Bose-Einstein-Kondensation atomarer Gase. In den 1920er Jahren von Albert Einstein (1879–1955) und Satyendranath Bose (1894–1974) vorhergesagt, wurde sie 1995 zum ersten Mal im Labor realisiert. Dabei besetzen bis zu einige Millionen Atome gemeinsam den tiefsten Energiezustand.

Infolgedessen verlieren sie ihre Individualität und lassen sich durch eine einzige kollektive Wellenfunktion beschreiben. Eine solche Materiewelle, die makroskopische Ausdehnungen erreichen kann, eignet sich für hochpräzise interferometrische Messungen – sowohl in der Grundlagenforschung als auch bei praktischen Anwendungen wie der Geodäsie oder der Weltraumnavigation.

Um ein Bose-Einstein-Kondensat zu erzeugen, fangen Physiker neutrale Atome in einem Ultrahochvakuum berührungsfrei in optischen Dipol- oder Magnetfallen ein und kühlen sie bis auf wenige milliardstel Kelvin (Temperatur über dem absoluten Nullpunkt bei  $-273,15$  Grad Celsius) ab. Dabei gehen die Teilchen in den erwähnten kollektiven Quantenzustand über. Nach dem Abstellen der Falle kann man ihr Verhalten beobachten. Ein klassisches Gas würde sich unter diesen Umständen gleichmäßig nach allen Seiten ausdehnen –

nicht so das Bose-Einstein-Kondensat. Es merkt sich gleichsam die Form der meist asymmetrischen Falle und breitet sich am schnellsten in die Richtung aus, in der es am stärksten eingeeignet war.

Da die Atomwolke in einem gewöhnlichen Labor der Erdanziehung unterliegt, sind solche Beobachtungen jedoch durch die Größe der Vakuumkammer auf einige hundertstel Sekunden beschränkt. Anders wäre es in der Schwerelosigkeit. Dann fiel das Kondensat nicht mehr zu Boden, sondern ließe sich während der freien Expansion relativ lange beobachten. Auch bei den erwähnten Materiewelleninterferometern wäre eine möglichst lange Flugzeit der Atomwolke in dem Gerät erwünscht, da die Genauigkeit der Messung vom Quadrat dieser Zeit abhängt. Einer der wenigen Orte auf der Erde, an denen sich zumindest für mehrere Sekunden Schwerelosigkeit herstellen lässt, ist der 146 Meter hohe Fallturm am Zentrum für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation (ZARM) in Bremen.

Im Rahmen des vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt DLR finanzierten Projekts QUANTUS haben unter Leitung von Ernst Rasel vom Institut für Quantenoptik der Universität Hannover Wissenschaftler verschiedener Forschungseinrichtungen eine Apparatur entwickelt, die sich für Experimente mit Bose-Einstein-Kondensaten in diesem Turm eignet. Sie ist rund zwei Meter hoch, hat einen Durchmesser von 81 Zentimetern und wiegt nur 234 Kilogramm. Auf einem Raum von knapp ei-



Alle Instrumente zum Erzeugen des Bose-Einstein-Kondensats sind in einer nur zwei Meter hohen und 81 Zentimeter breiten Fallkapsel untergebracht. Hauke Müntinga aus der Arbeitsgruppe von Claus Lämmerzahl führt hier gerade Arbeiten an der Hochvakuumpumpe durch. Eine Ebene tiefer ist die Vakuumkammer zu sehen, in der das Kondensat entsteht. Auf den Ebenen über der Pumpe befinden sich die Laser, optische Bänke und die Lasersteuerungselektronik. Ganz unten sind weitere Steuerungselektronik sowie die Energieversorgung verstaubt.

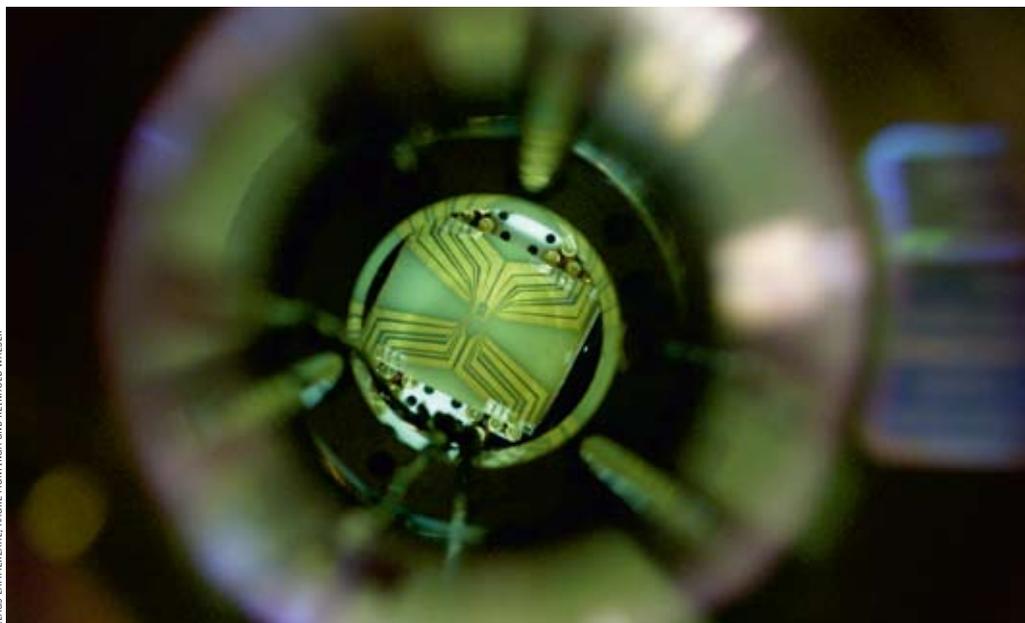
Auf dem Atomchip, in dem das Bose-Einstein-Kondensat entsteht, sind Leiterbahnen aus Gold angebracht. Schon bei geringem Stromfluss erzeugen sie ein stark inhomogenes Magnetfeld, in dem sich gasförmige Atome einschließen lassen. Die Oberfläche des Chips ist mit einer Beschichtung versehen, die ihn bei den verwendeten Laserwellenlängen als Spiegel für die magnetooptische Falle wirken lässt, in der die Atome zunächst gefangen sind.

nem halben Kubikmeter beherbergt sie somit eine Ausrüstung, die sonst ein komplettes Labor einnimmt. Dazu gehören eine Vakuumkammer inklusive Vakuumpumpen, ein Lasersystem mit Elektronik zur Frequenzstabilisierung, Spulen zur Erzeugung der notwendigen Magnetfelder, ein Steuerrechner und die komplette Stromversorgung.

Beim Auftreffen am Boden taucht die Fallkapsel mit einer Geschwindigkeit von etwa 170 Kilometer pro Stunde in einen mit Polystyrolkügelchen gefüllten Behälter ein und wird dabei mit bis zu 50-facher Erdbeschleunigung abgebremst. Damit das Lasersystem dieser extremen mechanischen Belastung standhält, wurde es in Modulbauweise aus selbst entwickelten, miniaturisierten optischen Komponenten zusammengesetzt.

### Extreme Magnetfeldgradienten

Kernstück der Apparatur ist ein so genannter Atomchip mit Leiterbahnstrukturen aus Gold in einer bestimmten Anordnung. In ihrer Nähe lassen sich mit relativ niedrigen Strömen extrem hohe Magnetfeldgradienten erzeugen, wie sie zum Einschließen und Kühlen der eingebrachten Atome notwendig sind. Die Vorrichtung verbraucht wesentlich weniger Energie als die aus vielen hundert Drahtwicklungen bestehenden Spulen, mit denen Magnetfelder normalerweise hergestellt werden. Außerdem benötigt sie nicht so viel Platz, und das Kondensat bildet sich wegen der hohen Feldgradienten sehr schnell. Dieser Aufbau hat bisher über 200-mal den Sturz in die



CLAUS JÄMMERZAHN, PAULKE MÜNTINGA UND REINHOLD WÄLSER

Tiefe am Bremer Fallturm überstanden. In ihm herrschte dabei auf einer Strecke von 110 Metern jeweils 4,7 Sekunden lang Mikrogravitation – mit einer Restbeschleunigung von nur einem millionstel  $g$ .

Bei den Fallversuchen wurden, während die Kapsel noch in der Spitze des Fallturms hing, etwa zehn Millionen Atome des Rubidiumisotops  $^{87}\text{Rb}$  zunächst in einer magnetooptischen Falle eingefangen. Nach dem Ausklinken traten durch die Beschleunigung mechanische Störschwingungen auf, die erst abklingen mussten, was etwa eine Sekunde dauerte. Danach wurden die Atome in die vom Atomchip erzeugte rein magnetische Falle überführt und dort per Verdampfungskühlung in etwa 1,5 Sekunden auf die extrem tiefe Temperatur von wenigen milliardstel Kelvin gebracht. Dabei entstand ein Bose-Einstein-Kondensat aus etwa 10000 Atomen, das sich nach dem Abschalten der Falle bis zu eine Sekunde lang frei ausdehnte. Seine Vermessung mit einer Digitalkamera ergab, dass das kollektive Wellenpaket bei seiner Expansion die für ein Quantenobjekt gigantische Ausdehnung von etwa zwei Millimetern in Fallrichtung erreichte.

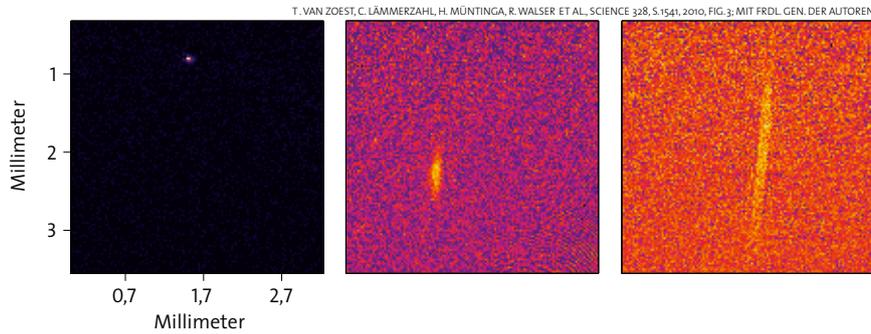
Im Bremer Fallturm ist auch ein Katapult installiert, mit dem die Kapsel in die Höhe geschossen werden kann, bevor sie wieder herunterfällt. Dadurch

verdoppelt sich die Experimentierzeit. Entsprechende Experimente, bei denen sich dann noch mehr Atome abkühlen lassen, sind in Vorbereitung.

Jetzt gilt es, die gewonnenen Erfahrungen und Erkenntnisse für praktische Anwendungen und grundlagenphysikalische Experimente nutzbar zu machen. So lässt sich ein so genannter Inertialsensor auf Basis eines Materiewelleninterferometers realisieren. Dabei wird das Bose-Einstein-Kondensat mit Laserpulsen in zwei Teile aufgespalten, die sich entlang verschiedener Wege bewegen. Weitere Laserpulse führen die beiden Materiewolken wieder zusammen. Dabei bildet sich ein Interferenzmuster, das Rückschlüsse auf die Kräfte zulässt, die auf sie gewirkt haben. Entsprechende Versuche sind in normalen Labors und in der Fallturmapparatur bereits geglückt.

Ein solches Interferometer würde unter Schwerelosigkeit eine viel höhere Genauigkeit erreichen als am Boden. Mit ihm ließe sich beispielsweise das lokale Gravitationsfeld der Erde mit höchster Präzision vermessen. Daraus ergäben sich wertvolle Erkenntnisse über geologische Strukturen oder Rohstoffvorkommen. Auch zur Navigation von Satelliten im Weltraum könnten Inertialsensoren dienen.

Abgesehen von solchen praktischen Anwendungen ließen sich mit Materie-



Diese farbkodierten Absorptionsaufnahmen des Bose-Einstein-Kondensats im Fallturm zeigen die optische Dichte der Atomwolke zu verschiedenen Zeiten: Je heller die Farbe, desto höher ist sie. Nach 30 Millisekunden (links) erscheint das Kondensat noch punktförmig. Nach 500 Millisekunden (Mitte) hat es sich vor allem in Fallrichtung deutlich gestreckt – und nach einer Sekunde (rechts) auf mehr als zwei Millimeter ausgedehnt.

welleninterferometern aber auch viele grundlegende physikalische Fragestellungen untersuchen. Von besonderem Interesse ist dabei ein quantenmechanischer Test von Einsteins Äquivalenzprinzip, wonach kein Unterschied zwischen schwerer und träger Masse besteht. Zwei Materiewelleninterferometer mit unterschiedlichen Atomsorten am gleichen Ort sollten einen solchen Test ermöglichen. Das Ergebnis

verspricht neue Erkenntnisse zu einer der spannendsten Fragen in der heutigen Physik: wie sich Quantenmechanik und Relativitätstheorie vereinbaren lassen. Zwischen beiden klappt bisher eine tiefe Kluft. Etliche Ansätze, sie zu überbrücken – etwa die Stringtheorie –, sagen Abweichungen vom Äquivalenzprinzip voraus. Für ein solches Experiment entsteht derzeit eine weitere Apparatur, in der zusätzlich zu einem Bose-Einstein-

Kondensat aus Rubidium ein zweites aus Kalium erzeugt werden kann.

Mit ultrakalten Gasen in der Schwerelosigkeit ließe sich auch ermitteln, wie lange Materiewellen ihre Kohärenz bewahren. Desgleichen könnte man prüfen, ob bei kleinsten Abständen Abweichungen vom newtonschen Gravitationspotenzial auftreten. Manche Theoretiker halten das für denkbar. Und schließlich bieten Bose-Einstein-Kondensate im freien Fall auch die Möglichkeit, noch tiefere Temperaturen als bisher zu erreichen und dabei eventuell neue Phänomene zu entdecken – gemäß dem Leitspruch des berühmten Physikers Richard Feynman (1918–1988): »*There's plenty of room at the bottom*« (»Es ist noch reichlich Platz da unten«).

**Claus Lämmerzahl** ist Physikprofessor am Zentrum für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation der Universität Bremen. **Hauke Müntinga** promoviert dort über das beschriebene Experiment. **Reinhold Walser** ist Professor für theoretische Physik an der Technischen Universität Darmstadt.

ASTRONOMIE

# Nova produziert Gammastrahlung

Mit dem Satelliten Fermi haben Astronomen festgestellt, dass eine Nova energiereiche Gammastrahlung aussendet. Bisher herrschte die Ansicht, nur Supernovae seien dazu in der Lage.

VON JAN HATTENBACH

Der Nova-Ausbruch von V407 Cygni am 10. März 2010 wäre an sich nicht weiter bemerkenswert gewesen – schließlich beobachten Astronomen allein in der Milchstraße jedes Jahr Dutzende solcher Ereignisse. Für Überraschung sorgte jedoch, dass auch das Weltraumteleskop Fermi die Himmelserscheinung registrierte, obwohl es nicht im sichtbaren Teil des elektromagnetischen Spektrums beobachtet, sondern im hochenergetischen Gammabereich (*Science* 329, S. 817). Eine Nova,

die Gammastrahlung mit Energien von mehreren Gigaelektronvolt emittiert, war bisher unbekannt. Eine solch hochenergetische Emission galt als Besonderheit der viel gewaltigeren – und wesentlich selteneren – Supernovae.

Der Ausdruck Nova leitet sich von lateinisch *stella nova*, neuer Stern, ab. So nannten Astronomen früher ein sternartiges Objekt, das plötzlich am Firmament erscheint. Als Supernova wird die noch wesentlich energiereichere Variante bezeichnet, die so hell werden kann,

dass sie sogar am Taghimmel mit bloßem Auge sichtbar ist. Allerdings handelt es sich bei beiden Erscheinungen um das Gegenteil einer Sterngeburt. Sie markieren stattdessen die letzte Lebensphase oder sogar den gewaltsamen Tod eines Sterns. Dabei unterscheiden sich Novae und Supernovae nicht nur in ihrer Helligkeit. Vielmehr verkörpern sie unterschiedliche Klassen astronomischer Objekte. Freilich gibt es zwischen einigen Novae und bestimmten Supernovae auch Gemeinsamkeiten.

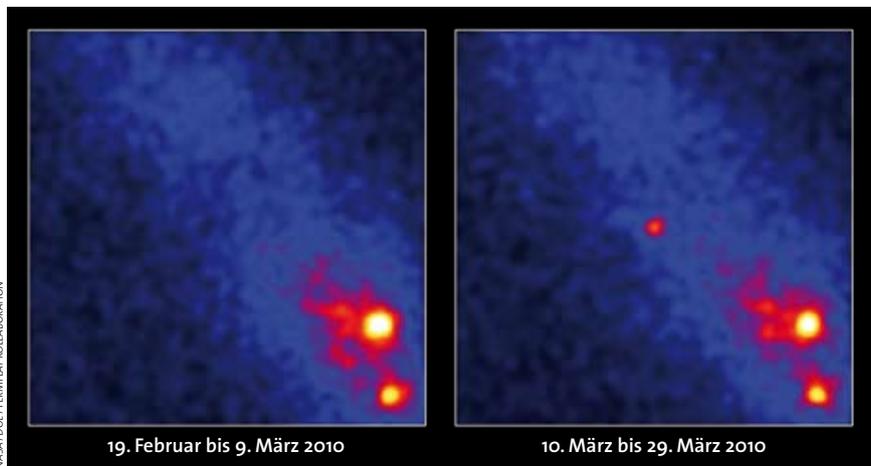
Das trifft zum Beispiel zu, wenn beide sich in einem Binärsystem entwickelt haben, in dem zunächst zwei ganz gewöhnliche Sterne umeinanderkreisen. Der größere verbraucht seinen Brennstoff schneller und durchläuft dadurch die Sternentwicklung in kürzerer Zeit als der kleinere. Wenn er das Endstadium als Weißer Zwerg erreicht hat, befindet sich sein Begleiter noch im Stadium des Roten Riesen. Eine solche Situation liegt bei V407 Cygni vor: Der Weiße Zwerg enthält rund eine Sonnenmasse in einer Kugel von etwa der Größe der Erde; der Radius des Roten Riesen übertrifft den der Sonne – bei vergleichbarer Masse – dagegen um das 500-Fache.

### Ursache der Explosion

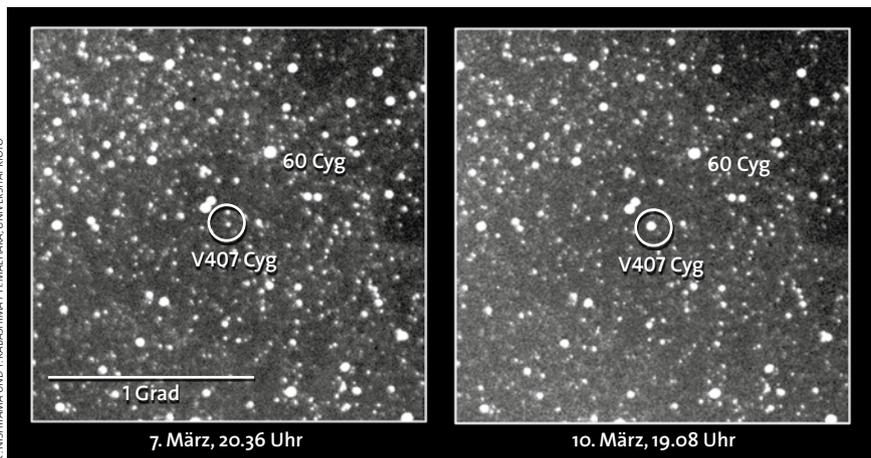
Beim Aufblähen eines Sterns vor seinem finalen Kollaps stößt er seine äußeren Hüllen ab. So verliert der Rote Riese von V407 Cygni pro Jahr etwa ein Zehntel der Sonnenmasse an den umgebenden Weltraum. Einen Teil davon zieht der Zwergstern zu sich herüber. Dadurch sammelt sich eine Wasserstoffhülle auf seiner Oberfläche, und seine Masse wächst an. Nähme sie bis auf 1,4 Sonnenmassen zu, würde der Weiße Zwerg als thermonukleare Supernova explodieren, was – bei einer Entfernung von 9000 Lichtjahren zwischen V407 Cygni und dem Sonnensystem – mit bloßem Auge sichtbar wäre.

Doch so weit kommt es in diesem Fall nicht. Auf dem Zwergstern von V407 Cygni erreicht die neu erworbene Wasserstoffhülle nämlich vorher schon so hohe Drücke und Temperaturen, dass eine plötzliche heftige Fusionsreaktion einsetzt und sie absprengt. Diese Explosion sehen wir als Nova. Auch im Maximum ihrer Helligkeit ist sie allerdings nur mit einem Fernglas zu erkennen. Im Gegensatz zu einer thermonuklearen Supernova-Explosion bleibt der Weiße Zwerg dabei intakt.

Nach dem Absprengen der Hülle lagert sich erneut Wasserstoff auf ihm an, und der Vorgang wiederholt sich. Astronomen sprechen deshalb von einer wiederkehrenden Nova. Tatsächlich war bei V407 Cygni schon 1936 ein ähnlicher Ausbruch zu beobachten wie 2010.



Ab dem 10. März 2010 erschien in Aufnahmen des Gammateleskops Fermi 19 Tage lang das Objekt V407 Cygni (rechts, Bildmitte), das in dieser Zeitspanne einen Nova-Ausbruch erlebte. Auf älteren Aufnahmen war es nicht zu sehen (links).



Japanische Amateurastronomen entdeckten am 10. März den Nova-Ausbruch von V407 Cygni. Das Objekt war in der Aufnahme von diesem Tag (rechts) zehnmal so hell wie auf einem Foto drei Tage zuvor (links).

Supernovae senden Gammastrahlung aus, weil in ihren Explosionswolken Elementarteilchen der Sternmaterie – insbesondere Protonen, also Wasserstoffkerne – auf extrem hohe Energien beschleunigt werden und dann mit anderen Partikeln zusammenprallen. Auch eine Nova schleudert Materie mit hoher Geschwindigkeit davon. Diese dringt in die vom Roten Riesen abgestoßenen Gaswolken ein, wobei eine Stoßwelle entsteht. Im Fall von V407 Cygni haben Astronomen für die Teilchen, die der Weiße Riese bei seinem Ausbruch ins All katapultiert, eine Geschwindigkeit von 3000 Kilometer pro Sekunde

abgeleitet, was einem Prozent der Lichtgeschwindigkeit entspricht.

Das genügt allerdings nicht für die Erzeugung von Gammastrahlung. Dafür müssen die Protonen noch wesentlich höhere Geschwindigkeiten erreichen. Tatsächlich werden sie durch die Magnetfelder der Nova-Stoßwelle zusätzlich beschleunigt. Bislang hielten Astronomen diese Felder jedoch für zu schwach, um Protonen und andere geladene Teilchen auf ausreichend hohe Geschwindigkeiten zu bringen. Der Nachweis von Gammastrahlung beim Ausbruch von V407 Cygni hat sie nun eines Besseren belehrt. Novae können demnach ebenso

wirksame Teilchenbeschleuniger sein wie Supernovae. Wie die an der Untersuchung beteiligten Mitglieder der Fermi-Kollaboration zeigten, lässt sich das Energiespektrum der Strahlung im Fall von V407 Cygni sehr gut durch die Kollision energiereicher Protonen mit eben solchen Teilchen aus den Gaswolken des Riesensterns erklären.

Welche Konsequenzen die Entdeckung hat, ist noch nicht absehbar. Da Novae viel häufiger sind als Supernovae, könnte ihr Beitrag zum Gammastrahlungshintergrund erheblich sein. Allerdings haben nur wenige einen Aufbau wie V407 Cygni. Vor allem kommt es eher selten vor, dass ein benachbar-

ter Roter Riese eine Gaswolke mit der nötigen Dichte für die Entstehung einer Stoßwelle liefert; denn das Riesenstadium bildet nur einen kurzen Abschnitt im Dasein eines Sterns. Die viel häufigeren Novae ohne solchen Begleiter aber wären keine Gammaquellen.

Die Entdeckung energiereicher Gammastrahlung bei V407 Cygni legt zudem nahe, dass bei einem Ausbruch auch Neutrinos entstehen. Das sind äußerst leichte, neutrale Teilchen, die kaum mit Materie wechselwirken. Sie wurden bisher schon bei Supernovae beobachtet und bilden sich wie Gammastrahlen bei heftigen Kollisionsprozessen in Stoßwellen. Ihr Nachweis er-

fordert gewaltige Detektoren. Das bisher größte Neutrinoobservatorium entsteht derzeit in der Antarktis (Spektrum der Wissenschaft 8/2007, S. 38). Dort werden 5160 Photomultiplier auf einer Fläche von einem Quadratkilometer in 86 Bohrlöchern zwischen 1450 und 2450 Meter tief im ewigen Eis versenkt. Mit diesem Instrument oder einer erweiterten Ausführung davon sollte es nach Ansicht der Fermi-Forscher möglich sein, Neutrinos auch bei Novae nachzuweisen.

---

**Jan Hattenbach** ist erfahrener Amateurastronom in Aachen und bloggt unter »Himmelslichter« auf [www.kosmologs.de](http://www.kosmologs.de).

## HIRNFORSCHUNG

# Bewusstsein für Lernen unnötig

Bislang unterschieden Hirnforscher die einzelnen Formen des Gedächtnisses danach, ob das Bewusstsein dabei eingeschaltet ist oder nicht. Ein neues Modell postuliert nun, dass jede Gedächtnisform bewusst wie unbewusst in Erscheinung treten kann.

VON SIMONE DUSS UND KATHARINA HENKE

Das Gedächtnis ermöglicht es uns, unsere vergangenen Erfahrungen zu nutzen. Dabei stellt es jedoch kein einheitliches System dar. Erinnerungen an persönlich Erlebtes – etwa den letzten Urlaub – rufen wir aus dem episodischen Gedächtnis ab. Unser Allgemeinwissen, Fakten und Sachverhalte wie Einsteins berühmte Formel  $E = mc^2$  sind im semantischen Gedächtnis gespeichert. Das prozedurale Gedächtnis schließlich ist zuständig für Handlungsabläufe und Fertigkeiten wie zum Beispiel Fahrradfahren.

Untersuchungen an hirnverletzten Patienten und an Tieren mit gezielt verursachten Hirnschädigungen veranlassen Larry R. Squire an der University of California in San Diego bereits im Jahr 1988, zusätzlich den Begriff des deklarativen Gedächtnisses einzuführen. Dieses enthält all jene im Gehirn abgespeicherten Informationen, die wir uns ins Bewusstsein rufen können. Dazu zählen

die Inhalte sowohl des episodischen als auch des semantischen Gedächtnisses, also die Erinnerung an den letzten Urlaub und an Einsteins Formel gleichermaßen.

Für das deklarative Gedächtnis ist auf neuronaler Ebene der Hippocampus zuständig, der über dem Ohr rund vier Zentimeter tief im Gehirn liegt. Er hat die Fähigkeit, von Moment zu Moment Erlebtes miteinander zu verknüpfen und – im Zusammenwirken mit dem Neokortex (dem stammesgeschichtlich jüngsten Teil der Großhirnrinde) – abzuspeichern.

Nicht ins Bewusstsein gelangen laut Squire dagegen die Inhalte des prozeduralen Gedächtnisses. Es umfasst Dinge, an die wir uns automatisch erinnern, während wir an etwas völlig anderes denken. Ein Beispiel ist etwa die Schrittfolge eines einstudierten Tanzes. Sie sich exakt bewusst zu machen, stört sogar eher. Bei dem Versuch kommt

man meist ins Stocken – eben weil die Schrittfolge als Prozedur unbewusst gespeichert ist.

Der Hippocampus scheint beim prozeduralen Gedächtnis keine Rolle zu spielen; denn Patienten mit Verletzungen in dieser Hirnregion können zwar keine neuen Erlebnisse im deklarativen Gedächtnis mehr speichern, aber noch immer Handlungsabläufe erlernen, etwa einen neuen Tanz. Dabei erinnern sie sich in der Regel nicht bewusst an die einzelnen Tanzstunden oder das Links-rechts-Muster der Schrittfolge – das entspräche dem Abruf aus dem deklarativen Gedächtnis. Sie können die Tanzschritte jedoch über mehrere Übungsdurchgänge ganz allmählich im Gehirn abspeichern.

Aber ist das zentrale Unterscheidungskriterium zwischen deklarativem und prozeduralem Gedächtnis wirklich das Bewusstsein? Die beiden differieren auch in anderer Hinsicht – insbe-

sondere darin, was man lernt und wie das geschieht, sowie hinsichtlich der Form, in der das Gelernte abgelegt wird. So muss man Prozeduren wiederholt üben, bis man sie beherrscht. Dagegen sind Erlebnisse einmalig und erfordern daher eine sofortige Abspeicherung.

Vielleicht haben Patienten mit Schädigung des Hippocampus also gar nicht grundsätzlich Schwierigkeiten damit, etwas bewusst zu lernen und zu erinnern, sondern nur mit dem Herstellen und Abspeichern von Verknüpfungen zwischen Erlebnisaspekten – gleichgültig, ob mit oder ohne Bewusstsein.

### Unbewusstes Erkennen von Unterschieden

Unbewusstes verknüpfendes Lernen kommt im Alltag häufig vor. Ein Beispiel: Während Sie eine Flasche Wein öffnen, klingelt das Telefon. Schnell räumen Sie den Korkenzieher weg, bevor Sie zum Hörer greifen. Tags darauf erinnern Sie sich nicht mehr bewusst, wo Sie ihn hingelegt haben, aber dennoch öffnen Sie auf Anhieb die richtige Schublade. Offenbar haben Sie also Korkenzieher und Schublade unbewusst miteinander verknüpft.

Dass Menschen solche Verknüpfungen mit Hilfe des Hippocampus speichern, konnten wir und Kollegen mittels funktioneller Bildgebung des Gehirns nachweisen (*Neuropsychologia* 41, S. 863). Außerdem beeinträchtigen Hippocampus-Verletzungen, wie Untersuchungen an Patienten nahelegen, sowohl das bewusste als auch das unbewusste Speichern neuer Verknüpfungen.

So fanden Jennifer D. Ryan vom Rotman Research Institute in Baycrest (Kanada) und ihre Mitarbeiter in Experimenten heraus, dass gesunde Versuchspersonen vermehrt auf die Stelle eines Bildes schauen, an der sich gegenüber dem vorherigen Betrachten etwas verändert hatte (*Psychological Science* 11, S. 454). Dabei waren sie sich über die Veränderung gar nicht im Klaren – ihr Blick wurde unbewusst gesteuert. Bei Patienten mit Verletzungen im Hippocampus oder in damit verbundenen Hirnarealen trat dieser Effekt dagegen nicht auf:



## Die drei Arten des Lernens

Das neue Gedächtnismodell postuliert drei Lernformen, die unabhängig vom Bewusstsein sind und je nach Lernsituation zum Einsatz kommen. Beim raschen Lernen von flexiblen Verknüpfungen werden Einzelheiten eigener Erlebnisse – im hier gezeigten Beispiel das Eintreiben weidender Pferde – im Neokortex (Hirnmantel) abgebildet und über den Hippocampus miteinander verknüpft (episodisches Gedächtnis). Langsames Lernen von rigiden Verknüpfungen findet bei der wiederholten Auseinandersetzung mit einer Situation statt, also zum Beispiel beim Üben eines Tanzes (prozedurales Gedächtnis), beim Aneignen von Allgemeinwissen (semantisches Gedächtnis) oder beim klassischen Konditionieren. Für diese Lernform spielen der Neokortex, die Basalganglien und das Kleinhirn eine zentrale Rolle. Über das rasche Lernen von Einzelinformationen schließlich können wir schnell isolierte Aspekte einer einmaligen Szene abspeichern. Das erzeugt ein Vertrautheitsgefühl, wenn wir etwa ein auffälliges Kleid zum zweiten Mal sehen, und ermöglicht die schnellere und korrektere Verarbeitung der betreffenden Sinnesinformation. Bei dieser Lernform treten der Neokortex und die parahippocampale Windung in Aktion.

Sie betrachteten alle Bereiche des veränderten Bildes gleich häufig.

Demzufolge ist das hippocampale Netzwerk auch für unbewusstes Lernen und Erinnern essenziell. Solche Befunde sind mit der Theorie des deklarativen Gedächtnisses schwer vereinbar. Deshalb hat eine von uns (Henke) jetzt ein neues Gedächtnismodell vorgeschlagen (*Nature Reviews Neuroscience* 11, S. 523). Es unterteilt die Gedächtnisformen nicht anhand des Bewusstseins, sondern anhand der Anforderungen,

die eine Lernsituation stellt (siehe Kästen oben). Entsprechend unterscheidet es zwischen

- ▶ raschem Lernen von flexiblen Verknüpfungen wie beim Abspeichern von erlebten Ereignissen,
- ▶ langsamem Lernen von rigiden Verknüpfungen wie beim Erlernen eines Tanzes und
- ▶ raschem Lernen von Einzelinformationen (ohne Verknüpfungen), wie es etwa für das Wiedererkennen eines Kleids nötig ist.

Alle drei Lernformen funktionieren mit und ohne Bewusstsein.

Dank des raschen Lernens flexibler Verknüpfungen erinnern wir uns beispielsweise, wo wir am Vorabend den Korkenzieher hingelegt haben. Für den Abruf aus dem Gedächtnis reicht dabei ein Hinweisreiz als Anstoß aus – etwa eine Weinflasche. Wir können dann entweder die gesamte Erinnerung oder auch nur einzelne Fragmente davon wachrufen. Für diese Lernform ist der Hippocampus zusammen mit dem Neokortex zuständig.

Das langsame Lernen von rigiden Verknüpfungen kommt zum Tragen, wenn wir wiederholt die gleiche Lernsituation durchlaufen und dabei ganz allmählich neue Verknüpfungen aufbauen. Beispiele dafür sind das Erlernen eines Tanzes oder der Wissenserwerb im Physikunterricht. Hier werden Neokortex, Kleinhirn und Basalganglien bean-

sprucht. Die Rigidität drückt sich darin aus, dass das Erlernete meist nur in seiner ursprünglichen Form wiedergegeben oder wiedererkannt werden kann. So identifizieren wir zwar  $E=mc^2$  sofort als Einsteins Formel, aber nicht  $m=E/c^2$ , obwohl die beiden Gleichungen dasselbe aussagen.

Beim raschen Lernen einer Einzelinformation schließlich speichern wir isolierte Fragmente einer Szene ab – beispielsweise das schöne Kleid an einer vorbeihuschenden Frau. Wenn wir dieses Kleid später wiedersehen, löst der Anblick ein Vertrautheitsgefühl aus oder bewirkt zumindest eine effizientere Verarbeitung des Sinneseindrucks. Diese dritte Lernform nutzt den Neokortex und die parahippocampale Hirnwindung, die neben dem Hippocampus liegt.

Die zentrale Aussage des neuen Modells lautet: Einspeichern und Abrufen

jeglicher Art von Informationen kann ebenso bewusst wie unbewusst geschehen. Demnach sollte es prinzipiell möglich sein, im Schlaf zu lernen. Außerdem ist das Modell problemlos auch in der Tierforschung anwendbar, da es die Frage, inwieweit Tiere bewusstseinsfähig sind, irrelevant macht. Die an Tieren und Menschen gewonnenen Erkenntnisse werden damit besser vergleichbar. Schließlich eröffnet unser Gedächtnismodell neue Perspektiven für die Untersuchung von Menschen mit Hirnverletzungen; denn Gedächtnisfunktionen lassen sich bei ihnen möglicherweise auch unbewusst und damit einfacher und weniger belastend untersuchen.

---

**Simone Duss** forscht als Doktorandin in der Abteilung Allgemeine Psychologie und Neuropsychologie der Universität Bern. **Katharina Henke** ist Professorin für Allgemeine Psychologie und Neuropsychologie in dieser Abteilung.

## MOLEKULARBIOLOGIE

# Zweischneidige Killerwaffe

**Bakterien und Immunzellen benutzen ähnliche Proteine, um Löcher in die Zellmembran ihrer jeweiligen Opfer zu stanzen. Doch handhaben sie diese tödliche Waffe auf unterschiedliche Weise.**

VON MICHAEL GROSS

**H**at das Immunsystem eine Zelle in unserem Blut als virusbefallen oder entartet erkannt, rückt das körpereigene Exekutionskommando an. Es besteht aus speziellen weißen Blutkörperchen, die an missliebige Zellen andocken. Dabei scheiden sie Eiweißmoleküle aus, die sich in Gruppen von rund 20 zu einer Art Niete vereinigen. Diese stanzt sich selbstständig durch die Außenhaut des Angriffsziels.

Dort entsteht so ein Loch, das mit einem Innendurchmesser von 20 Nanometern groß genug ist, um wichtige Inhaltsstoffe entweichen zu lassen. Das allein bringt die betroffene Zelle schon in Lebensgefahr. Doch um ganz sicher zu gehen, pumpt der Angreifer auch

noch tödliche Enzyme durch die Öffnung in das Opfer, die dessen Selbstzerstörung (Apoptose) einleiten.

Die Schlüsselrolle in diesem Drama spielt das Protein Perforin, das für sich allein wasserlöslich und harmlos ist. Erst im Verband mit 18 bis 23 gleichartigen Molekülen bildet es eine gefährliche Membranpore. Ähnlich funktioniert ein verwandtes Protein, das bei der Bekämpfung von bakteriellen Infektionen zum Einsatz kommt. Es gehört zum so genannten Komplementsystem, einer eher primitiven, unspezifischen Komponente der Körperabwehr, und zirkuliert in einer geschützten Vorläuferform im Blut. In beiden Fällen war bisher unklar, wie sich die Einzel-

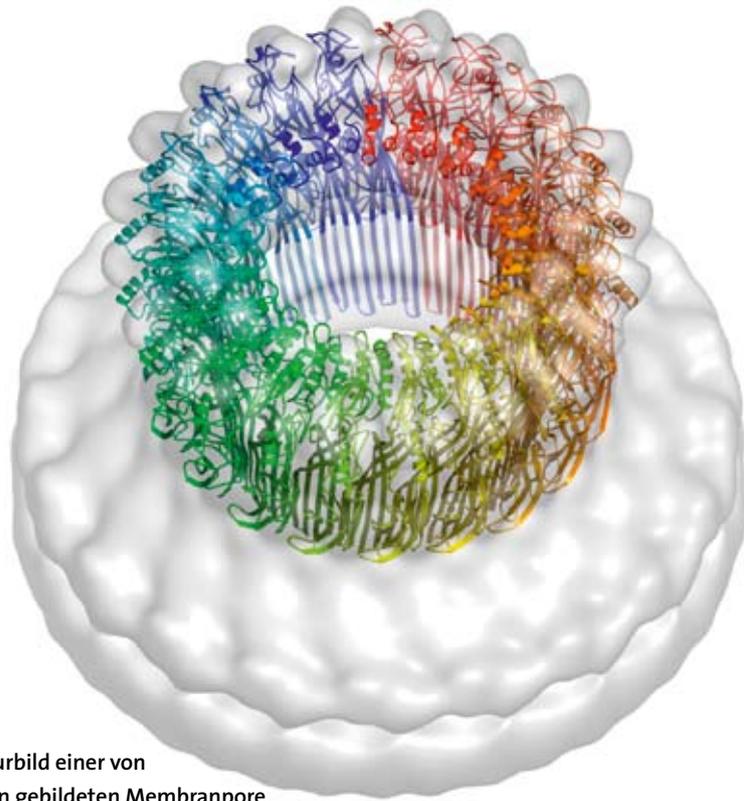
moleküle zu einem röhrenartigen Gebilde vereinigen.

Natasha Lukoyanova und Helen Sambil am Birkbeck College London ermittelten 2006 per Elektronenmikroskopie den Umriss der Perforinpore. Für Details war die Auflösung der Aufnahmen aber zu gering. Ein Jahr später ließen sich von zwei Proteinen, die dem Perforin ähneln, aber selbst keine Poren bilden, per Röntgenbeugung atomar aufgelöste Kristallstrukturen ermitteln. Das Ergebnis war eine Überraschung: Beide Substanzen ähneln in ihrer dreidimensionalen Gestalt einer Gruppe von Proteinen, mit denen pathogene Bakterien die Außenmembran ihrer Opfer durchlöchern.

Bei diesen gab es bereits detaillierte Vorstellungen darüber, wie sich die Einzelmoleküle umorganisieren müssen, um sich zur Membranpore zusammenzulagern. Saibils Arbeitsgruppe versuchte daraufhin, nach dem bakteriellen Vorbild den entsprechenden Prozess für das Perforin zu modellieren – jedoch ohne überzeugendes Resultat.

Dies blieb der Stand der Dinge, bis kürzlich James Whisstock und seine Mitarbeiter an der Monash University in Melbourne (Australien) die Röntgenstrukturanalyse einer Perforinmutante gelang, der die Fähigkeit zur Zusammenlagerung abhandengekommen ist. Nur deshalb ließ sie sich überhaupt kristallisieren – eine Voraussetzung für den Einsatz der Abbildungsmethode. Daraufhin machte sich Saibil mit ihrer Arbeitsgruppe daran, die detailliertere Struktur der Australier in ihre 2006 ermittelte elektronenmikroskopische Umrisssskizze einzufügen (*Nature* 468,

Strukturbild einer von Perforin gebildeten Membranpore



HELEN SAIBIL, BIRBECK COLLEGE LONDON

ANZEIGE

## Konzentrierter. Belastbarer. Ausgeglichener.\*

Leichter konzentrieren, besser erinnern – für die Lebensqualität im Alltag ist das entscheidend. Mit den Jahren und bei nachlassender mentaler Leistungsfähigkeit zeigt sich das umso mehr. Was hilft: Die Aktivität der Gehirnzellen gezielt zu unterstützen. **Tebonin®** aktiviert die Energieproduktion der 100 Mrd. Gehirnzellen und stärkt so Gedächtnisleistung und Konzentration.\*



\*Bei nachlassender mentaler Leistungsfähigkeit infolge zunehmender Funktionseinbußen der Nervenzellen im Gehirn.

**Tebonin® konzent 240 mg** 240 mg/Filmtablette. Für Erwachsene. **Wirkstoff:** Ginkgo-biloba-Blätter-Trockenextrakt. **Anwendungsgebiete:** Zur Behandlung von Beschwerden bei leichten bis mittelschweren hirnnorganisch bedingten mentalen Leistungsstörungen im Rahmen eines therapeutischen Gesamtkonzeptes bei Abnahme erworbener mentaler Fähigkeit (dementielles Syndrom) mit den Hauptbeschwerden: Rückgang der Gedächtnisleistung, Merkfähigkeit, Konzentration und emotionalen Ausgeglichenheit, Schwindelgefühle, Ohrensausen. Bevor die Behandlung mit Ginkgo-Extrakt begonnen wird, sollte geklärt werden, ob die Krankheitsbeschwerden nicht auf einer spezifisch zu behandelnden Grunderkrankung beruhen. **Zu Risiken und Nebenwirkungen lesen Sie die Packungsbeilage und fragen Sie Ihren Arzt oder Apotheker.** Dr. Willmar Schwabe GmbH & Co. KG, Karlsruhe

Stand: Oktober 2010 T/10/10/4

## Tebonin® stärkt Gedächtnisleistung und Konzentration.\*

- Exklusiver pflanzlicher Spezialextrakt
- Gut verträglich



Mit der Natur.  
Für die Menschen.

Dr. Willmar Schwabe GmbH & Co. KG  
www.tebonin.de  
www.schwabe.de

S. 447). Zunächst nahmen sie wieder die bakterielle Pore als Vorbild, was aber erneut kein befriedigendes Resultat brachte. Erst als sie das Protein um 180 Grad drehten, hatten sie schließlich den erhofften Erfolg.

Demnach zeigt jene Seite der Pore, die bei den Bakterien dem Zellinnenraum zugewandt ist, beim Perforin nach außen. Überdies läuft der Einlageprozess wohl anders ab. Dafür spricht, dass sich bei der Porenbildung des Perforins der Teil des Moleküls, der auf der Außenseite der Membran bleibt, weniger drastisch zu verändern scheint als im Fall der Bakterien.

### Hilfe bei Blutkrankheiten

Von den neuen Erkenntnissen dürften zunächst einmal Patienten mit bestimmten Blutkrankheiten profitieren, die von einer Mutation im Perforin-Gen herrühren. Mehr als 50 solche Mutationen werden mit einem seltenen, aber schweren Erbleiden – der hämophagozytischen Lymphohistiozytose – in Verbindung gebracht. Anhand der Strukturinformation wird sich jetzt klären lassen, warum die Erbgutänderungen so gravierende Auswirkungen haben und was man eventuell dagegen unternehmen könnte.

Inwieweit das Wissen um die genaue dreidimensionale Gestalt der vom Perforin gebildeten Membranpore auch die Krebstherapie weiterbringt, ist dagegen noch offen. Mit dem Protein, das Membranhüllen durchlöchert, bekämpft das Immunsystem zwar unter anderem Tumoren – wie eingangs geschildert. Der schwierige Schritt bei der Behandlung von Krebs ist aber die selektive Erkennung der Zielzellen, nicht ihre Vernichtung. Die starken Nebenwirkungen der gängigen Chemotherapie machen das überdeutlich.

Für die Evolutionsforscher schließlich bleibt das Rätsel zu lösen, wie und warum entweder unsere Vorfahren oder die Bakterien die Membranpore von innen nach außen gewendet haben.

**Michael Groß** ist promovierter Biochemiker und lebt als freier Wissenschaftsjournalist in Oxford (England).

## Lesen – eine Last fürs Hirn

### Unser Denkorgan erkennt Worte auf Kosten anderer Fähigkeiten.

Lesen lernen war am schwersten. Die Volksschullehrerin malte mit bunter Kreide die ersten Großbuchstaben an die Tafel, und wir zeichneten mühsam, die Zunge im Mundwinkel, die Lettern mit Bleistift ins linierte Heft ab. Dann hämmerten Heinzelmännchen auf der Tafel die Großbuchstaben klein, bis sie aussahen wie gedruckt. Mehrere Buchstaben ergaben ein Wort, die Worte einen Satz. Erst musste ich mir alles laut vorlesen, aber bald bewegte ich nur noch die Lippen, während mein Zeigefinger die Zeilen einer Geschichte entlangfuhr. So stolperte ich in die Labyrinth der Schrift, wo ich seitdem einen großen Teil meiner wachen Zeit bringe.

Vor Kurzem bin ich dabei auf ein Buch gestoßen, das erklären will, woher das Gehirn die Fähigkeit nimmt, Schrift zu erkennen. Die Lektüre verschaffte mir eine einzigartige Erfahrung zweiter Ordnung: Mein Gehirn mühte sich, gedruckte Worte zu verstehen, die mir mitteilen wollten, wie mein Gehirn gedruckte Worte zu verstehen vermag. In dem Buch »Reading in the Brain« (seit Kurzem als »Lesen« auch ins Deutsche übersetzt) beschreibt der französische Hirnforscher Stanislas Dehaene, wie sich die kulturelle Erfindung des Lesens angeborene Fertigkeiten zu Nutze macht, die im langen Lauf der biologischen Evolution entstanden sind.

Unser Sehsystem ist darauf programmiert, Muster zu erkennen, insbesondere Ecken und Kanten, Objekte und Gesichter. Diese Gabe nutzten die ersten Schreiber ziemlich direkt, indem sie zunächst quasi Kürzel von Objekten malten, also Hieroglyphen. Um sie flinker hinschreiben zu können, wurden die Kürzel immer einfacher und abstrakter – bis man auf die völlig neue Idee kam, Symbole nicht für Objekte, sondern für Laute einzusetzen. Diese Buchstaben nahmen wie von selbst Formen an, die der natürlichen Fähigkeit des Gehirns, Winkel und Kanten zu identifizieren, besonders entgegenkamen. Darum gibt es ein E, ein T und so fort.

**Dehaene nennt diesen Vorgang** der kulturellen Umnutzung biologischer Wahrnehmungsressourcen »Recycling«: Die Schrift ist eine späte Errungenschaft, für die es keine angeborenen Verschaltungen im Gehirn gibt. Indem wir lesen lernen, funktionieren wir vorhandene Fähigkeiten um – wir »recyclen« neuronale Netze so, dass sie Schrift erkennen.

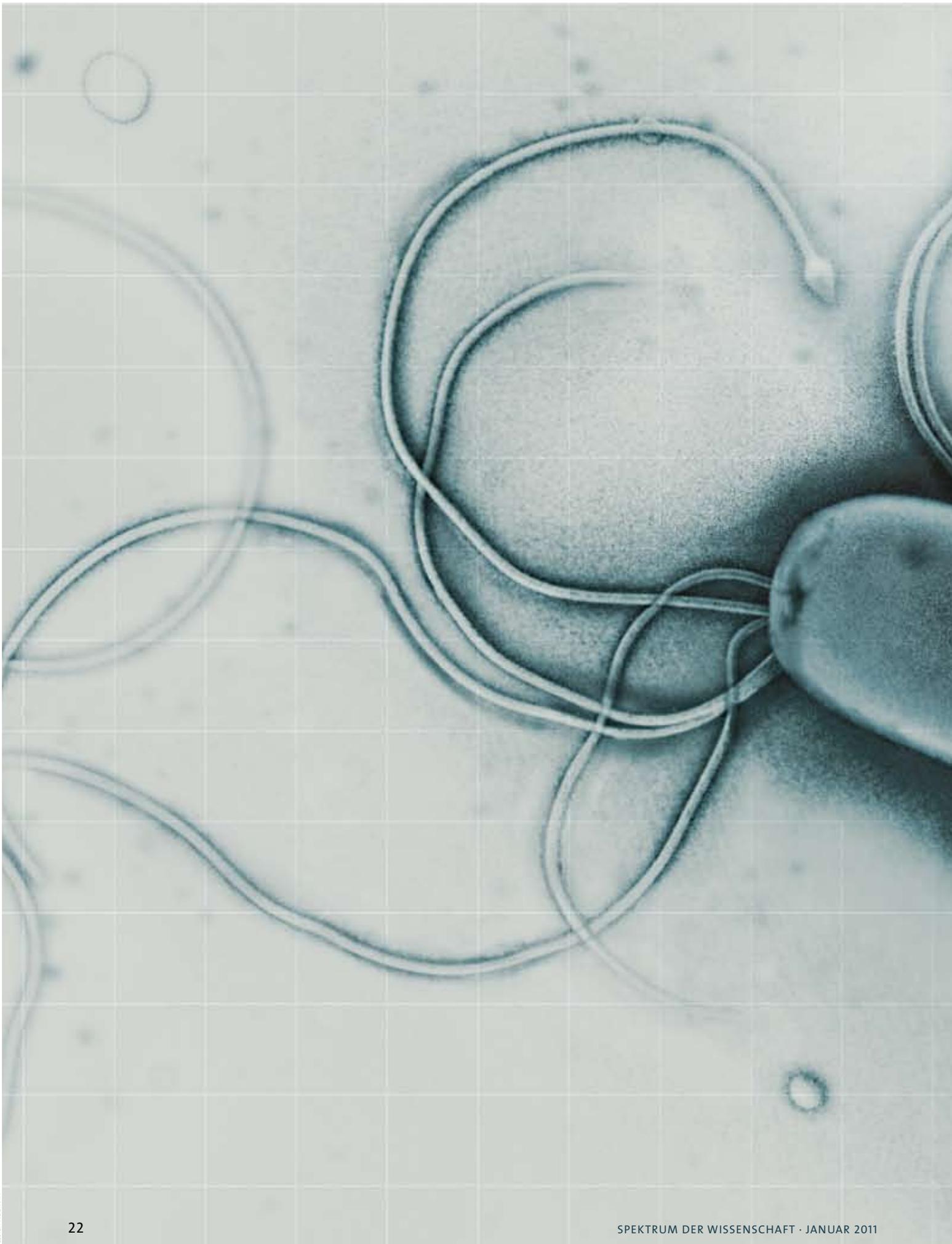
Jetzt hat Dehaene versucht, die Recycling-Hypothese empirisch zu belegen (»Scienceexpress« vom 11.11. 2010). Sein Team untersuchte mittels funktioneller Magnetresonanztomografie 63 Personen aus Portugal und Brasilien mit ganz unterschiedlichem Alphabetisierungsgrad, während sie lasen. Ergebnis: Die schulisch erworbene Lesefähigkeit steigert zwar, wie nicht anders zu erwarten, die Hirntätigkeit in Regionen, die mit Sprache zu tun haben. Doch das hat einen Preis. Jene Hirnregion, die nun auf das visuelle Erkennen von Wortformen programmiert ist, reagiert schwächer auf Gesichter und regelmäßige Muster als bei Analphabeten. Das spricht dafür, dass in dieser Region tatsächlich ein Recycling – ein Umfunktionieren und Spezialisieren auf Lesefähigkeit – stattgefunden hat.

Erklärt Dehaenes Recycling-Hypothese am Ende das Phänomen des »zerstreuten Professors«? Man kennt ja das Klischee des versponnenen Buchstabengelehrten, der im Alltag schlechter zurechtkommt als seine weniger belesenen Mitmenschen. Anscheinend hat sein Gehirn Areale, die sonst der Orientierung in der Umwelt dienen, darauf umprogrammiert, Wege durch das Labyrinth der Worte zu finden.



Michael Springer





MIKROBIOLOGIE

# Die gefährlichen Tricks der Bakterien

Krankheitserregende Bakterien sind äußerst raffiniert. Um zu überleben und sich fortzupflanzen, nutzen sie eine Reihe gewiefter Strategien. Jetzt arbeiten Mediziner daran, die Pathogene mit ihren eigenen Waffen zu schlagen.

Von B. Brett Finlay

*Helicobacter pylori* versteht es, sich im Magen eine vorteilhafte Umwelt zu schaffen. Einige Stämme des Bakteriums können schwere Geschwüre auslösen.

**W**enn Sie sich einmal einsam fühlen, denken Sie daran, dass Billionen von Mikroben in und auf einem Menschen hausen. Ihre Anzahl übersteigt die unserer Körperzellen um das Zehnfache. Zum Glück sind die meisten dieser Bakterien nicht schädlich: Von den zehntausenden schon bekannten Bakterienarten verursachen nur vielleicht 100 eine Krankheit.

Diese paar Hand voll Arten richten jedoch genug Schaden an. Infektionskrankheiten nehmen unter den Todesursachen den zweiten Rang ein, nach Folgen von Tabakkonsum. Pathogene Bakterien spielen dabei seit jeher eine unheilvolle Rolle. Allein Tuberkulose rafft jährlich etwa zwei Millionen Menschen dahin. Im 14. Jahrhundert erlag schätzungsweise ein Drittel der Bevölkerung Europas der Pest. Viele bakterielle Infektionen können Ärzte inzwischen zwar mit Antibiotika behandeln. Doch die Mikroben finden immer neue Wege, sich gegen die Medikamente zu wehren. In letzter Zeit häufen sich die Warnsignale von Medizinern, dass der Mensch in diesem Wettrüsten den Kürzeren zu ziehen droht. Das läge dann auch daran, dass wir die Pathogene längst noch nicht gut genug kennen.

Um die Angriffsstrategien bakterieller Erreger zu erforschen, war es üblich, sie in einem Nährmedium zu züchten und dann entweder daraus ihre Sekrete zu gewinnen oder Bestandteile von der Hülle der Erreger selbst zu isolieren. Mikrobiologen untersuchten anschließend, wie diese Substanzen auf Zellen von Menschen oder Tieren wirken, und entdeckten so wichtige bakterielle Gifte oder Toxine. Doch die meisten solchen Studien schenken dem direkten Wechselspiel zwischen Wirt und Erreger überhaupt keine Beachtung.

Das hat sich in den letzten 20 Jahren geändert. Wissenschaftler haben immer mehr Indizien dafür gesammelt, dass sich bakterielle Krankheitserreger im Körper oft ganz anders verhalten als in einer Nährkultur. Mit vielen hinterhältigen Tricks befallen die Pathogene Gewebe und Organe, wissen sich zur Wehr zu setzen, zu vermehren und im Organismus auszubreiten. Raffiniert nutzen sie die Zellen und deren Kommunikationssysteme für eigene Zwecke. Etliche Mikroben spritzen regelrecht spezielle Proteine in die feindlichen Zellen ein. Auf diese Weise programmieren sie die Zellma-

schinerie so um, dass sie ihnen gehorcht. Ein paar heimtückische Bakterien legen es sogar darauf an, dass willkommene und nützliche Mikroben verschwinden, mit denen sie sonst konkurrieren müssten.

Jede neue Erkenntnis dieser Art lässt die Forscher sogleich nach Therapien suchen, um den bakteriellen Krankheitserregern entgegenzutreten zu können. Dazu bemühen sie sich auch, die Mikroben mit ihren eigenen Waffen zu schlagen.

Zu den krank machenden Wirkungen von Bakterien zählen Toxine. Jedoch sind sie bei Weitem nicht die einzige Ursache für die schädlichen Effekte. Manche Symptome von bakteriellen Infektionen treten sogar als direkte Folge von Überlebensstrategien der Eindringlinge auf. Weil viele dieser Keime ein ähnliches Beschwerdebild mit Durchfall und Fieber hervorrufen, ist man leicht versucht anzunehmen, dass die unterschiedlichen Pathogene ähnlich vorgehen. Allerdings trifft das Gegenteil zu. Zwar verwenden viele in ihrer Zellmaschinerie teilweise gleiche Grundelemente, etwa bei den Proteinen für das innere Zellskelett. Doch beim Angriff benutzen die Erreger die verschiedenartigsten und oft hochkomplexe Methoden.

### Wie sich Bakterien Zutritt verschaffen

Schon den ersten Schritt – sich an eine Wirtszelle anzuhängen – meistern sie ganz unterschiedlich. Ein besonders raffiniertes Manöver vollführt der pathogene Stamm O157 des Darmbakteriums *Escherichia coli*. Gewöhnlich gelangt er zusammen mit verunreinigten Lebensmitteln in den Darm. Dort heftet er sich an die Darmwand und produziert ein Gift, das blutige Durchfälle auslöst.

Früher glaubten Forscher, dieser Stamm würde an im Darm schon vorhandene Rezeptoren andocken, also an Moleküle, welche die Darmzellen ohnehin besitzen. Doch in diesem Fall irrten sie. Denn O157 produziert seinen eigenen Zellrezeptor. Den schleust er in die Körperzelle ein, wofür das Bakterium sogar eigens eine Kanüle herstellt (im Kasten S. 26 linkes Bild und großes Bild, Nummer 1). Die Vorrichtung heißt T3SS, kurz für Typ-III-Sekretionssystem.

Der T3SS-Apparat injiziert wenigstens 40 so genannte Effektorproteine vom Bakterium in die Darmzelle beziehungsweise direkt in deren Außenmembran, darunter ein Protein namens Tir. An dieses bindet sich das Bakterium dann mit einem seiner eigenen Oberflächenmoleküle.

Das ist aber nur der Anfang. Denn Tir und einige andere fremde Proteine interagieren mit Aktin, einem Hauptbaustein des inneren Stützskeletts (Zytoskeletts) der Darmzelle. Dabei entstehen Aktinpolymere, welche die Zellmembran an der betreffenden Stelle nach außen drücken. Es bildet sich ein Sockel, auf dem sich *E. coli* O157 verankert (im Kasten S. 26 großes Bild, Nummer 1). Somit sitzt die Mikrobe sicher auf ihrem Thron außerhalb des Wirts und lässt ihre Effektoren und Toxine in der Zelle arbeiten. Im Einzelnen wissen wir noch nicht, welche Vorteile ihr das bringt. Forscher konnten aber zeigen, dass die Sockelstruktur für die Pathogenität dieses Bakteriums wichtig ist.

### AUF EINEN BLICK

#### NEUE STRATEGIEN GEGEN MIKROBEN

**1** Die meisten der Billionen Bakterien, die der Mensch trägt, sind unschädlich, viele sogar nützlich. Nur rund 100 Arten rufen Krankheiten hervor.

**2** Besonders raffinierte Strategien von bakteriellen Krankheitserregern entdecken Molekularmediziner oft erst, wenn sie erforschen, wie die Keime sich im Organismus verhalten und mit dessen Zellen interagieren. Viele Pathogene manipulieren den Wirt dabei zu ihren Gunsten.

**3** Auf Basis ihrer Erkenntnisse entwickeln Forscher jetzt neuartige Therapien; die ersten werden bereits klinisch erprobt.

Das Magenbakterium *Helicobacter pylori* stellt einen weiteren potenziell krank machenden Erreger dar. Dieser häufige menschliche Gefährte – weltweit trägt etwa jeder Zweite den Keim – heftet sich an der Mageninnenwand an Schleimhautzellen und setzt das Enzym Urease frei. Dieses neutralisiert die Magensäure in seiner Umgebung, denn die ist für die meisten Bakterien normalerweise tödlich. Nicht alle Stämme des Erregers machen krank. Die bedrohlichen aber können Magengeschwüre verursachen und sogar Magenkrebs (SdW 4/1996, S. 68, und 12/2005, S. 16). Bisher ist kein anderes Krebs auslösendes Bakterium bekannt.

Die pathogenen Stämme von *H. pylori* produzieren ein Typ-IV-Sekretionssystem, mit dem sie das Effektorprotein CagA in Magenschleimhautzellen injizieren. Noch ist die Bedeutung des Proteins nicht genau geklärt, doch nach neueren Studien könnte es die Schleimhautzellen dazu anregen, an ihrer Oberfläche mehr von den Rezeptoren – also Andockstellen – für *H. pylori* auszuprägen. Möglicherweise greift CagA auch in die Signalabläufe im Zellinnern ein, so dass die Zellen sich strecken, sich aus ihrem Verband lösen und schließlich absterben – eine Ursache von Magengeschwüren.

Anders gehen Bakterien der Gattung *Salmonella* vor, die eng mit *E. coli* verwandt sind. Jedes Jahr erkranken weltweit über eine Milliarde Menschen an Durchfällen durch Salmonellen. Diese Mikroben dringen selbst in die Zellen ein. Um sich gut vermehren zu können, wandern sie sogar durch sie hindurch zu den nächsten Zellen. Als ersten Schritt benutzt auch *Salmonella* eine T<sub>3</sub>SS-Kanüle, und zwar die Variante SPI-1 (für *Salmonella pathogenicity island 1*). Die eingespritzten Effektorproteine manipulieren die Bildung von Aktinfilamenten so, dass an der Zellmembran stark aufgeworfene Stellen entstehen (Kasten S. 26 großes Bild, Nummer 2), vergleichbar den Sockeln von *E. coli*.

Als Nächstes greift solch eine Verwerfung aus, umschließt das dort an der Zellmembran haftende Bakterium – und zieht es ins Zellinnere. Für den typischen Durchfall sorgen durch die Kanüle eingebrachte Moleküle. Doch damit lassen Salmonellen es noch nicht bewenden.

Normalerweise »fressen« und zerstören bestimmte Immunzellen – also Phagozyten wie die Makrophagen – jeden bakteriellen Eindringling. Sie verschlingen die Bakterien, schließen sie in membranumhüllte Bläschen – Vakuolen – ein und töten sie dann mit passenden Molekülen. *Salmonella* aber weiß dies zu verhindern. Wenn der Erreger die Darmwand passiert hat, trifft er auf Immunzellen, die schon auf ihn lauern. Er lässt sich zwar einfangen und in eine Vakuole einsperren – doch erzeugt er dann gleich eine andere T<sub>3</sub>SS-Sorte, die Variante SPI-2. Hierüber spuckt er Proteine aus, welche aus der Vakuole einen sicheren Ort für ihn machen, an dem er sich ungestört vermehren kann. Denn seine Moleküle verändern die Vakuolenmembran, und zerstörerische Substanzen der Immunzelle können nicht mehr eindringen.

Ohne das SPI-2-System besäße der Typhuserreger *Salmonella typhi* keine derartige Durchschlagskraft. Doch so überleben die Mikroben in Phagozyten, mit denen sie vom Darm



über Blut und Lymphe in andere Körperbereiche gelangen, etwa in Leber und Milz, die sie dann überschwemmen.

Viele pathogene Bakterien, die ernste Krankheiten hervorrufen, können längere Zeit in Wirtszellen überleben. Dazu gehören sowohl der Tuberkelbazillus *Mycobacterium tuberculosis* als auch der Erreger der Legionärskrankheit *Legionella pneumophila*. Letzterer injiziert über seinen T<sub>4</sub>SS-Apparat aus Vakuolen von Immunzellen heraus mindestens 80 verschiedene Effektoren in die Wirtszellen (Kasten S. 26 großes Bild, Nummer 5). Nur von wenigen kennen wir die Funktion. Jedenfalls sorgen einige dafür, die Vakuole in einen für das Bakterium sicheren Schutzraum zu verwandeln.

### Der Ursprung der Legionärskrankheit

Das Verhalten der Legionellen lässt erahnen, zu welchem Zweck die komplizierten Sekretionssysteme von Bakterien ursprünglich entstanden sind – nämlich offenbar nicht, um Menschen zu schaden. Vielmehr schützen sie wohl eigentlich vor angriffslustigen Einzellern in der Erde. Normalerweise setzt *Legionella* seinen T<sub>4</sub>SS-Apparat ein, wenn Bodenamöben es verschlingen, und überlebt dann. Vieles an diesen Amöben gleicht verblüffend Mechanismen von menschlichen Phagozyten. Der Name Legionärskrankheit geht darauf zurück, dass nach einem Veteranentreffen der American Legion in Philadelphia im Jahr 1976 viele Teilnehmer eine schwere Lungenentzündung bekamen, an der 34 von ihnen starben. Die Klimaanlage des Hotels hatte *Legionella*-haltige Amöben verbreitet, die mitsamt ihrer Fracht tief in die Lunge der Anwesenden gelangten. Ganz ähnlich wie Amöben nahmen dann in den Lungenbläschen Makrophagen die Mikroben auf – mit verheerenden Folgen.

Dass solche Bakterien sich ausgerechnet in Immunzellen häuslich einrichten – von denen sie eigentlich abgetötet werden sollen –, zeugt von der Vielfalt ihrer Möglichkeiten, sich die Maschinerie von Zellen zu Nutze zu machen. Auch manche anderen ihrer Überlebenstricks im Körper entstanden anscheinend als Maßnahme gegen einzellige Bakterienfresser und bewähren sich wegen der Ähnlichkeiten solcher Einzeller mit Immunzellen nun auch im neuen Kontext. Die

unterschiedlichen Weisen, wie Mikroorganismen der Abwehr des Wirts entgehen und Immunzellen sogar dazu abrichten, ihnen bei der Vermehrung zu helfen, gehören zu ihren raffiniertesten Erfindungen.

Geradezu hinterlistig geht der Pesterreger vor. *Yersinia pestis* wird durch Flohbisse von Ratten auf den Menschen übertragen und gelangt so direkt ins Blut. Versuchen dort Phagozyten die Mikroben aufzunehmen und zu vernichten, schleust der Erreger mit seinem T3SS-Apparat Effektorproteine in den Feind – vier davon sind bislang bekannt. Diese lähmen gemeinsam die Maschinerie der Immunzelle zum Verschlingen der Beute, bevor die Zelle richtig zuschnappen kann. Die lädierten Phagozyten wandern mitsamt den ihnen anhaftenden Pestbakterien mit dem Blutstrom weiter und bleiben in den Filtern der Lymphknoten hängen. Dort vermehrt sich der Erreger rasch, und es entstehen die äußerst

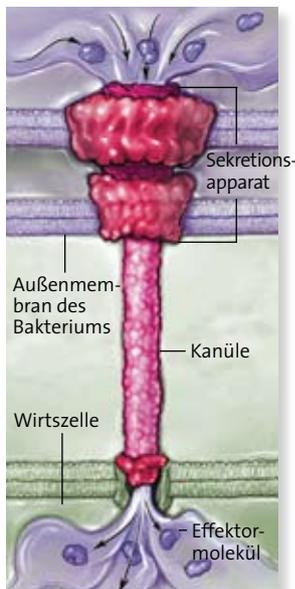
schmerzhaften massiven Schwellungen, die der Beulenpest ihren Namen gaben.

Viele pathogene Bakterien verwenden solche Sekretions- und Injektionssysteme, mit denen sie zelluläre Signal- und Immunreaktionen gezielt umprogrammieren können. So wartet unter anderem der Erreger der heftigsten Bakterienruhr oder Dysenterie, *Shigella dysenteriae*, dafür gleich mit einem ganzen Arsenal an Strategien auf. Genetisch ähneln Shigellen harmlosen Stämmen von *E. coli*. Doch sie verfügen über einen T3SS-Apparat, der 25 bis 30 Effektorproteine injiziert. Dadurch nehmen die Wirtszellen sie in ähnlicher Weise auf, wie dies bei Salmonellen der Fall ist. Anschließend manipulieren die Bakterien das Zellskelett des Wirts, mit dessen Hilfe sie nun durch ihn hindurchwandern (Kasten unten, großes Bild, Nummer 3). Sie gelangen so direkt in die nächste Zelle, ohne sich Immunzellen oder Antikörpern auszusetzen.

## Wie Bakterien Wirtszellen entern

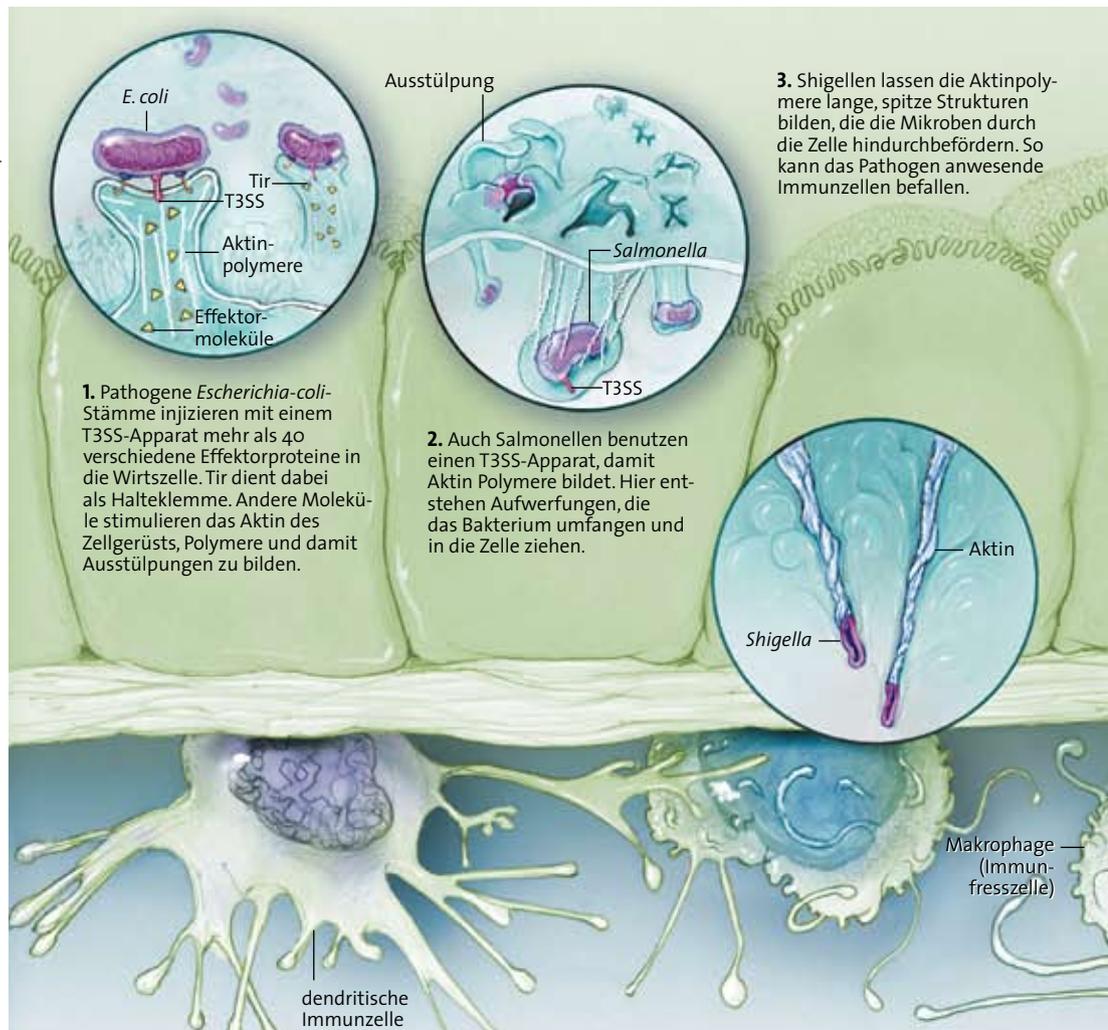
**Pathogene manipulieren Wirtszellen gern zum eigenen Nutzen.** Dazu verändern sie die Bedingungen inner- und außerhalb der

Zellen. Viele gefährliche Darmbakterien verwenden dabei erstaunlich komplexes Werkzeug (Bild ganz links).



### Sekretionssysteme

Mit speziellen Vorrichtungen injizieren Bakterien Effektormoleküle in Wirtszellen. Hier ein Typ-III-Sekretionssystem (T3SS)



Zwar verstehen wir noch nicht vollständig, wie Shigellen die Immunabwehr hintergehen und umprogrammieren. Doch klar ist: Mehrere Effektorproteine des Erregers greifen direkt auf Signalsysteme im Wirt zu. Sie unterdrücken einige der Notsignale, die eine infizierte Zelle normalerweise aussendet – jedoch nicht alle. Denn für sie ist wichtig, dass eine andere Sorte von Immunzellen, so genannte dendritische Zellen, alarmiert wird und am Ort des Geschehens erscheint. *Shigella* befällt nun auch diese Phagozyten – und benutzt sie quasi als trojanische Pferde, mit denen es die Darmwand überwindet. Dabei wird die Darmschleimhaut zerstört, was die schweren blutig-schleimigen Durchfälle der Bakterienruhr zur Folge hat.

Bakterien können das so genannte »angeborene Immunsystem« also auf vielerlei Art überlisten. Manche Erreger hintergehen aber auch die Reaktionen eines ganz anderen Teils

der Immunabwehr, das »erworbene Immunsystem«. Dieses kennzeichnen so genannte T-Zellen sowie B-Zellen, die Antikörper produzieren. »Antigenpräsentierende« Zellen des angeborenen Immunsystems (wie Makrophagen oder dendritische Zellen) schulen B-Zellen, die spezifischen Erreger an deren Oberflächenstrukturen – den Antigenen – zu erkennen.

Diesen Prozess unterlaufen verschiedene Bakterien, entweder indem sie ihre Oberflächenproteine regelmäßig austauschen oder indem sie Enzyme freisetzen, welche Antikörper verdauen. Einige Pathogene, auch der Ruhrerreger *Shigella*, können bereits die Herstellung von Antikörpern unterbinden. Sie verhindern, dass Phagozyten den T- und B-Zellen Bestandteile der verschlungenen Bakterien zum Kennenlernen vorweisen (»Antigenpräsentation«). Salmonellen wiederum können Phagozyten sogar in den Selbstmord treiben, bevor diese das erworbene Immunsystem alarmieren. Dazu setzt der Erreger in den Zellen eine entsprechende Signalkaskade in Gang (Kasten S. 28 rechts).

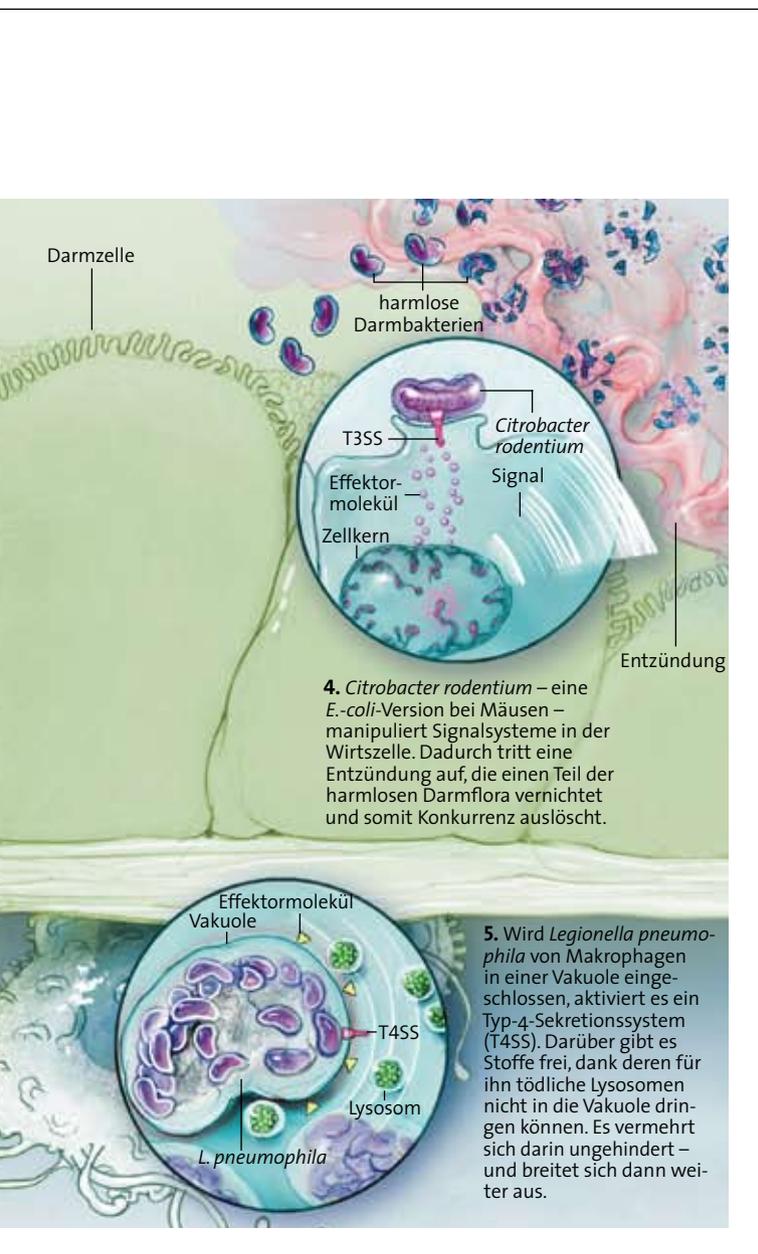
Das alles genügt aber längst noch nicht, damit die Pathogene sich im Körper auch gut vermehren. Denn dazu müssen sie mit Unmassen an harmlosen oder sogar für uns nützlichen Bakterien konkurrieren. Früher haben Mikrobiologen und Immunologen diese unzähligen Bewohner des Menschen kaum beachtet. Dabei besiedeln sie dicht sämtliche der Umwelt ausgesetzten Körperoberflächen – unter anderem auch die Schleimhäute des Magen-Darm-Trakts. Im Dickdarm etwa enthält jedes Gramm des Nahrungsbreis nahezu 60 Milliarden Bakterien, zehnmal so viel, wie Menschen auf der Erde leben.

### Konkurrenz im Darm

Solche Konkurrenz wird eine Mikrobe am leichtesten los, indem sie Durchfall auslöst. Doch es geht auch anders: Wie meine Kollegen und ich bei Mäusen beobachteten, verursacht ein naher Verwandter von pathogenen *E.-coli*-Stämmen namens *Citrobacter rodentium* im Darm der Nager gezielt Entzündungsreaktionen. Dabei erscheinen vor Ort viele Zellen des angeborenen Immunsystems und vernichten einen bestimmten Teil der gesunden Darmflora. Somit verschwinden Konkurrenten um Ressourcen, und *Citrobacter* vermag sich rapide zu vermehren. Bis sich die erworbene Immunabwehr formiert und den Erreger attackiert, beherrscht dieser das Terrain. Gewöhnlich wird er dann beseitigt. Daraufhin stellt sich bald die normale Darmflora wieder ein, und sie erreicht schließlich in etwa ihre ursprüngliche Dichte und Zusammensetzung.

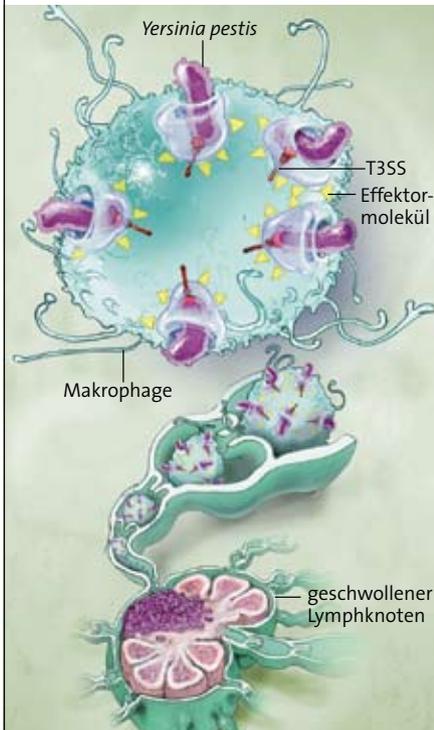
Eine Mausversion der Salmonellen richtet ihr Verhalten ebenfalls an der Darmflora des Wirts aus. Normalerweise verursacht dieses Bakterium bei den Nagern eine typhusähnliche generelle Erkrankung. Gibt man den Tieren jedoch vor der Infektion hoch dosierte Antibiotika und vermindert so die Darmflora, beschränkt sich die Erkrankung später nur auf den Magen-Darm-Trakt. Offenbar treibt erst die Konkurrenz diesen Erreger dazu, tiefer in den Körper vorzudringen.

Ein wichtiger Aspekt ist nicht zuletzt, dass die verschiedenen Bakterien im Körper voneinander Eigenschaften über-



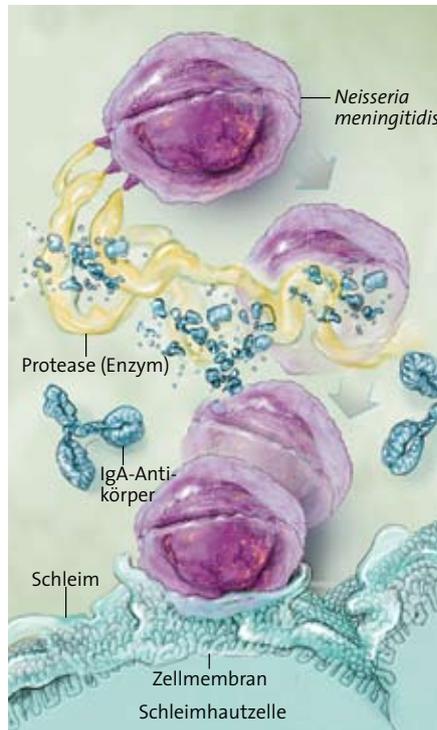
## Mit Hinterlist gegen die Immunabwehr

Eigentlich sollten Immunzellen und die von ihnen produzierten Antikörper Pathogene ausschalten. Bakterien unterlaufen das auf verschiedene Weise – hier drei Beispiele.



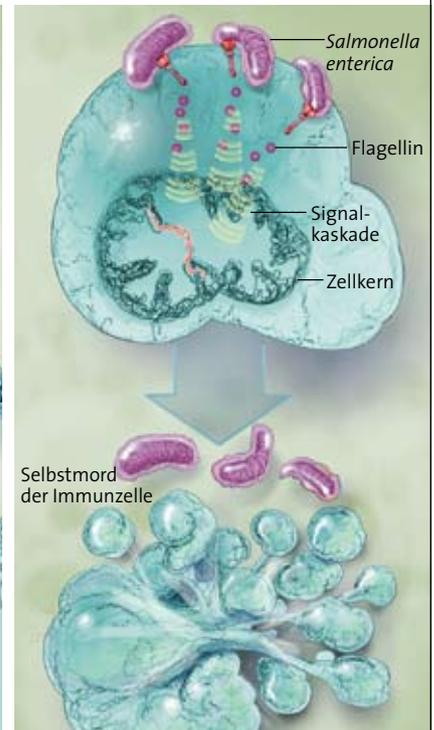
### Sabotage der Zellfunktionen

Droht ein Makrophage den Pesterreger zu verschlingen, spritzt *Yersinia pestis* mit dem T3SS-Apparat Moleküle in die Zelle, die den Fressapparat lähmen. Dann lässt sich die Mikrobe zu einem Lymphknoten mitnehmen und vermehrt sich dort.



### Antikörper zerstören

Eigentlich verhindern IgA-Antikörper, dass sich Mikroben an der Schleimhaut festsetzen, etwa in der Nase. Meningokokken, die Hirnhautentzündung hervorrufen können, zersetzen die Antikörper mit dem Enzym Protease.



### Zum Selbstmord bringen

Normalerweise schulen bestimmte Immunzellen, etwa Makrophagen, andere Immunzellen, spezifische Pathogene zu erkennen. *Salmonella enterica*, ein Durchfallerreger, schickt jedoch über einen T3SS-Apparat Flagellin in die Immunzellen. Daraufhin bringen sie sich selbst um.

ANDREW SWIFT

nehmen können. Gutartige und pathogene Keime wie auch Krankheitserreger untereinander können Waffen austauschen und sich auf die Weise neu rüsten. Tatsächlich entstanden viele pathogene Keime aus harmlosen Bakterien, die sich aus dem Genpool anderer Mikroorganismen bedienen. Für Mikroben stellt der Darm gewissermaßen ein genetisches Internet dar, in dem als Informationen Gene für Virulenzfaktoren verbreitet werden. Im Prinzip hat jeder dieser Organismen auf solche Werkzeuge Zugriff, zum Beispiel auf die Bestandteile eines Sekretionssystems oder bestimmte Effektorproteine.

Der Erwerb eines derartigen DNA-Abschnitts – einer Pathogenitätsinsel – erlaubt dem Bakterium unter Umständen, eine neue Wirtsart zu befallen oder sich aggressiver zu verhalten. Beispielsweise dürfte der gefährliche *E. coli*-Stamm O157 erst in den späten 1970er Jahren aufgetreten sein. Eine eher gutartige *E. coli*-Variante scheint sich in diesem Fall eine T3SS-Pathogenitätsinsel angeeignet zu haben sowie das Gen

für ein so genanntes Shiga-Toxin. Dieses Gift produziert sonst eigentlich der Erreger der Bakterienruhr. Die Kombination der beiden Eigenschaften bewirkt die für O157 typischen schweren Durchfälle und Nierenschäden.

Wie können wir nun all diese neuen Erkenntnisse medizinisch nutzen? Für gewöhnlich bekämpfen Ärzte Bakterieninfektionen mit Antibiotika, die den Erreger direkt vernichten sollen. Jetzt entwickeln die Forscher viele Ideen für weiterreichende Therapien und sogar vorbeugende Maßnahmen.

So entwarf meine Arbeitsgruppe einen neuen Impfstoff gegen O157. Er enthält Bestandteile des T3SS-Apparats von O157 sowie mehrere seiner Effektorproteine. Durch diesen Impfstoff soll das Immunsystem lernen, ebenjene Moleküle im Ernstfall sofort zu erkennen und zu inaktivieren – noch bevor *E. coli* sein Sekretionssystem effektiv einsetzen kann. Das Besondere an unserem Ansatz: Geimpft werden nicht Menschen, sondern Kühe. Rinderbestände sind ungefähr zur Hälfte von O157 besiedelt, allerdings schadet ihnen der

Stamm nicht. Leider gelangen die Bakterien von dort aus aber immer wieder über Fäkalien in Lebensmittel oder Trinkwasser. Wird der Erreger gleich an seiner Quelle zurückgehalten, sollte er den Weg zum Menschen erst gar nicht finden, so unser Ansatz. In Kanada verwenden Farmer die Vakzine bereits; in den USA läuft das Zulassungsverfahren.

Andere Forscher möchten zum Beispiel Virulenzfaktoren durch Blockade von deren Genen ausschalten. Wieder andere entwickeln Moleküle, die sich an die Adhäsionsmoleküle eines Bakteriums lagern und damit seinen Zugang zum potenziellen Wirt verhindern. Ein solches Antiadhäsion, das sich gegen pathogene *E. coli*-Stämme richtet, wird bereits klinisch erprobt, und mehr Wirkstoffe dieser Art könnten bald folgen.

Weitere Ansätze zielen darauf ab, die Kommunikation von Bakterien untereinander oder mit Wirtszellen zu unterbinden. *E. coli* gehört zu den Mikroben, die ihren Platz im Darm einschätzen, indem sie auf chemische Signale der normalen Standortflora wie auch der Wirtszellen achten. Das verwenden sie bei ihrer Entscheidung für oder gegen einen Angriff.

Der Eitererreger *Pseudomonas aeruginosa*, ein problematischer, weil sehr widerstandsfähiger Krankenhauskeim, bildet in der Lunge Kolonien in Form von Biofilmen. Wie Forscher der Universität Kopenhagen kürzlich erkannten, senden einige der *Pseudomonaden* Warnsignale aus, die anzeigen, dass sich Immunzellen nähern. Daraufhin setzen andere Bakterien im Biofilm ein für Immunzellen tödliches Peptid frei.

### Anregung für die Medizin

Bakterien benötigen die Virulenzfaktoren gewöhnlich nicht unbedingt zum Überleben außerhalb des Körpers. Während konventionelle Antibiotika die Pathogene abtöten, würden die Erreger mit den neuen Maßnahmen am Leben bleiben, doch sie wären entwapfnet und somit harmlos. Die bei Antibiotika so problematischen Resistenzen gegen ein Medikament würden sich damit wohl langsamer bilden – wenn überhaupt.

Indirektere Maßnahmen sollen den Pathogenen den Aufenthalt im Menschen von vornherein verleiden. Das Ziel besteht bei dieser Strategie darin, die Mikroflora des Wirts so zu manipulieren und zu stärken, dass sie für den Krankheitskeim eine ernste Konkurrenz darstellt, so dass ihm diese Umgebung nicht mehr behagt. Allgemein bekannt sind die so genannten Pro- und Präbiotika in Nahrungsmitteln zur Unterstützung einer gesunden Darmflora. Zu Ersteren gehören etwa »gesunde« Bakterien wie Laktobazillen, zu Letzteren Ballaststoffe. Allerdings fehlen dazu bisher umfassende Studien, die aufzeigen, von welchen Keimen wir am meisten profitieren würden. Bisher ließen sich zudem noch keine speziellen Bakterien identifizieren, die einer etablierten Infektion entgegenwirken könnten.

Weiter gediehen sind Ansätze, Immunzellen gegen Bakterien aufzustacheln und sie zu stützen. Als Zusätze von Impfstoffen – Adjuvanzen – sind viele immunstimulierende Substanzen schon jetzt ohne schädliche Nebenwirkungen im Einsatz. Derzeit prüfen bereits mehrere Biotechnologiefir-

men Mittel, die Immunreaktionen intensivieren oder zielgenauer ausrichten. Teils laufen hierzu schon erste klinische Studien. Man hofft, damit andere Therapieformen zu optimieren, eine Infektion von vornherein zu verhindern oder sogar eine ausgebrochene Erkrankung zu behandeln.

Hier gilt es jedoch die vielleicht größte Hürde zu meistern: günstige Begleiterscheinungen von Entzündungen von deren schädlichen Wirkungen zu entkoppeln. Die Immunzellen sollen den Eindringling bekämpfen, ohne dass die Immunaktivierung dem Patienten arg zusetzt. Dieses Ziel scheint erreichbar.

So entdeckte meine Arbeitsgruppe zusammen mit Robert Hancock, ebenfalls an der University of British Columbia in Vancouver (Kanada), ein vermutlich gut geeignetes Abwehrpeptid. Zellen des angeborenen Immunsystems produzieren als Reaktion auf Krankheitserreger verschiedene solche kleinen Proteine oder Peptide. Manche davon befallen und töten Bakterien, andere stellen Signale für Immunzellen dar. Zur zweiten Fraktion gehört das von uns gefundene Peptid IDR-1. Es veranlasst dendritische Immunzellen, Makrophagen (Fresszellen) herbeizurufen, bringt sie jedoch nicht dazu, auch Entzündungsprozesse auszulösen. Ein Medikament, das auf diesen Forschungen fußt, erzeugt im Tierversuch den erhofften Effekt: Es dämpft die Entzündung, aber die erwünschten Immunzellen wandern zum Infektionsort.

Mikroben haben gelernt, Signale von Immunzellen zu manipulieren. Diese Pathogene gehen oft höchst raffiniert vor – weil sie mit ihren Wirten evolviert sind und ihre Waffen genau auf diese Organismen abgestimmt haben. Warum sollte uns das umgekehrt nicht auch bei den Bakterien gelingen? In den letzten Jahrzehnten hat die Mikrobiologie unser Wissen über Immun- und Krankheitsprozesse stark vorangetrieben. Auch wie das Verhalten von Pathogenen, Wirtsorganismus und der normalen Mikrobenbesiedlung ineinandergreifen, verstehen wir immer besser. Nun gilt es, die neuen Erkenntnisse in Therapien umzusetzen. ~

### DER AUTOR

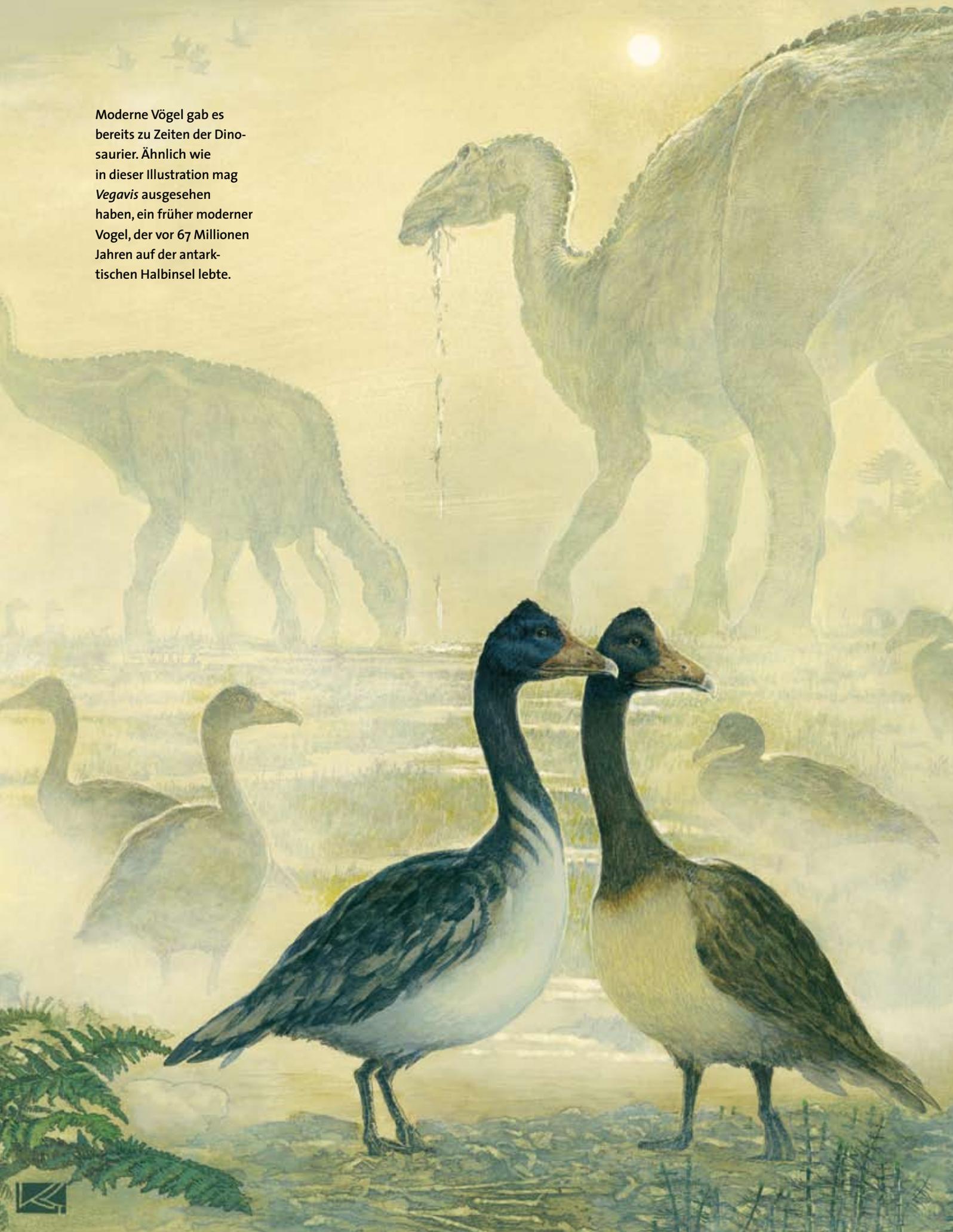


**B. Brett Finlay** forscht an der University of British Columbia in Vancouver (Kanada) als Peter Wall Distinguished Professor an den Michael Smith Laboratories, der Abteilung für Biochemie und Molekularbiologie sowie der Abteilung für Mikrobiologie und Immunologie. Finlay ist Mitbegründer des Unternehmens Inimex Pharmaceuticals sowie Direktor der SARS Accelerated Vaccine Initiative.

### QUELLEN

- Bhavsar, A. P. et al.:** Manipulation of Host-Cell Pathways by Bacterial Pathogens. In: *Nature* 449, S. 827–834, 2007
- Croxen, M. A., Finlay, B. B.:** Molecular Mechanisms of *Escherichia coli* Pathogenicity. In: *Nature Reviews Microbiology*, online, 7. Dezember 2009
- Scott, M. G. et al.:** An Anti-Infective Peptide that Selectively Modulates the Innate Immune Response. In: *Nature Biotechnology* 25, S. 465–472, 2007

Moderne Vögel gab es bereits zu Zeiten der Dinosaurier. Ähnlich wie in dieser Illustration mag *Vegavis* ausgesehen haben, ein früher moderner Vogel, der vor 67 Millionen Jahren auf der antarktischen Halbinsel lebte.



EVOLUTION

# Zeitgenossen der Dinosaurier

Moderne Vögel entstanden erst nach dem Untergang der Dinosaurier – so dachten Biologen lange. Neue Funde zeigen jedoch, dass sie schon in der Kreidezeit den Himmel bevölkerten. Nur: Wie überlebten ausgerechnet sie das Massensterben vor 65 Millionen Jahren?

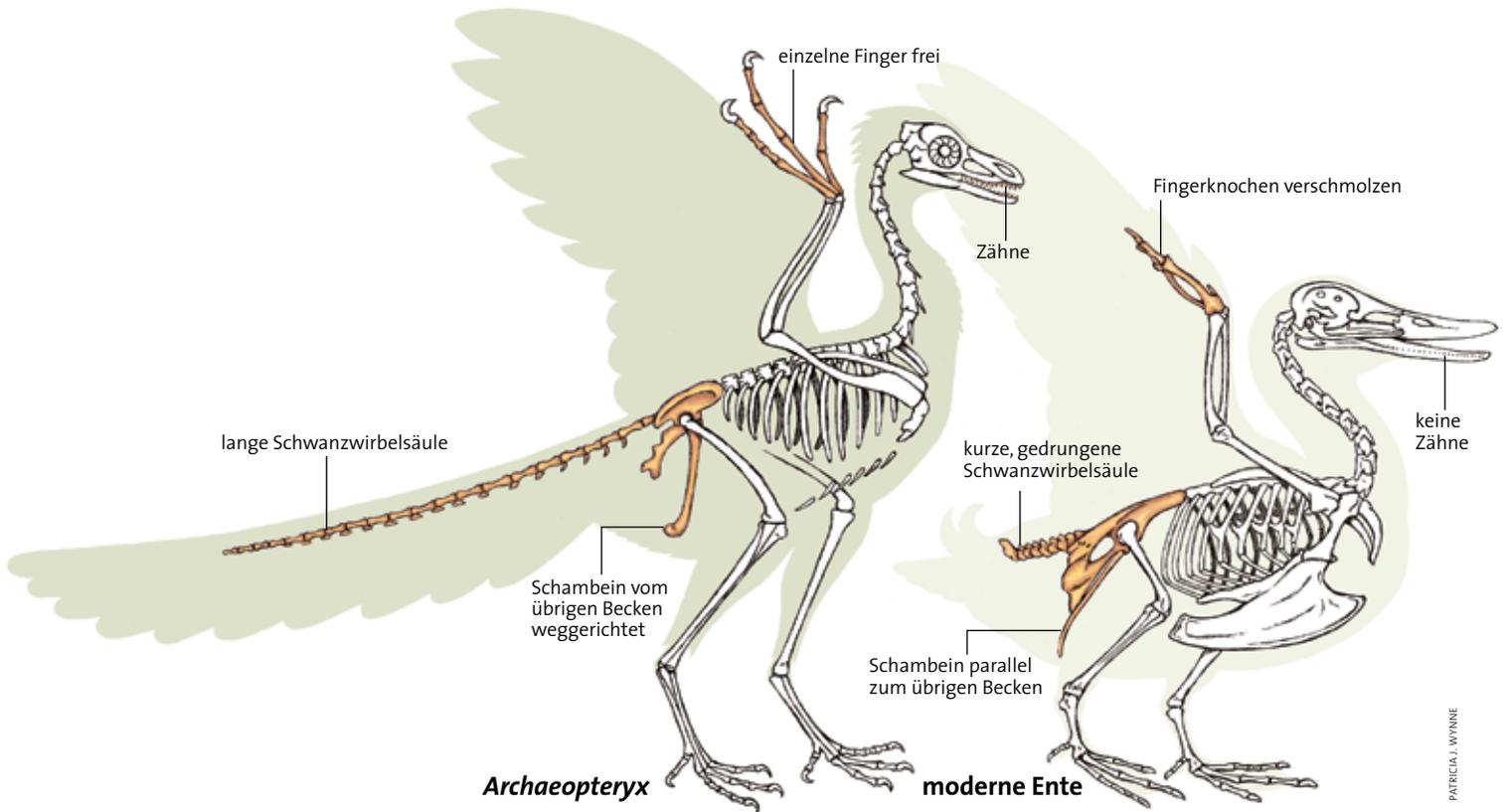
Von Gareth Dyke

**D**ezember 2001 – ein eisiger Tag in Moskau, es herrschen unter 15 Grad minus. Mehrere Stunden lang habe ich heute im paläontologischen Museum Fossilien aus der Mongolei in Augenschein genommen. Jetzt sitze ich zusammen mit meinem Kollegen Evgeny N. Kurochkin von der Russischen Akademie der Wissenschaften in einer kleinen Bar. Die Heizung hat den Geist aufgegeben, und ich trinke in Wintermantel und Handschuhen einen Wodka gegen die Kälte.

Kurochkin und ich haben uns vorgenommen, sämtliche im Museum aufbewahrten Vogelfossilien von sowjetisch-mongolischen Expeditionen zu begutachten. Heute untersuchten wir insbesondere die Reste eines kleinen Flügels aus der Wüste Gobi, den Paläontologen schon 1987 bargen. Das zarte Fossil mit seinen verschobenen und zerdrückten Knochen wirkt neben den Dinosaurierskeletten des Museums geradezu mickrig. Trotzdem hat es für die Wissenschaft eine große Bedeutung, widerlegt es doch die herkömmliche Auffassung von der Vocelevolution.

Von allen Landwirbeltieren bilden die heute lebenden Vögel mit Abstand die vielseitigste Klasse. Manche der über 10 000 Arten leben die meiste Zeit des Jahres auf offener See, andere in der Wüste, wieder andere hausen hoch in Schneegebirgen. Noch vor wenigen Jahren glaubten Evolutionsbiologen, die Vögel, wie wir sie heute kennen, seien erst nach dem Ende der Dinosaurier aufgetreten und konnten sich dann richtig entfalten – also nach dem mutmaßlichen Asteroideneinschlag vor rund 65 Millionen Jahren, in dessen Folge am Ende der Kreidezeit außer den Riesenreptilien auch viele andere Landwirbeltiere ausstarben. Zwar waren schon Vogelfos-

KAZUHIKO SANO



PATRICIA J. WYNN

silien aus der Zeit vor diesem Massensterben bekannt – aber nur solche von Urvögeln wie *Archaeopteryx* und verschiedenen anderen eher urtümlichen Gruppen. Arten mit modernem Körperbau, die zum Beispiel aussahen wie Enten, Kuckucke oder Kolibris, waren nach den damals existierenden Fossilfunden durchweg jünger. All die verschiedenen Linien der modernen oder »neuen« Vögel – wissenschaftlich Neornithinen – schienen somit erst nach der Dinosaurierkatastrophe aufgetreten zu sein, als viele ökologische Nischen plötzlich leer wurden. Denn damals verschwanden nicht nur die Flugsaurier, sondern auch die bekannten archaischen Vogellinien – bis auf eine, aus der nach dieser Auffassung später die modernen Vögel hervorgingen. Diese Linie hätte, so lernten Generationen von Biologiestudenten, nun plötzlich Platz gehabt, um sich auszubreiten und weiterzuentwickeln.

### Aufspaltung in verschiedene Linien

Doch in den letzten zehn Jahren änderte sich das Bild. Hierzu trugen Fossilien wie jene kleine zerdrückte Schwinge aus der Mongolei bei, aber auch Analysen der DNA heute lebender Vögel. Demnach haben sich die Neornithinen schon vor dem Untergang der Dinosaurier längst in verschiedene Linien aufgespalten. Ihre Nachfahren stellen die heutigen Vögel dar.

Der Ursprung der Vögel war unter Paläontologen auch noch in anderer Hinsicht lange ein Streitpunkt. Denn unklar blieb zunächst, von welcher Reptiliengruppe sie wohl abstammten. Ein Teil der Forscher behauptete, dass sie aus kleinen Theropoden, zweibeinigen Raubsauriern, hervorgegangen waren – und somit der Gruppe, der auch die Tyrannosaurier angehörten. Andere Paläontologen meinten dage-

**Vögel stammen von kleinen Raubsauriern ab. Urvögel wie *Archaeopteryx*, der vor 145 Millionen Jahren lebte, ähnelten in vielem noch diesen Theropoden. Etliche ihrer Merkmale haben die Vögel später abgewandelt, oder sie verschwanden ganz.**

gen, die Vögel hätten sich schon früher von einer älteren Reptiliengruppe abgespalten. Nachdem aber in den letzten 20 Jahren eine Reihe Fossilien von vogelähnlichen Theropoden aufgetaucht sind, von denen viele sogar Daunenfedern trugen, vertreten die meisten Forscher heute die erste These (siehe auch SdW 10/2003, S. 32).

Die Beziehung dieser urtümlichen Tiere zu den modernen Vögeln blieb allerdings weiterhin unklar. Der älteste bekannte Vogel ist *Archaeopteryx*. Er lebte vor 145 Millionen Jahren. Einschließlich der ersten Fossilfunde dieses Urvogels aus der Mitte des 19. Jahrhunderts sind den Paläontologen heute zehn Exemplare bekannt, alle aus Süddeutschland. *Archaeopteryx* gilt als das früheste Lebewesen, das eindeutig Flügel mit asymmetrischen Schwungfedern besaß – die Voraussetzung, um beim Fliegen Auftrieb zu erzeugen, und ein Charakteristikum der Vögel.

Modernen Vögeln glich *Archaeopteryx* allerdings noch wenig. Eher ähnelte er manchen kleineren Dinosauriern, wie *Velociraptor*, *Deinonychus*, *Anchiornis* und *Troodon*. Inzwischen kennen wir mehr frühe Vögel: *Jeholornis* etwa wurde in China entdeckt, *Rahonavis* auf Madagaskar. Sie alle hatten unter anderem noch eine lange Schwanzwirbelsäule – wie die genannten Dinosaurier. Einige Urvögel trugen auch noch scharfe Zähne (siehe auch SdW 9/2000, S. 12).

All das kommt bei modernen Vögeln nicht mehr vor. Ihr Skelett hat sich ans Fliegen angepasst und ist deswegen besonders leicht gebaut. Die Schwanzwirbelsäule hat sich stark verkürzt, und die Handknochen sind verschmolzen. Finger fehlen ihnen, doch Arme und Handgelenke wurden besonders beweglich (siehe Bild links). Auch fällt das große Brustbein auf, an dem der Flugmuskel ansetzt. Zu gern hätten die Ornithologen gewusst, wann – und auch wie – diese modernen Merkmale entstanden sind. Doch uns fehlten dazu die Fossilfunde.

### Artenreichtum in der frühen Kreidezeit

Vogelfossilien für die fragliche Zeitspanne gab es zwar genug – nur eben nicht die richtigen. Dank solcher Überreste wussten wir aber zumindest, dass die Vögel bereits vor über 100 Millionen Jahren, also in der frühen Kreidezeit, eine breite Palette von Fluganpassungen und ökologischen Spezialisierungen ausgebildet hatten. Manche Arten verfügten über große, breite Schwingen, manche über lange, schmale Flügel. Einige waren Waldbewohner und ernährten sich von Insekten und Früchten. Andere lebten an Seeufern oder auf dem Wasser und fraßen Fische.

Die damalige Vielfalt erstaunt – und sie währte bis in die letzten Stadien der Kreidezeit, die vor 65 Millionen Jahren endete und vom Tertiär abgelöst wurde. Zusammen mit niederländischen Kollegen vom Naturhistorischen Museum in Maastricht untersuchte ich Vögel mit Zähnen, die ganz am Ende dieser Periode lebten. Ihre Fossilien stammen aus einer Schicht unmittelbar unter jenem geologischen Horizont, der das große Aussterben am Ende der Kreidezeit markiert.

Leider gehörten bis vor Kurzem alle für eine Zuordnung ausreichend erhaltenen kreidezeitlichen Vogelfossilien zu damals ausgestorbenen Evolutionslinien. Auch hatten alle diese Linien einen älteren Ursprung als die Gruppe der modernen Vögel. Da wundert es nicht, dass Paläontologen lange annahmen, die modernen Vögel seien überhaupt erst nach dem Untergang der Dinosaurier aufgetreten und hätten sich erst später vielfältig aufgezweigt. Schließlich war das die plausibelste und einfachste Deutung der vorliegenden Befunde.

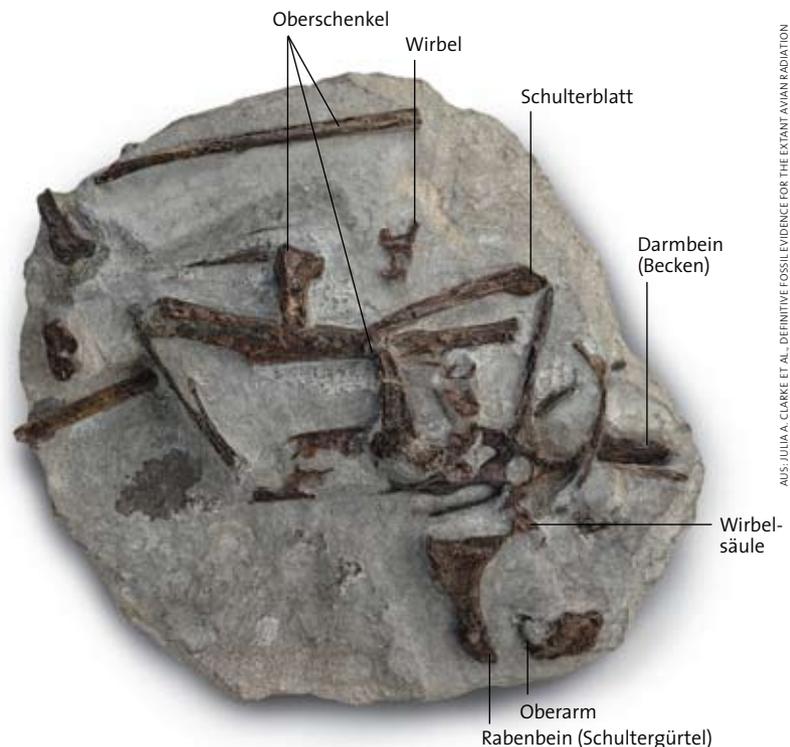
#### AUF EINEN BLICK

#### ÜBERLEBEN NACH DER KATASTROPHE – DIE HERKUNFT DER MODERNEN VÖGEL

**1** Alle Vögel stammen von kleinen, Fleisch fressenden Dinosauriern ab, den Theropoden. Nach herkömmlicher Auffassung entstanden die modernen Gruppen aber erst nach Ende der Kreidezeit.

**2** DNA-Vergleiche und neue Fossilfunde zeigen jedoch, dass die modernen Vögel viel älteren Ursprungs sind.

**3** Noch wissen Forscher nicht, warum vor 65 Millionen Jahren alle anderen Vogellinien mit den Dinosauriern untergingen, die Vorfahren der heutigen Vögel sich aber behaupten konnten. Möglicherweise bescherte ihnen eine vielseitige Ernährungsweise einen Überlebensvorteil.



Dieses Fossil von der antarktischen Vega-Insel gehört zu den wichtigsten Beweisstücken für die frühe Existenz moderner Vögel. Auf der hier abgebildeten Seite des Fossils sieht man rechts von der Mitte Teile der Wirbelsäule.

Zweifel an dieser Vorstellung kamen zunächst von ganz anderer Seite: der Molekulargenetik. In den 1990er Jahren begannen Forscher zunehmend, genetische Sequenzen (DNA-Abschnitte) heute lebender Organismen zu vergleichen, um anhand dessen die Abstammungsverhältnisse zu rekonstruieren – und auch das Alter von einzelnen Gruppen zu berechnen. In manchen Bereichen des Erbguts häufen sich über lange Zeiträume Mutationen mit einer zeitlich recht gleichmäßigen Rate an. Forscher sprechen sogar von einer molekularen Uhr, die relativ konstant tickt. An der Anzahl von Unterschieden in solchen DNA-Abschnitten zweier Organismen schätzen sie somit ab, seit wann deren Entwicklungslinien getrennt verliefen.

Schon früher hatten Molekularbiologen das klassische Bild von der Vogelevolution in Frage gestellt, schließlich gab es auf ihrem Gebiet einige nicht stimmige Befunde. So war es nur folgerichtig, das Alter der Hauptgruppen der modernen Vögel mit Hilfe der molekularen Uhr zu ermitteln. Die Wissenschaftler untersuchten zum Beispiel, wann sich die Vorfahren der Urkiefervögel (Palaeognathae) und der Hühner- und Gänsevögel (Galloanserae) voneinander getrennt hatten. Beide Gruppen gelten als besonders ursprünglich. Zur ersten gehören große, meist flugunfähige Arten wie Strauß und Emu, zur zweiten unter anderem Hühner, Enten, Gänse und Schwäne. Das Ergebnis: Die zwei Vogellinien scheinen bereits in der Kreidezeit entstanden zu sein, also lange vor

dem großen Aussterben. Ähnlich frühe Abstammungsdaten erhielten die Forscher auch für andere Vogelgruppen. Demnach hätten moderne Vögel schon zeitgleich mit Dinosauriern gelebt.

Anfangs begegneten die Paläontologen diesen Analysen, wie überhaupt dem ganzen molekularen Ansatz, höchst skeptisch – widersprachen sie doch allem, was sie bisher wussten. Doch die Befunde waren so überzeugend, dass auch die Fossilforscher sich schließlich an befremdliche Vorstellungen gewöhnten: dass etwa ein Rotkehlchen auf einem *Velociraptor* ritt oder eine Ente neben einem *Spinosaurus* schwamm. Ganz zufrieden waren wir aber noch nicht – denn wir wollten den Zusammenhang anhand von Fossilien gern selbst untermauern.

Die ersten Chancen dazu ergaben sich bald nach der Jahrtausendwende. Es fing mit dem kleinen Vogelflügel aus der Mongolei an, den Evgeny Kurochkin und ich damals in Moskau untersuchten. Evgeny war dieses Fossil schon 1987 aufgefallen, und er hatte mir damals gleich mitgeteilt, bei ihm erwecke dieses Tier den Eindruck, als handle es sich um ein Mitglied der Presbyornithiden – einer ausgestorbenen Gruppe entenähnlicher Vögel aus der Verwandtschaft von modernen Enten und Gänsen. Doch das schien uns allen in der Phase völlig unmöglich, weil dieses Fossil 70 Millionen Jahre alt war und somit aus der Kreidezeit stammte. Damals konnte es jene Gruppe überhaupt noch nicht gegeben haben, so glaubten wir.



In jenem kalten Dezember Ende 2001 in Moskau bewiesen wir das Gegenteil. Denn unsere Studien ergaben eindeutig: Dieser Flügel stammte tatsächlich schon von einem Presbyornithiden. Wir erkannten das an den verschmolzenen Knochen des Handskeletts und einigen anderen anatomischen Details, die beispielsweise auf den Aufbau des Muskel- und Sehnenapparats schließen lassen. Ganz klar hatten wir hier einen Flügel des bis dahin ältesten modernen Vogels vor uns – wissenschaftlich gesagt: den ältesten eindeutig bestimmten Repräsentanten der Neornithinen. Zu den Vorhersagen der Molekularbiologen passte das bestens. Als wir diesen Vogel im Jahr darauf beschrieben, gaben wir ihm den Gattungsnamen *Teviornis*. Die ersten beiden Silben wählten wir nach dem Finder des Skeletts, Victor Tereschenko; griechisch *ornis* bedeutet Vogel.

### Eine weitere Gattung: *Vegavis*

Im Jahr 2005 erhielt *Teviornis* Gesellschaft. Das betreffende Fossil hatten Paläontologen schon in den 1990er Jahren auf der Vega-Insel im Weddell-Meer östlich der antarktischen Halbinsel entdeckt. Diese Insel ist für ihren Reichtum an Dinosaurierfossilien bekannt. Der Fund blieb wenig beachtet, bis Julia A. Clarke, heute an der University of Texas in Austin, und ihre Kollegen die Skelettreste eingehend untersuchten (Bilder S. 30 und 33). Sie gaben dem Tier den Gattungsnamen *Vegavis* (lateinisch *avis*: Vogel).

Ihre Studien ergaben: Auch *Vegavis* war ein früher moderner Vogel der Kreidezeit. Er wies etliche Merkmale moderner Enten auf, insbesondere am Schultergürtel und Becken, an den Flügelknochen und Unterschenkeln. Dieses Tier lebte vor etwa 66 bis 68 Millionen Jahren, also etwas später als *Teviornis*, jedoch ebenfalls noch eindeutig vor dem Massensterben am Ende der Kreidezeit. Überdies ist das Skelett dieses frühen Vogels erfreulicherweise in großen Teilen erhalten, ganz anders als bei *Teviornis*.

Der Fund von *Vegavis* überzeugte die Paläontologen, dass moderne Vögel schon in der Kreidezeit vorkamen. Die neue Erkenntnis veranlasst nun viele Forscher, Fossilien aus der fraglichen Zeit nochmals genauer zu untersuchen. Schon jahrelang hatte die Ornithologin Sylvia Hope von der California Academy of Sciences in San Francisco behauptet, bestimmte versteinerte Knochen aus New Jersey und Wyoming gehörten zu modernen Vögeln. Diese Überreste sind zwischen 80 und 100 Millionen Jahre alt. Ihre Kollegen hielten das Material für zu dürftig für dermaßen weit greifende Aussagen, weil es sich in den meisten Fällen nur um einzelne Knochen handelt. *Vegavis* und *Teviornis* lassen nun vermuten, dass Hope Recht haben könnte. Vergleiche dieser einzel-

Der Urvogel *Archaeopteryx* besaß noch Zähne und Finger sowie einen langen Schwanz. Mit seinen Schwingen konnte er beim Fliegen Auftrieb erzeugen, doch war er in der Luft weniger wendig als moderne Vögel. Die Krallen an allen vier Extremitäten sprechen aber für einen Kletterkünstler.



nen Knochen mit vollständigeren fossilen Skeletten dürften in dieser Sache Klarheit bringen.

Zu wissen, dass die modernen Vögel schon aus der Kreidezeit stammen, wirft allerdings neue Fragen auf. Denn wieso hat ausgerechnet diese Gruppe die Verheerungen durch den Asteroideneinschlag überlebt? Die ursprünglicheren Vogelarten gingen in den dadurch ausgelösten ökologischen Umwälzungen unter, und auch die Flugsaurier starben aus. Vielleicht handelt es sich dabei um das letzte große Rätsel der Vögel-Evolution, dessen Lösung ich selbst aktuell einen Großteil meiner Zeit widme.

Die Hand voll Fossilien aus der Kreidezeit, die den modernen Vögeln bisher sicher zugeordnet werden können, liefern letztlich zu wenige Anhaltspunkte, um in diesem Punkt wirklich weiterzukommen. Wertvolle Einsichten hierzu bringen hingegen Studien über die heutige Vogelwelt. So haben britische Kollegen und ich umfangreiche Datensammlungen von Vogelvermessungen moderner Populationen ausgewertet und mit den Maßen verschiedener fossiler Vögel verglichen. Dabei stellte sich beispielsweise heraus, dass die Flügelknochen von kreidezeitlichen modernen Vögeln dieselben Proportionen aufwiesen wie bei den urtümlicheren Enantiornithinen – einer Vogellinie, die am Ende der Kreidezeit ausstarb. Das gilt auch für *Teviornis* und *Vegavis*. Anhand der Daten von heutigen Vögeln konnten wir in etwa auf die Flügelform und somit das Flugvermögen schließen. Beides scheint sich zwischen den beiden Gruppen nicht unterscheiden zu haben, wohingegen sich die noch therapodenähnlichen, viel älteren Urvögel wie *Archaeopteryx* in der Luft höchstwahrscheinlich schlechter bewegten. Was das Fliegen betraf, waren die frühen modernen Vögel ihren später ausgestorbenen Zeitgenossen also wohl nicht überlegen. Warum überlebten sie dann?

Vielleicht war die Ernährungsweise der entscheidende Faktor. In den letzten Jahren habe ich untersucht, in welcher Art von Umwelt Vögel vor 60 Millionen Jahren und in der Zeit danach lebten, also kurz nach dem Massensterben vor 65 Millionen Jahren. Fast alle diese – nun ausschließlich modernen – Vögel bevorzugten offenbar Wassernähe und feuchte Lebensräume, zum Beispiel Küsten, Seen, Flussufer oder das offene Meer. Viele heutige Vögel, die solche Umwelten bewohnen, etwa Enten, gelten als so genannte Generalisten:

Sie fressen die verschiedensten Sachen, ob Gras, Schnecken oder Käfer. Hatten die modernen Vögel der Kreidezeit etwa einen besonders vielseitigen Speiseplan, der ihnen über die Katastrophe hinweghalf? Immerhin ähnelten sie laut heutigem Wissensstand tatsächlich Enten.

Im Gegensatz dazu lebten die damals ausgestorbenen kreidezeitlichen Vogelarten anscheinend in ganz unterschiedlichen Umgebungen – manche ebenfalls am Meer, manche im Binnenland, andere in Wüsten oder in Wäldern. Das spricht dafür, dass diese Arten womöglich eher Nahrungsspezialisten waren. Vielleicht hatten sie sich jeweils auf eine bestimmte enge Nahrungsnische eingestellt. Dann wäre das Erfolgsgeheimnis der modernen Vögel schlicht ihre geringere Spezialisierung und damit höhere Flexibilität und Anpassungsfähigkeit gewesen.

So einleuchtend das klingt – noch ist diese Erklärung nicht mehr als eine These. Um herauszufinden, was die Vögel-Evolution nach der Kreidezeit beflügelte, müssen wir nun vor allem eines leisten: mehr aussagekräftige Fossilien finden – gleichgültig ob im Freien oder in Museumsschubladen. ~

#### DER AUTOR



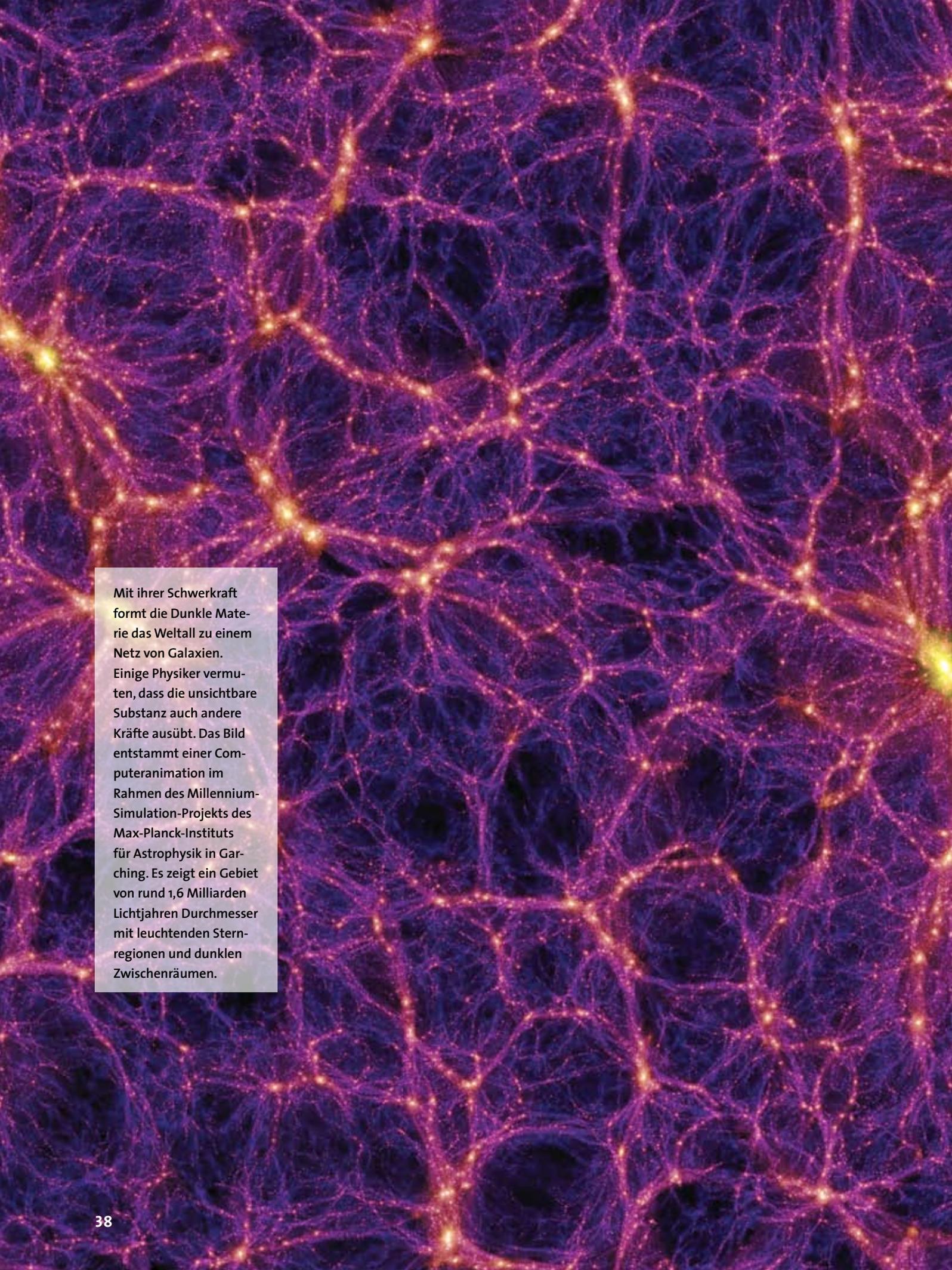
**Gareth Dyke** forscht und lehrt als Paläontologe am University College in Dublin. Zu seinen Hobbys gehört die europäische Geschichte des 19. Jahrhunderts. Gerade schreibt er ein Buch über einen ungarisch-österreichischen Spion, der in Transsilvanien Dinosaurier suchte.

#### QUELLEN

- Anderson, J. S., Sues, H.-D. (Hg.):** Major Transitions in Vertebrate Evolution. Indiana University Press, Indianapolis 2007  
**Clarke, J. A. et al.:** Definitive Fossil Evidence for the Extant Avian Radiation in the Cretaceous. In: Nature 433, S. 305–308, 2005  
**Kaiser, G. W.:** The Inner Bird: Anatomy and Evolution. University of British Columbia Press, Vancouver 2007

#### LITERATURTIPP

**Wellnhöfer, P.:** *Archaeopteryx: Der Urvogel von Solnhofen.* Pfeil-Verlag, München 2008  
*Allgemein verständliche, umfassende Darstellung der frühen Vögel-Evolution von einem international führenden Experten*



Mit ihrer Schwerkraft formt die Dunkle Materie das Weltall zu einem Netz von Galaxien. Einige Physiker vermuten, dass die unsichtbare Substanz auch andere Kräfte ausübt. Das Bild entstammt einer Computeranimation im Rahmen des Millennium-Simulation-Projekts des Max-Planck-Instituts für Astrophysik in Garching. Es zeigt ein Gebiet von rund 1,6 Milliarden Lichtjahren Durchmesser mit leuchtenden Sternregionen und dunklen Zwischenräumen.

TITELTHEMA | KOSMOLOGIE

# Der verborgene Bauplan des **KOSMOS**

Das Universum scheint riesige Mengen einer unbekannt Substanz zu bergen, die sich nur durch die Wirkung ihrer Schwerkraft verrät – die Dunkle Materie. Physiker spekulieren darüber, aus welchen exotischen Teilchen sie aufgebaut ist. Seit Neuestem heiß gehandelt: Super-WIMPs.

Von Jonathan Feng und Mark Trodden

**A**m 23. September 1846 erhielt der damalige Direktor des Berliner Observatoriums, Johann Gottfried Galle (1812–1910), einen Brief, der in die Geschichte der Astronomie eingehen sollte. Absender war der französische Mathematiker Urbain Le Verrier (1811–1877), der die Bewegungen des Planeten Uranus untersucht hatte und zu dem Schluss gekommen war, dessen Bahn könne nicht durch die bekannten Gravitationskräfte erklärt werden. Le Verrier erklärte die beobachteten Abweichungen mit der Existenz eines bislang unbeobachteten Objekts, dessen Schwerkraft die Uranusbahn störe. Auf Grund von Le Verriers Hinweisen ging Galle noch in derselben Nacht zu seinem Fernrohr – und entdeckte den Planeten Neptun.

Etwas ähnlich Spannendes spielt sich derzeit in der Kosmologie ab. Statt Uranus bewegen sich diesmal gleich Sterne und ganze Galaxien quasi unerlaubt; die Rolle des Neptuns übernehmen unbekannte Substanzen, die zunächst einmal Dunkle Materie und Dunkle Energie getauft wurden. Die Dunkle Materie gilt als unsichtbarer Teilhensee, der den Raum ungleichmäßig ausfüllt; die Dunkle Energie ist hingegen so homogen verteilt, als ob sie eng mit dem Raum selbst verwoben wäre. Eines steht allerdings noch aus: Galles Kunststück, ein Instrument auf den Himmel zu richten und die verborgenen Mitspieler eindeutig zu enttarnen. Immerhin geben Teilchendetektoren erste, noch undeutliche Hinweise auf deren Eigenschaften.

Neptun hat sich inzwischen als faszinierende, eigenständige Welt erwiesen. Werden wir dies dereinst auch über Dunkle Materie und Dunkle Energie sagen? Immer mehr Forscher ziehen die Möglichkeit in Betracht, dass insbesondere die Dunkle Materie nicht nur ein Notbehelf zur Erklärung sichtbarer Materiebewegungen ist, sondern eine bislang verborgene Seite des Universums mit einem vielfältigen Innenleben. Sie vermuten einen wahren Zoo von Teilchen, zwischen denen neuartige Naturkräfte herrschen – eine eigene Welt, die mit »unserem« Kosmos wechselwirkt.

## AUF EINEN BLICK

### VERBORGENE WELTEN UND KRÄFTE

**1** Zwei voneinander unabhängige Gründe sprechen dafür, dass eine unbekannte Substanz, die Dunkle Materie, den Kosmos erfüllt. Zum einen bewegen sich Sterne, Galaxien und Gaswolken so, als würden sie von der Schwerkraft eines unsichtbaren Stoffes beeinflusst. Zum anderen scheinen gleich mehrere Rätsel der Teilchenphysik nur durch Annahme noch unbekannter Partikel lösbar zu sein.

**2** Bisher nahmen die meisten Physiker an, die Dunkle Materie bestehe aus WIMPs. Das sind schwere und träge Teilchen, die kaum mit der sichtbaren Welt interagieren.

**3** Neue Modelle postulieren jedoch ein komplexes Innenleben von Super-WIMPs für die Dunkle Materie – mit eigenen Kräften und einer fremden Form von Licht, die für uns unsichtbar ist.

Mit diesen Ideen verabschieden Physiker sich von der lange gehegten Überzeugung, Dunkle Materie und Dunkle Energie seien die ungeselligsten Substanzen des Universums. Seit Astronomen in den 1930er Jahren auf die Existenz Dunkler Materie schlossen, galt Reaktionsträgheit als deren hervorstechendste Eigenschaft. Galaxien und Galaxienhaufen sind demnach von riesigen kugelförmigen Hüllen oder »Halos« aus Dunkler Materie umhüllt, von der es

insgesamt etwa sechsmal so viel wie von gewöhnlicher Materie zu geben scheint. Doch wie kann sich eine derart gewaltige Masse direkter Beobachtung entziehen? Die einzig mögliche Antwort lautet: Sie muss aus Teilchen bestehen, die kaum mit gewöhnlicher Materie wechselwirken – und auch nicht miteinander. Ihre Bausteine tun also nichts anderes, als der leuchtenden Materie das Gravitationsgerüst zu liefern.

Diese Halos bildeten sich sehr früh in der Geschichte des Kosmos. Sie zogen dann gewöhnliche Materie an, die mit ihren viel-

fältigen Verhaltensweisen komplizierte Strukturen bildete, während die Dunkle Materie wegen ihrer Trägheit in ihrem primitiven Zustand verharrte. Wie die Dunkle Energie scheint sie nur die kosmische Ausdehnung zu beschleunigen und hat sich offenbar seit Anbeginn überhaupt nicht verändert.

Die Vermutung, Dunkle Materie könnte vielleicht doch ein interessanteres Innenleben besitzen als bislang angenommen, entstammt weniger der Astronomie als der Teilchenphysik. Dort ist es schon fast Routine, im Verhalten bekannter Materie unbekannte Partikel zu errahnen, und zwar völlig unabhängig von kosmischen Bewegungen.

### Partikel mit der 100-fachen Protonenmasse

Im Fall der Dunklen Materie begannen solche Überlegungen mit der Entdeckung des radioaktiven Betazerfalls zu Beginn des 20. Jahrhunderts. Der italienische Kernphysiker Enrico Fermi (1901–1954) postulierte eine neue Naturkraft und neue Kraftteilchen, um den Zerfall von Atomkernen zu erklären. Die Kraft ähnelte dem Elektromagnetismus, und die Teilchen glichen den Photonen – freilich mit einem entscheidenden Unterschied: Im Gegensatz zu den masselosen und darum höchst beweglichen Lichtquanten mussten Fermis Teilchen vergleichsweise schwer sein. Ihre Masse würde ihre Reichweite begrenzen und erklären, warum die Kraft Kerne zerfallen lässt, aber sonst unbemerkt bleibt. Um die beobachtete Halbwertszeit radioaktiver Isotope zu liefern, müssten die Partikel die 100-fache Masse des Protons haben – rund 100 Gigaelektronvolt in den Standardeinheiten der Teilchenphysiker.

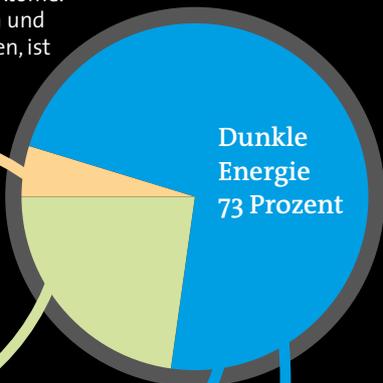
Die neue Kraft heißt heute schwache Kernkraft, und die hypothetischen Kraftpartikel sind die in den 1980er Jahren entdeckten W- und Z-Teilchen. Sie selbst stellen keine Dunkle Materie dar, aber ihre Eigenschaften deuten in deren Rich-

# Hypothesen über dunkle Substanzen

Moderne Instrumente haben die Existenz unsichtbarer Masse und Energie im Universum enthüllt (ganz rechts). Doch woraus diese bestehen, ist noch weitgehend unbekannt.

## baryonische Materie: 4 Prozent

Gewöhnliche Materie, das Baumaterial der Atome. Es kann alle bekannten Naturkräfte ausüben und darauf reagieren. All das, was wir direkt sehen, ist baryonische Materie.

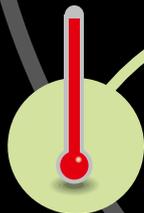


## Dunkle Materie: 23 Prozent

Exotische Materie reagiert nur auf einen Teil der bekannten Kräfte – und übt eigene Kräfte aus.

### heiß und schnell

Materieformen wie die Neutrinos haben nach der Entstehung fast Lichtgeschwindigkeit.



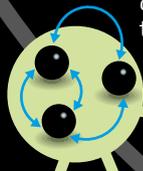
### kalt und langsam

Manche Materieformen bewegen sich nach der Entstehung träge.



### selbstwechselwirkend

Solche Partikel interagieren miteinander viel stärker als mit gewöhnlichen Teilchen.



### Spiegelmaterie

Jedes gewöhnliche Teilchen hat eine Art Doppelgänger.



### verborgene Kräfte («WIMPos«)

Teilchen reagieren mit dunklen Versionen unserer elektromagnetischen und schwachen Kräfte.



### supersymmetrische Teilchen

Das Prinzip der Supersymmetrie führt von selbst zu neuartigen Partikeln.

Gravitation



Gravitation



schwache Kraft

### Super-WIMPs

Aus dem Zerfall von WIMPs entstehende Teilchen reagieren auf die Gravitation, aber nicht auf die schwache Kernkraft.

### WIMPs

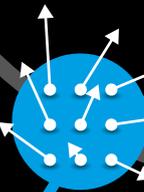
Schwach wechselwirkende massereiche Teilchen reagieren auf Gravitation und schwache Kernkraft.

### Axionen

Teilchen, die noch leichter und reaktionsträger sind als Neutrinos, würden ein hartnäckiges Rätsel der starken Kernkraft lösen.

### Quintessenz

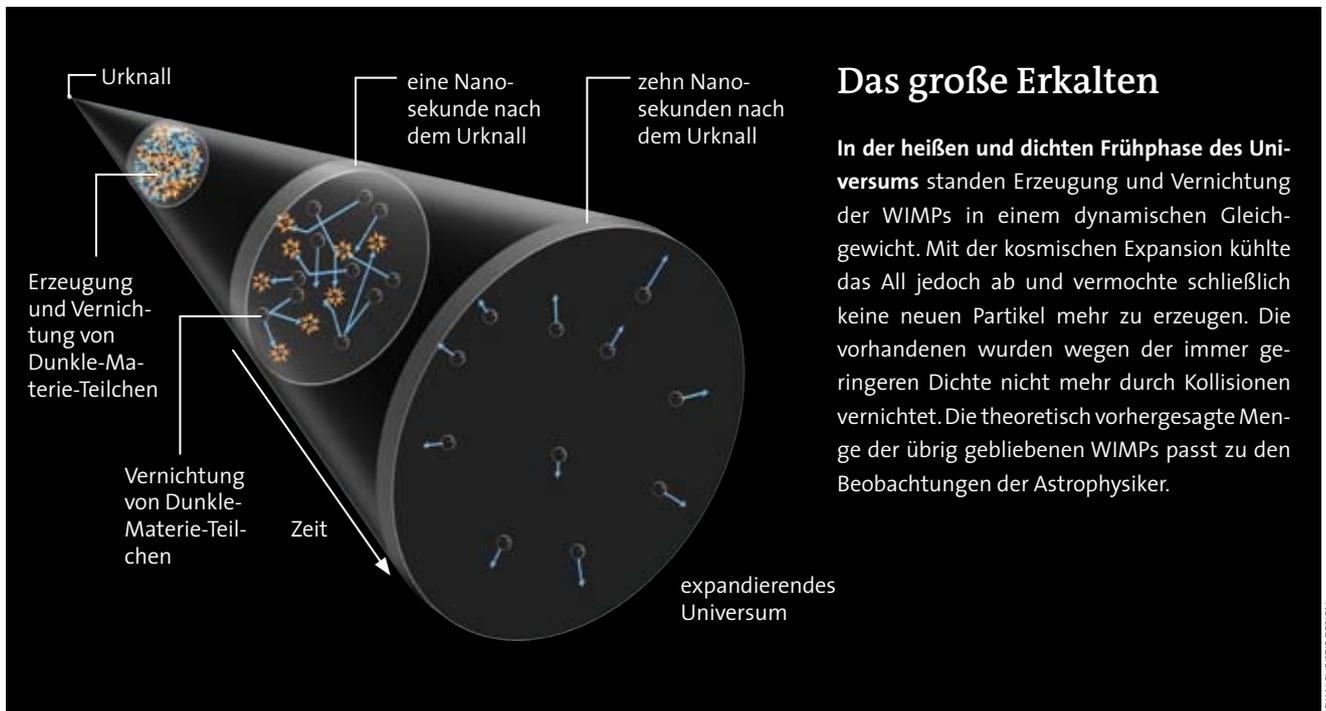
Eine dynamische Energieform könnte durch Wechselwirkung mit Materie entstanden sein.



### Vakuumergie

Der scheinbar leere Raum enthält Energie durch die Quantenfluktuationen von Materieteilchen.





## Das große Erkalten

In der heißen und dichten Frühphase des Universums standen Erzeugung und Vernichtung der WIMPs in einem dynamischen Gleichgewicht. Mit der kosmischen Expansion kühlte das All jedoch ab und vermochte schließlich keine neuen Partikel mehr zu erzeugen. Die vorhandenen wurden wegen der immer geringeren Dichte nicht mehr durch Kollisionen vernichtet. Die theoretisch vorhergesagte Menge der übrig gebliebenen WIMPs passt zu den Beobachtungen der Astrophysiker.

tung. Denn eigentlich sollten sie leichter sein, als es tatsächlich der Fall ist. Ihre große Masse legt nahe, dass bislang unbekanntes Teilchen auf sie einwirken und sie gleichsam zur Gewichtszunahme verleiten. Ein Ziel des Large Hadron Collider – des gigantischen Teilchenbeschleunigers von CERN bei Genf – ist die Suche nach solchen Partikeln mit ähnlichen Massen wie die der W- und Z-Teilchen. Tatsächlich vermuten Physiker, dass Dutzende von Teilchensorten auf ihre Entdeckung warten: ein Partnerteilchen zu jedem bekannten Teilchen gemäß der so genannten Supersymmetrie.

Zu diesen hypothetischen Partikeln gehören schwach wechselwirkende Masseteilchen namens WIMPs (*weakly interacting massive particles*). Wie ihr Name andeutet, beeinflussen sie ihre Umgebung nur über die schwache Kernkraft. Da sie auf die elektrischen und magnetischen Kräfte, welche die Alltagswelt dominieren, nicht reagieren, bleiben sie völlig unsichtbar und üben auf normale Teilchen kaum direkte Wirkung aus. Das macht sie zu idealen Kandidaten für die kosmische Dunkle Materie. Ob sie diese aber wirklich zu erklären vermögen, hängt davon ab, wie zahlreich sie sind.

Wie alle Partikel dürften die WIMPs im Tohuwabohu des Urknalls entstanden sein. Damals wurden sie durch hochenergetische Teilchenkollisionen sowohl erzeugt als auch gleich wieder vernichtet, so dass zu jedem Zeitpunkt eine gewisse Menge von WIMPs vorübergehend existierte. Wie sich diese Anzahl mit der Zeit veränderte, hing von zwei konkurrierenden Wirkungen der kosmischen Expansion ab. Zum einen nahm mit fortschreitender Abkühlung die zur Erzeugung von

WIMPs verfügbare Energie ab – und somit deren Anzahl. Zum anderen sank im Verlauf der Expansion die Teilchendichte und daher auch die Häufigkeit von Kollisionen, bis diese praktisch ganz aufhörten. Ab diesem Punkt, rund zehn Nanosekunden (milliardstel Sekunden) nach dem Urknall, blieb die Anzahl der WIMPs konstant. Das Universum hatte von da an weder die zur Erzeugung von WIMPs nötige Energie noch die dichte Massenkonzentration, um sie zu vernichten.

Wie viele WIMPs wären dann noch übrig? Physiker können das leicht berechnen, wenn sie von der mutmaßlichen Masse der WIMPs ausgehen sowie von der Stärke ihrer Wechselwirkung – von der abhängt, wie oft sie einander vernichten. Erstaunlicherweise entspricht diese Zahl – innerhalb der Genauigkeit der Schätzung von Masse und Wechselwirkung – jener, die zur Erklärung der heutigen kosmischen Dunklen Materie nötig ist. Diese bemerkenswerten Übereinstimmung bezeichnen Physiker als WIMP-Koinzidenz. Somit erklären Partikel, die auf Grund eines 100 Jahre alten Rätsels der Teilchenphysik postuliert wurden, zwanglos kosmologische Beobachtungen!

Seit Sie begonnen haben, diesen Artikel zu lesen, hat schätzungsweise fast eine Milliarde WIMPs Ihren Körper ohne merkliche Wirkung durchquert. Im Lauf eines Jahrs dürfte nur ein einziges solches Teilchen an den Atomkernen in Ihren Zellen gestreut werden und dabei ein wenig Energie abgeben. Um derart seltene Ereignisse überhaupt jemals zu entdecken, bauen Physiker aktuell riesige Teilchendetektoren für die langfristige Überwachung großer Volumina einer Flüssig-

Seit Sie begonnen haben, diesen Artikel zu lesen, hat schätzungsweise fast eine Milliarde WIMPs Ihren Körper passiert

keit oder anderer Materialien. Zudem halten Astronomen in der Milchstraße Ausschau nach Strahlungsausbrüchen, welche die vereinzelte Kollision und Vernichtung von WIMPs anzeigen. Eine dritte Vorgehensweise versucht, WIMPs in Experimenten auf der Erde zu synthetisieren (siehe Kasten auf S. 44).

Die derzeit außerordentlich intensive WIMP-Suche könnte den Eindruck erwecken, diese Partikel seien die einzigen sinnvollen Kandidaten für Dunkle Materie. Doch neuerdings haben Teilchenphysiker andere mögliche Erklärungen entdeckt, in deren Licht die WIMPs nur als Spitze des Eisbergs erscheinen – zum Beispiel Partikel, die noch schwächer reagieren als WIMPs.

Laut dieser Theorie waren die in den ersten Nanosekunden der kosmischen Geschichte entstandenen WIMPs instabil und zerfielen Sekunden bis Tage später in Teilchen mit ähnlicher Masse, die aber nicht mit der schwachen Kernkraft wechselwirken. Nur noch die Gravitation verbindet diese so genannten Super-WIMPs mit der übrigen Natur. Demnach bilden nicht WIMPs, sondern Super-WIMPs die Dunkle Materie des heutigen Universums.

### Verzögerte Galaxienbildung

Super-WIMPs wären nicht direkt beobachtbar, würden aber in der Gestalt der Galaxien verräterische Spuren hinterlassen. Die hypothetischen Teilchen hätten sich nach ihrer Entstehung enorm schnell bewegt. Erst nachdem sie mit der Zeit zur Ruhe gekommen wären, hätten sich Galaxien bilden können. Diese Verzögerung hätte der Materie weniger Zeit gelassen, sich in Galaxienzentren anzusammeln, bevor die kosmische Expansion sie wieder verdünnte. Die Dichte im Zentrum der Halos aus Dunkler Materie sollte darum offenbaren, ob sie aus WIMPs oder Super-WIMPs bestehen; genau das überprüfen Astronomen derzeit.

Außerdem müsste der Zerfall von WIMPs zu Super-WIMPs als Nebenprodukt Photonen oder Elektronen erzeugen, und die Teilchen können auf leichte Atomkerne treffen und sie aufbrechen. Es gibt Indizien dafür, dass das Universum weniger Lithium enthält als erwartet, und die Super-WIMP-Hypothese könnte das Phänomen erklären.

Dieses Szenario eröffnet auch neue Beobachtungsmöglichkeiten für Experimentalphysiker. Zum Beispiel muss jedes ursprüngliche WIMP weder dunkel noch schwach wechselwirkend gewesen sein; es könnte sogar eine fast beliebige elektrische Ladung getragen haben. All das hätte die Entwicklung des Kosmos nicht beeinflusst, da das Teilchen schnell zerfiel. Doch zugleich wären WIMPs extrem auffällig, wenn es gelänge, sie experimentell zu erzeugen. Teilchendetektoren würden sie als eine Art Superelektronen registrieren. Mit der Ladung eines Elektrons, aber dessen 100 000-facher Masse würde ein solches Teilchen durch den Detektor rasen und eine spektakuläre Spur hinterlassen.

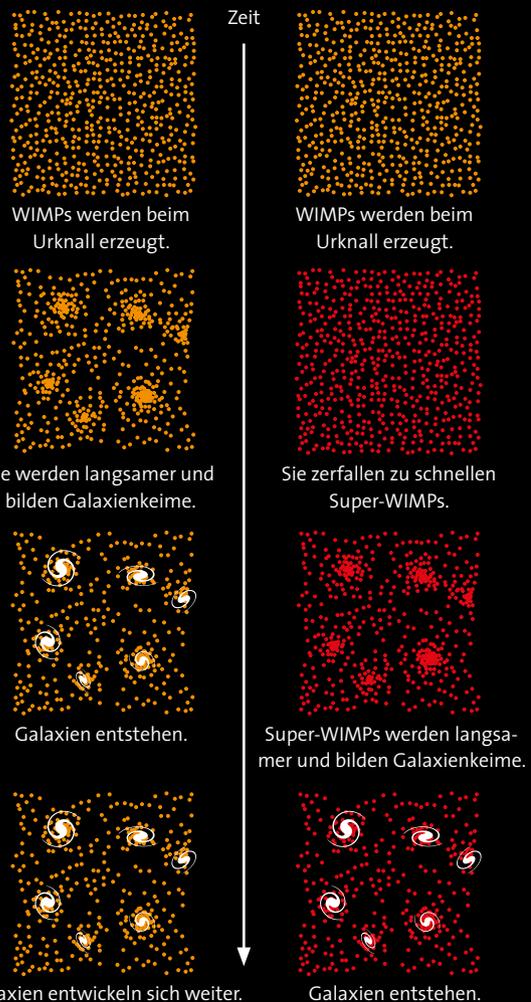
Die Super-WIMP-Modelle lehren uns vor allem eins: Die Dunkle Materie muss keineswegs so langweilig sein, wie die meisten Astronomen annehmen. Sobald Partikel denkbar

## WIMP-Varianten

Außer den WIMPs ziehen Theoretiker auch so genannte Super-WIMPs als Partikel der Dunklen Materie in Betracht. Super-WIMPs sind noch reaktionsschwächer als WIMPs: Sie treten mit gewöhnlicher Materie nur durch die Gravitation in Wechselwirkung.

	 baryonisch	 WIMP	 Super-WIMP
Gravitation	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
elektromagnetische Kraft	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
schwache Kernkraft	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
starke Kernkraft	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
mögliche dunkle Kräfte	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Im WIMP-Szenario (linke Spalte unten) lösen WIMPs die Galaxienbildung direkt aus. Im Super-WIMP-Szenario (rechts) zerfallen die WIMPs zunächst zu Super-WIMPs, die erst dann – mit Verzögerung – als Galaxienkeime wirken.

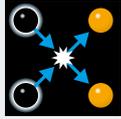


# Unsichtbares sichtbar machen

Alles, was Astronomen bisher über Dunkle Materie wissen, stammt von deren Gravitationswirkung auf die sichtbare Materie. Um herauszufinden, woraus die unsichtbare Substanz über-

haupt besteht, testen gegenwärtig tausende Forscher weltweit direkte Nachweismethoden. Die meisten konzentrieren sich dabei auf die Vernichtung, Streuung und Erzeugung von WIMPs:

## VERNICHTUNG



Wenn zwei WIMPs kollidieren, zerstören sie einander und hinterlassen als Indiz mehrere andere Teilchen –

Elektronen, Positronen und Neutrinos. Diese Paarvernichtung kann nicht sehr häufig vorkommen, sonst gäbe es heute keine WIMPs mehr. Die derzeitigen Experimente sind so empfindlich, dass sie selbst sehr seltene WIMP-Vernichtungen entdecken können.

Detektoren an Stratosphärenballons suchen nach Elektronen und Positronen. Im Jahr 2011 soll der Spaceshuttle das Alpha Magnetic Spectrometer zur Internationalen Raumstation befördern, um von dort aus Positronen aufzuspüren. Das Super-Kamiokande-Experiment in Japan, IceCube in der Antarktis und andere Observatorien halten nach Neutrinos Ausschau.

## STREUUNG



Während die Erde ihre Bahn in der Milchstraße zieht, strömt unbemerkt Dunkle Materie durch sie

hindurch. Nur in seltenen Fällen trifft ein WIMP einen Atomkern und versetzt ihm einen fast unmerklichen Rückstoß, der mit empfindlichen und zur Unterdrückung der Atomvibrationen extrem tiefgekühlten Detektoren gerade noch nachweisbar sein dürfte. Die an den Detektor abgegebene Rückstoßenergie gibt Auskunft über die Eigenschaften der Dunklen Materie. Die Experimente DAMA und CoGeNT haben möglicherweise ein Signal entdeckt (unten), doch andere wie XENON und CDMS fanden nichts. Die Empfindlichkeit solcher Experimente steigt derzeit rapide.

## ERZEUGUNG



Dunkle Materie könnte in Teilchenbeschleunigern entstehen, insbesondere im Large Hadron Collider

bei Genf, wo Protonen mit extrem hohen Energien zur Kollision gebracht werden. Die Erzeugung ist eine umgekehrte Vernichtung: Wenn Dunkle Materie in normale Teilchen zerfallen kann, kann sie auch durch Kollision normaler Teilchen entstehen. Das Kennzeichen für die Produktion Dunkler Materie wären Kollisionen, bei denen scheinbar Energie und Impuls verloren gehen; dabei müssten sich reaktionsträge Teilchen bilden und dem Detektor unbemerkt entkommen.

## Vier Experimente, die angeblich Teilchen der Dunklen Materie entdeckt haben

Experiment	CDMS	DAMA	CoGeNT	PAMELA
<b>vollständiger Name</b>	Cryogenic Dark Matter Search	Dark Matter	Coherent Germanium Neutrino Technology	Payload for Antimatter Matter Exploration and Light-nuclei Astrophysics
<b>Standort</b>	Soudan-Mine in Minnesota	unterirdisches Gran-Sasso-Labor in Italien	Soudan-Mine	russischer Satellit
<b>Beobachtungen</b>	zwei Rückstoßereignisse	jährliche Schwankung in der Anzahl der Rückstoßereignisse	Rückstoßereignisse	Überschuss an Positronen
<b>Warum das Signal ein Nachweis für Dunkle Materie sein könnte</b>	direktes, erwartetes Signal für Dunkle Materie	statistisch signifikant	empfindlich für extrem energiearme Rückstöße	direktes, erwartetes Signal für Vernichtung Dunkler Materie
<b>Warum das Signal vielleicht doch kein Nachweis ist</b>	nicht statistisch signifikant	Widerspruch zu anderen Resultaten	vielleicht normale Nuklearprozesse	vielleicht durch astrophysikalische Quellen erklärbar
<b>Nachfolgeexperimente</b>	SuperCDMS, XENON	XENON, MAJORANA Demonstrator	XENON, MAJORANA Demonstrator	Alpha Magnetic Spectrometer

sind, deren Eigenschaften den Rahmen des üblichen WIMP-Szenarios sprengen, eröffnen sich ganz neue Möglichkeiten. Könnte es am Ende einen ganzen Zoo noch unbekannter Teilchen geben? Existiert vielleicht eine verborgene Welt, die eine exakte Kopie der unsrigen ist, einschließlich verborgener Elektronen und Protonen, Atome und Moleküle, Sterne und Planeten – ja sogar verborgener Menschen?

Diese Möglichkeit wurde ausgiebig erkundet, ausgehend von einer Bemerkung der Nobelpreisträger Tsung-Dao Lee und Chen Ning Yan in einem Artikel von 1956. In letzter Zeit befassten sich unter anderem Robert Foot und Raymond Volkas von der University of Melbourne (Australien) mit dem Rätsel: Könnte das, was wir als Dunkle Materie wahrnehmen, wirklich Indiz für eine verborgene Spiegelwelt sein? Spähen verborgene Physiker und Astronomen dort gerade durch ihre Teleskope und fragen sich, woraus ihre Dunkle Materie besteht – wobei diese für sie geheimnisvolle Substanz in Wahrheit wir sind?

### Keine Spiegelwelt

Leider zeigen grundlegende Beobachtungen, dass verborgene Welten keine exakte Kopie unserer sichtbaren Welt sein können. Zum einen gibt es sechsmal mehr Dunkle als gewöhnliche Materie. Zum anderen hätten sich die Halos verflacht und Scheiben wie die Milchstraße gebildet, wenn Dunkle und gewöhnliche Materie sich gleich verhielten – mit drastischen Folgen für das galaktische Schwerfeld, die allen Beobachtungen widersprechen. Und schließlich hätte die Existenz von verborgenen, aber mit unserer Welt identischen Teilchen die kosmische Expansion beeinflusst und die Synthese von Wasserstoff und Helium im frühen Universum verändert. Messungen der Elementhäufigkeit im Kosmos schließen das jedoch aus. Solche Überlegungen sprechen deutlich gegen eine für uns unsichtbare Spiegelwelt.

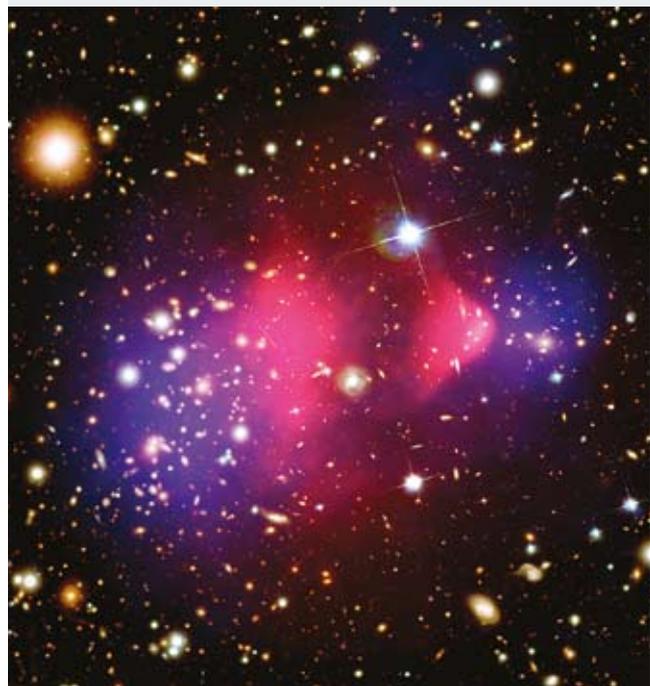
Dennoch könnte die dunkle Welt durchaus ein kompliziertes Netz aus Teilchen und Kräften bilden. Wie unter anderem einer von uns (Jonathan Feng) und Jason Kumar von der University of Hawaii in Manoa herausgefunden haben, lässt das supersymmetrische Konzept, das zu den WIMPs führt, auch andere Szenarien zu, in denen mehrere andere Teilchentypen an die Stelle der WIMPs treten. Überdies wechselwirken diese Teilchen in vielen WIMPlosen Theorien miteinander durch neu postulierte dunkle Kräfte.

Solche Wechselwirkungen verändern die Erzeugungs- und Vernichtungsrate der Partikel im frühen Universum, aber letztlich ergeben sich wieder die richtigen Teilchenzahlen, um die Dunkle Materie zu erklären. In diesen Modellen wird die Dunkle Materie von einer verborgenen schwachen Kraft begleitet – oder sogar von einer verborgenen Version des Elektromagnetismus. Letzteres würde bedeuten, dass die Dunkle Materie verborgenes »Licht« emittiert und reflektiert.

Dieses Licht ist natürlich für uns unsichtbar, und somit bleibt die Dunkle Materie für unsere Augen weiterhin dunkel. Dennoch könnten neue Kräfte durchaus merkliche Effekte haben.

## Kronzeuge: Der Bullet-Cluster

Dieser spektakuläre Galaxienhaufen gilt unter Astronomen als das stärkste Indiz für Dunkle Materie. Eigentlich besteht er aus zwei Galaxienhaufen, die kollidiert sind. Der Zusammenstoß hat die einzelnen Sterne der Galaxien nicht tangiert, da sie dafür zu kleine Stoßziele sind. Doch die interstellaren Gaswolken sandten bei der Durchdringung Röntgenstrahlen aus (rot). Die Dunkle Materie (blau) verrät sich, weil ihre Gravitation das Licht der Hintergrundobjekte verzerrt; sie selbst bleibt wie die Sterne vom Stoß unbeeinflusst. Somit müssen die Partikel der Dunklen Materie extrem reaktionsträge sein.



RÖNTGEN: NASA/CXC/CEA/M. MARRETTI ET AL.; OPTISCH: NASA/STSC/UNIVERSITY OF ARIZONA, D. CLOWE ET AL.; GRAVITATIONSLENSEN: NASA/STSC/ISO/WFI/MAGELLAN/UNIVERSITY OF ARIZONA, D. CLOWE ET AL.

fekte haben. Zum Beispiel würden dadurch Wolken aus dunklen Teilchen verzerrt, während sie einander durchdringen. Die Astronomen suchen nach diesem Effekt in dem berühmten Bullet-Cluster, der aus zwei einzelnen Galaxienclustern besteht, die durcheinander hindurchgegangen sind. Den Beobachtungen zufolge hat die vergleichsweise kurze Durchmischung der Cluster die Dunkle Materie allerdings kaum gestört – ein Indiz dafür, dass die dunklen Kräfte zumindest nicht sehr stark sein können.

Über solche Kräfte könnten dunkle Teilchen außerdem Energie und Impuls austauschen; dadurch würden sie homogenisiert, und anfänglich schiefe Halos nähmen Kugelform an. Der Homogenisierungsprozess müsste bei Zwerggalaxien am deutlichsten sein, denn dort bewegt sich die Dunkle Materie langsam. Die Teilchen verweilen länger bei einander, und kleine Effekte haben entsprechend mehr Zeit, sich auszuwirken. Die Beobachtung, dass kleine Galaxien



stets runder sind als ihre größeren Verwandten, könnte demnach ein Indiz für neue dunkle Kräfte sein.

Ebenso faszinierend ist die Möglichkeit, dass die Dunkle Materie mit der Dunklen Energie wechselwirkt. Die meisten heutigen Theorien behandeln die beiden zwar als unverbunden, aber dafür gibt es keinen wirklichen Grund. Eine Kopplung zwischen den zwei dunklen Größen könnte einige kosmologische Probleme mildern, insbesondere das Koinzidenzproblem – die Frage, warum sie vergleichbare Dichten haben. Die Dunkle Energie ist rund dreimal so dicht wie die Dunkle Materie, aber das Verhältnis könnte theoretisch ja auch 1000 oder eine Million zu eins betragen. Diese Koinzidenz ergäbe einen Sinn, wenn die Dunkle Materie irgendwie die Entstehung der Dunklen Energie verursachte.

Durch Kopplung mit der Dunklen Energie könnten die Partikel der Dunklen Materie auch anders miteinander wechselwirken als gewöhnliche Teilchen. Neue Modelle erlauben – und erzwingen mitunter sogar –, dass die Dunkle Energie auf Dunkle Materie eine andere Kraft ausübt als auf normale Materie. Unter dem Einfluss dieser Kraft ist die Dunkle Materie bestrebt, sich von jeder Vermengung mit gewöhnlicher Materie zu lösen.

### Zwerggalaxie als Nagelprobe

Im Jahr 2006 forderten Marc Kamionkowski vom California Institute of Technology in Pasadena und Michael Kesden, damals am Canadian Institute for Theoretical Astrophysics in Toronto, diesen Effekt bei Zwerggalaxien zu suchen, die von größeren Nachbarn zerrissen werden. Beispielsweise wird die Sagittarius-Zwerggalaxie von der Milchstraße auseinandergezerrt, und nach Meinung mancher Astronomen verstreut sie ihre Dunkle und normale Materie in unsere Galaxis hinein.

Wie Kamionkowski und Kesden vorrechnen, müssten die auf Dunkle Materie wirkenden Kräfte nur um vier Prozent stärker oder schwächer sein als ihr Einfluss auf die übliche Materie, damit die beiden Komponenten um einen beobachtbaren Betrag auseinanderdriften. Bislang ließ sich allerdings nichts dergleichen durch Beobachtung feststellen.

Eine Bindung zwischen Dunkler Materie und Dunkler Energie würde zudem das Wachstum kosmischer Strukturen verändern. Dieses hängt empfindlich von der Zusammenset-

zung des Universums ab, also auch von dessen dunkler Seite. Mehrere Forscher, darunter einer von uns (Mark Trodden) zusammen mit Rachel Bean, Éanna Flanagan und Istvan Laszlo von der Cornell University (Ithaca, US-Bundesstaat New York), haben diese starke Einschränkung kürzlich genutzt, um eine große Gruppe von Modellen auszuschließen.

Trotz solcher Rückschläge sind die theoretischen Argumente für eine komplexe dunkle Welt heute so überzeugend, dass viele Forscher überrascht wären, wenn die Dunkle Materie nicht mehr sein sollte als ein undifferenzierter Schwarm von WIMPs. Schließlich umfasst die sichtbare Materie ein reiches Spektrum von Teilchen mit mehrfachen Wechselwirkungen, denen elegante Symmetriebeziehungen zu Grunde liegen.

Nichts spricht dagegen, dass das bei Dunkler Energie und Dunkler Materie genauso ist. Höchstwahrscheinlich werden wir niemals dunklen Sternen, Planeten oder Menschen begegnen – doch genauso, wie für uns heute zum Sonnensystem selbstverständlich Neptun, Pluto und ein ganzer Schwarm noch weiter entfernter Objekte gehören, werden wir uns vielleicht eines Tages kein Universum mehr ohne eine fassettenreiche und faszinierende dunkle Welt vorstellen können. ~

### DIE AUTOREN



**Jonathan Feng** (links) ist Professor für theoretische Physik und Astronomie an der University of California in Irvine. Er erforscht mit den Mitteln von Teilchenphysik und Kosmologie das Wesen der Dunklen Materie. **Mark Trodden** ist

Kodirektor des Center for Particle Cosmology an der University of Pennsylvania und ein Autor des Physik-Blogs Cosmic Variance: <http://blogs.discovermagazine.com/cosmicvariance>

### QUELLEN

**Feng, J.:** What's the Matter? The Search for Clues in Our Cold, Dark Universe. Pagels Memorial Public Lecture, 14. Juli 2010

**Feng, J.:** Dark Matter Candidates from Particle Physics and Methods of Detection. In: Annual Reviews of Astronomy and Astrophysics 48, S. 495–545, 2010

**Gates, E.:** Einstein's Telescope: The Hunt for Dark Matter and Dark Energy in the Universe. Norton, London 2009

**Silvestri, A., Trodden, M.:** Approaches to Understanding Cosmic Acceleration. In: Reports on Progress in Physics 72, 096901, 2009

**Trodden, M.:** Modern Cosmology and the Building Blocks of the Universe. Penn Alumni Weekend Lecture, 15. Mai 2010

### WEBLINKS

[www.mpa-garching.mpg.de/galform/presse/](http://www.mpa-garching.mpg.de/galform/presse/)

Das Millennium-Simulation-Projekt des Max-Planck-Instituts für Astrophysik zeigt Bilder und Filme der simulierten großräumigen Galaxienverteilung.

<http://vod.grassrootstv.org/vodcontent/9251-1.wmv>

Öffentliche Vorlesung von Jonathan Feng über das dunkle Universum (auf Englisch)



# Das Heiz-Paradoxon

Warum wird ein Zimmer durch Heizen wärmer?  
Etwa, weil wir die Energie der Raumluft erhöhen? Mitnichten!

VON H. JOACHIM SCHLICHTING

**W**arum heizen wir im Winter? Die Antwort auf diese Frage scheint trivial. Und wohl kaum jemand würde vermuten, dass sich ein Physiker mit ihr in der Fachzeitschrift »Nature« beschäftigt. Doch der Schweizer Robert Emden (1862–1940) tat genau das. Er schrieb: »Der Laie wird auf diese Frage antworten: ›Damit es im Zimmer wärmer wird.‹ Ein Student der Thermodynamik drückt sich vielleicht so aus: ›Um fehlende Energie zuzuführen.‹ In diesem Fall erweist sich der Laie, nicht der Wissenschaftler, als im Recht.«

Das war im Jahr 1938 und dürfte manchen noch heute zum Widerspruch



Die Energie, die der Wein der wärmeren Zimmerluft entzieht, stammt – aus der kalten Umgebung des Hauses.

reizen. Denn wer könnte abstreiten, dass ein Heizkörper thermische Energie an ein Zimmer abgibt? Die Energiemenge, die das Zimmer verliert – in Form von Wärme, die durch Wände, Fenster und Türen in die kalte Winterwelt entwindet –, muss die Heizung schlicht nachliefern. So könnte man jedenfalls denken.

Thermodynamisch betrachtet ist jedes Zimmer ein offenes System. Durch Wärmetransport tauscht es Energie mit der Außenwelt aus; darüber hinaus kommt es auch zum Materieaustausch. Von Letzterem merken wir nicht viel; nur manchmal schlägt unerwartet eine Tür, dann ist der Druckausgleich durch Luft, die zwischen innen und außen strömt, etwas heftiger ausgefallen. Dass diesseits und jenseits der Wände derselbe Druck herrscht, lässt sich übrigens schon an mancher Wetterstation für den Hausgebrauch ablesen: Oft werden sie mit zwei Thermometern (einem für innen, einem für außen), doch mit nur einem Barometer geliefert.

Wäre das Zimmer hingegen luftdicht abgeschlossen, ließe die Heizungswärme den Luftdruck darin steigen, so wie auch ein in der Sonne liegender Fahrradschlauch immer praller wird. Tatsächlich aber führt steigender Innendruck dazu, dass Luft nach außen abströmt. Und umgekehrt strömt Luft nach innen, sobald die Zimmertemperatur sinkt.

Doch es ist eben nicht nur Luft, die transportiert wird. Vielmehr ist immer auch Energie mit an Bord, da sich die

thermische Energie der Zimmerluft mikroskopisch betrachtet als Bewegungsenergie der ungeordnet durcheinanderrasenden Luftpartikel auffassen lässt. Verlassen diese Partikel den Raum, nehmen sie also Energie von innen nach außen mit.

## Es kommt noch kurioser

Stellt man dazu eine kleine Rechnung an, erlebt man eine ziemliche Überraschung: Die wegen steigenden Innendrucks nach außen strömende Luft nimmt gerade so viel Energie mit sich, wie von der Heizung an die Zimmerluft abgegeben wurde. Anders formuliert: Obwohl Energie zugeführt wird – man hat schließlich den Heizkörper aufgedreht –, bleibt die Energiemenge im Zimmer gleich!

Fast noch überraschender erscheint die umgekehrte Überlegung. Ich kühle die Zimmerluft ein wenig ab, wenn ich zum Beispiel eine Flasche Rotwein aus dem kalten Keller hole und diese sich auf Zimmertemperatur erwärmt. Statt dass es nun aber zu einer geringfügigen Druckabnahme kommt, weil die Flasche die Luft abkühlt, strömt gerade so viel Luft aus der kalten Außenwelt ins Zimmer, dass der Druck gleich bleibt. Und wieder bleibt auch die Energie konstant. Man kann also ohne Übertreibung sagen, dass die Energie, die der sich erwärmende Rotwein der Zimmerluft entzieht, letztlich aus der kalten Außenwelt stammt!

Es kommt aber noch kurioser, denn genau genommen nimmt die Energie



FOTOLIA / ABS DIGITAL DE DARIUSZ OZKOWICZ

Im Winter ist es draußen zwar kalt, doch thermische Energie ist auch bei Eis und Schnee reichlich vorhanden.

des Zimmers bei Erwärmung sogar ab und bei Abkühlung zu. Die Luftteilchen, die infolge der Energieänderungen aus dem Zimmer herein- oder hinausgetrieben werden, nehmen außer der thermischen Energie noch sich selbst mit, und damit die chemische Bindungsenergie der Luftmoleküle, die Energie der Atomkerne und was man sonst noch berücksichtigen möchte. Frostiger oder kuscheliger wird es durch diese Energiebeiträge natürlich trotzdem nicht.

Bei unseren Überlegungen haben wir allerdings stets typisch physikalisch argumentiert, also »Nebeneffekte« wie den Einfluss der Wände oder das durch die Rotweinflasche veränderte Luftvolumen geflissentlich vernachlässigt.

Dennoch haben wir eine zentrale Erkenntnis gewonnen: Wollen wir es im Zimmer warm haben, kommt es keineswegs nur auf die Energie an. Das zeigt auch eine weitere, fundamentale Überlegung. Denn obwohl mancher das Gegenteil vermuten würde, wird Energie weder erzeugt noch vernichtet. Anders gesagt: Sie besitzt die grundlegende Eigenschaft, immer und unter allen Umständen erhalten zu bleiben. Diesen Satz von der Energieerhaltung nennen Wissenschaftler auch den ersten Hauptsatz der Thermodynamik.

Wäre der erste Hauptsatz jedoch schon die ganze Wahrheit, gäbe es keine

Energiekrise noch wäre es gerechtfertigt, für Energie Geld zu zahlen. Denn dann wäre es beispielsweise möglich, dass die auch in kalter Umgebung reichlich vorhandene thermische Energie von selbst ins warme Zimmer fließt und so die Temperatur erhöht. Doch das geschieht nicht, wie uns die Erfahrung lehrt: Wärme geht immer nur von warm nach kalt über und nicht umgekehrt. Dieses Erfahrungswissen drückt der zweite Hauptsatz der Thermodynamik aus. Anschaulich gesprochen besagt er, dass jeder von selbst ablaufende Vorgang mit der Dissipation von Energie verbunden ist, also mit der Abgabe von Wärme an die Umgebung.

### Entscheidende Größe: die Entropie

Um diesen Sachverhalt allgemein zu erfassen, haben Thermodynamiker schon vor langer Zeit eine neue Größe eingeführt: die Entropie. Diese Größe wächst, wenn Energie dissipiert wird. Und deshalb kann der zweite Hauptsatz, der auch Entropiesatz heißt, so formuliert werden: Läuft ein Vorgang von selbst ab, wächst die Entropie oder bleibt zumindest konstant. Ein Zimmer wird freilich nicht von selbst warm, ein Ball schnell nicht von selbst in die Höhe und ein Luftballon bläst sich nicht von selbst auf. Denn bei all diesen Vorgängen würde die Entropie abnehmen.

Trotzdem ist es möglich, dass Wärme von kalt nach warm fließt – wenn wir entsprechend nachhelfen. So nutzen manche Heizungsanlagen die Energie der kalten Außenluft oder des kalten Grundwassers. Weil dabei die Entropie verringert wird, funktioniert das nicht von selbst, wohl aber durch den Einsatz von Wärmepumpen. Die wiederum dissipieren (meist elektrische) Energie, was letztlich so viel Entropie erzeugt, dass die Entropieabnahme in der Gesamtbilanz zumindest kompensiert wird.

Kommen wir auf den Ausgangspunkt zurück und fragen, wie es möglich ist, dass die Temperatur im Zimmer durch das Heizen steigt, obwohl die Energie konstant bleibt. Entscheidend ist, dass dabei die Teilchenzahl abnimmt! Da die Temperatur eng mit der ungeordneten thermischen Bewegung, genauer: der mittleren Bewegungsenergie der Luftteilchen, verknüpft ist, verteilt sich die Energie folglich auf weniger Teilchen. Diese besitzen nunmehr eine größere mittlere Bewegungsenergie – und wir spüren eine höhere Temperatur. ∞

### DER AUTOR



**H. Joachim Schlichting** ist Professor und Direktor des Instituts für Didaktik der Physik an der Universität Münster. 2008 erhielt er den Pohl-Preis der Deutschen Physikalischen Gesellschaft für seine didaktischen Konzepte.

### QUELLEN

- Emden, R.:** Why Do We Have Winter Heating? In: *Nature* 141, S. 908–909, 1938
- Schlichting, H.J.:** Von der Energieentwertung zur Entropie. In: *Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule* 49, S. 7–11, 2000
- Schlichting, H.J.:** Von der Dissipation zur Dissipativen Struktur. In: *Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule* 49, S. 12–16, 2000

[www.spektrum.de/artikel/1055752](http://www.spektrum.de/artikel/1055752)  
Kostenloser Download der beiden Artikel von H.J. Schlichting

# Lichtpulse auf Rekordjagd

Die Geschichte des Lasers ist eine Geschichte weniger, aber bedeutender Durchbrüche. Nachdem es im letzten Jahrzehnt eher um kleinere technische Verbesserungen ging, stehen nun wieder neue Rekorde bevor.

Von Todd Ditmire

Die Bedeutung von Lasern ist kaum zu überschätzen. Vielleicht stellen sie sogar die nach dem Transistor bedeutendste technische Erfindung seit dem Zweiten Weltkrieg dar. Laser faszinieren Forscher bis auf den heutigen Tag und bringen auch Ingenieure auf immer neue Ideen. Lange schon setzen wir die Instrumente zum Lesen von CDs, DVDs und Blu-Ray-Disks, zum Bedrucken von Papier und zum Scannen von Strichcodes ein. Doch die Palette der Einsatzmöglichkeiten reicht viel weiter: von der Materialbearbeitung bis zur Präzisionschirurgie, von der Entfernungsmessung und Hochgeschwindigkeitsdatenübertragung über die Lenkung von Waffen bis hin zur lasergetriebenen Kernfusion. Einer der erstaunlichsten Aspekte der Ge-

räte ist jedoch, dass ihre Leistung in wenigen Jahrzehnten so unglaublich rasant gewachsen ist – und dass ein Ende dieser Entwicklung noch lange nicht bevorsteht.

Die meisten Menschen stellen sich Laser als Geräte vor, die einen scharf fokussierten, kontinuierlichen Lichtstrahl einer exakt definierten Wellenlänge und damit Farbe erzeugen. Im Fall von Lasern, wie sie in DVD-Playern oder in Scannern an Supermarktkassen eingebaut sind, oder von Hochleistungsinstrumenten, wie sie etwa zum Schweißen eingesetzt werden, trifft diese Vorstellung auch zu. Eine große Gruppe von Lasern sendet das Licht jedoch in Form kurzer Pulse aus. Diese Lichtblitze unterscheiden sich unter anderem durch ihre Leistung. Weil Leistung als Energie pro Zeiteinheit definiert ist, wächst die Leistung mit der Energie, die in einem solchen Puls steckt. Sie erhöht sich aber auch dann, wenn man die Dauer des Lichtpulses verkürzt.

Am besten charakterisiert man gepulste Laser durch die Pulsdauer und ihre »Spitzenleistung«; schließlich erbringen sie ihre Leistung nicht kontinuierlich. Eingesetzt werden sie für Kernfusionsexperimente ebenso wie für die physikalische Grundlagenforschung, kommen aber auch auf ganz anderen Gebieten wie der Augenchirurgie zum Einsatz.

Schon in den frühen Tagen der Laserentwicklung war erkennbar, dass sich mit gepulsten Lasern sehr hohe Spitzenleistungen erzielen lassen würden. Den ersten Laser präsentierte 1960 Theodore Maiman in seinem Labor bei der kalifornischen Hughes Aircraft Company. Auch dieses Gerät arbeitete bereits im Pulsbetrieb und erreichte wohl einige hundert Watt. In den folgenden Jahrzehnten stieg die Spitzenleistung von Lasern dann atemberaubend schnell an: Alle

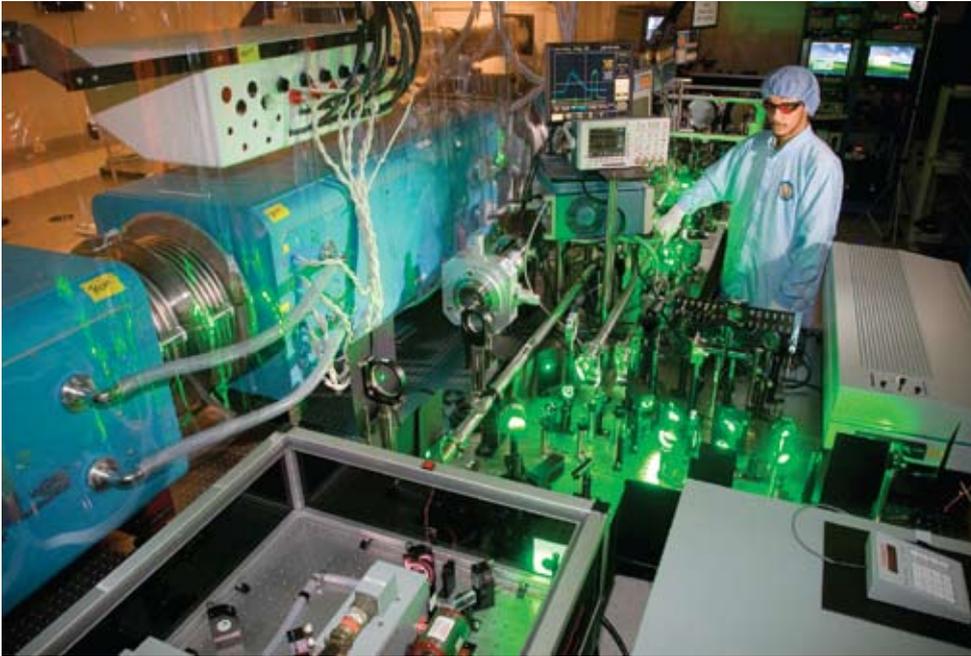
## AUF EINEN BLICK

### LEISTUNGSSCHÜBE IN ETAPPEN

**1** Die Leistung von Lasern, die kurze Lichtpulse aussenden, ist in den vergangenen fünf Jahrzehnten sehr schnell gestiegen. Entscheidend dafür waren einige wenige technische Durchbrüche – vor allem Q-Switching, Modenkopplung und das so genannte Chirpen.

**2** Wissenschaftler nutzen leistungsstarke Laser beispielsweise zur Erforschung ultrastarker Felder, schneller chemischer Reaktionen und sogar zur kontrollierten Kernfusion.

**3** Seit dem Jahr 2000 verharrt die maximale Leistung gepulster Laser an der Ein-Petawatt-Grenze ( $10^{15}$  Watt). Europäische und US-amerikanische Projekte stoßen aktuell jedoch in neue Dimensionen vor. Das große Ziel ist die Entwicklung eines Ein-Exawatt-Lasers, also eines Geräts mit einer Leistung von  $10^{18}$  Watt.



Heutige Spitzenlaser erbringen Leistungen von bis zu  $10^{15}$  Watt pro Puls. Das Bild zeigt den Texas Petawatt Laser, dessen Entwicklung der Autor leitet und der Pulse von ungefähr 100 Femtosekunden ( $10^{-13}$  Sekunden) Dauer erzeugt. Bald könnten Forscher sogar in der Lage sein, Laser mit Leistungen von mehr als einem Exawatt ( $10^{18}$  Watt) herzustellen.

zehn Jahre wuchs sie ungefähr um das 1000-Fache! Diese Entwicklung erinnert wegen ihres exponentiellen Verlaufs an das berühmte Mooresche Gesetz, welches das Wachstum in der Halbleiterelektronik beschreibt: Die Zahl der Transistoren in einem integrierten Schaltkreis verdoppelt sich etwa alle zwei Jahre. Doch es gibt einen wichtigen Unterschied. Das Mooresche Gesetz verdankt sich kontinuierlichen Verbesserungen in der Chipherstellung. Die Entwicklung der Lasertechnologie ist dagegen auf einige wenige, aber wesentliche Durchbrüche zurückzuführen.

### Mit Energie aufpumpen

Das Wort Laser steht für *light amplification by stimulated emission of radiation*, zu Deutsch Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung. Die Funktion der Geräte beruht darauf, dass (meist) Elektronen im so genannten aktiven Medium mit Energie »aufgepumpt« werden, um sie anschließend als Strahlung kontrolliert wieder abzugeben.

Für den Laserbetrieb eignen sich eine ganze Reihe von Medien, die zudem in unterschiedlichen Aggregatzuständen vorliegen können. In einem Helium-Neon-Laser (den jeder Physikstudent aus seinen Praktikumsversuchen kennt) sind die aktiven Atome zum Beispiel gasförmig. In Dioden- oder Halbleiterlasern von CD-Spielern kommen dagegen Halbleiter wie Galliumarsenid zum Einsatz. Auch mit Kristallen kann man arbeiten: Maiman pumpte die in künstliche Rubinkristalle eingebetteten Chromionen mit Energie auf.

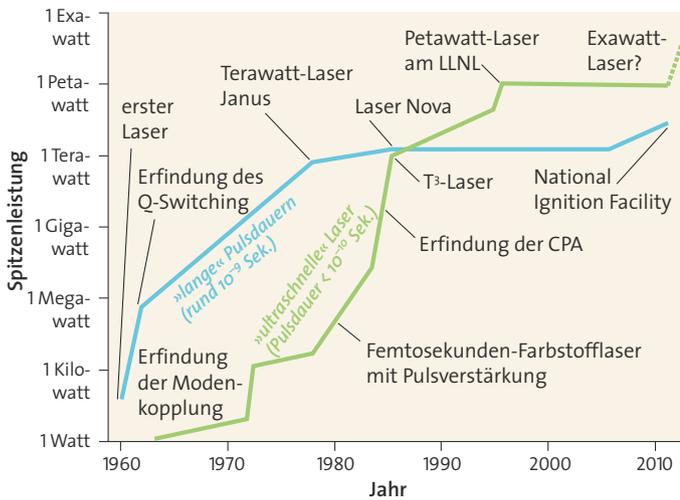
Pumpen bedeutet hier, Elektronen, die um einen Atomkern kreisen, auf ein höheres Energieniveau zu befördern (von dem aus sie dann unter Abgabe von Strahlung wieder

»herunterfallen« können). In Gaslasern lässt sich dies durch eine elektrische Entladung bei hoher Spannung bewerkstelligen. Im Fall von Diodenlasern lässt man Strom durch den Halbleiter fließen. Rubinkristalle wiederum kann man mit hellen Lichtbogenlampen bestrahlen (bei denen zwischen zwei Elektroden ein Lichtbogen erzeugt wird). Letzteres tat auch Maiman, der seinen Rubinstab mit einer gewundenen Blitzlampe umgeben hatte.

Von dem höheren Energieniveau, das die Elektronen erreichen, fallen sie zwar auch von selbst wieder herunter. Doch das geschieht erst nach einer bestimmten Zeit, der »Lebensdauer« dieses angeregten Zustands. Anders läuft es ab, wenn während dieses Zeitfensters Lichtteilchen passender Wellenlänge vorbeikommen. Dann fallen die Elektronen auf ein niedrigeres Niveau zurück, indem sie ihre Energie in Form eines Photons abgeben, dessen Eigenschaften dem des passierenden Teilchens genau entsprechen. So wird der Lichtstrom durch ein zusätzliches Photon verstärkt.

Aufladen kann man ein Medium während einer Dauer, die etwa der Lebensdauer des angeregten Zustands entspricht. (Würde man länger pumpen, fielen zu viele Elektronen bereits wieder von selbst in den Grundzustand zurück.) Sorgt man anschließend dafür, dass die gespeicherte Energie binnen kurzer Zeit wieder freigesetzt wird, erhält man einen Lichtpuls mit einer hohen Leistungsspitze.

Damit all das tatsächlich funktioniert, wird das aktive Medium zwischen zwei Spiegel platziert. Diese Konstruktion bezeichnen Laserphysiker als Laserkavität oder Resonator. Das Licht läuft zwischen den beiden Spiegeln hin und her, tritt also nach jeder Reflexion wieder durch das Lasermedium



**Die schnelle Entwicklung der Lasertechnik verdankt sich wenigen entscheidenden Durchbrüchen.**

und kann dort die Energie angeregter Elektronen »abrufen«. Maiman selbst hatte einfach die Stirnflächen seines aktiven Mediums spiegelnd beschichtet und erlaubte nur einem Teil des Lichts, durch die Schicht hindurchzugelangen. Dank eines solchen teildurchlässigen Auskoppelspiegels konnte es außerhalb des Geräts als Laserstrahl in Erscheinung treten. Dieser erste Rubinlaser produzierte Lichtpulse mit einer Dauer von rund drei Millisekunden, vorgegeben durch die Dauer der Blitzlichtentladung, die Maiman zum Pumpen einsetzte.

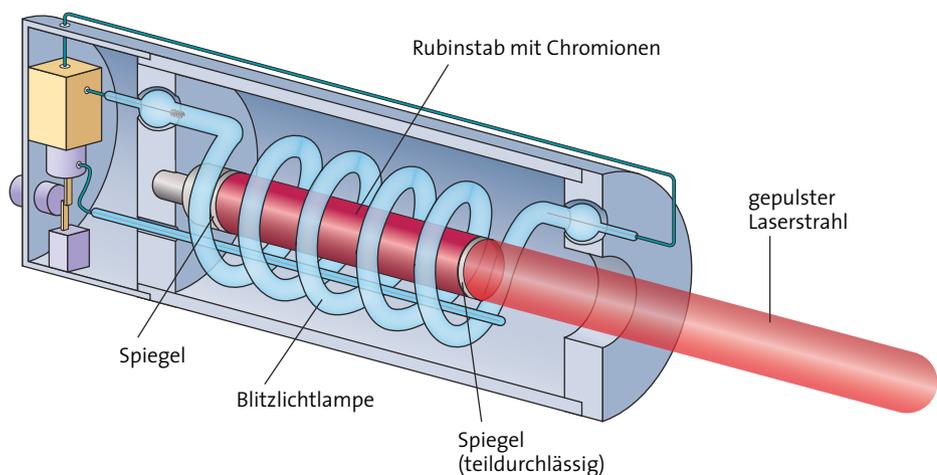
Schnell erkannten die Forscher, dass ein gepulster Laser potenziell extrem kurze Energiestöße erlaubt. Dazu muss man verhindern, dass die von den angeregten Elektronen gespeicherte Energie bereits während des Pumpens durch die im Resonator zirkulierenden Photonen abgezogen wird. Stattdessen muss ein »Schalter« das Abrufen der Energie eine Zeit lang unterbrechen, so dass sich immer mehr Energie im Medium ansammelt.

Diese Idee setzten Maimans Kollegen Fred J. McClung und Robert W. Hellwarth nur Monate nach dessen Pioniertat um. Das Ergebnis präsentierten sie 1961, ebenfalls in den Laboren der Hughes Aircraft Company. Sie hatten ein Rubinmedium zwischen zwei Spiegel platziert, unterbrachen aber während des Pumpens zunächst den optischen Weg zwischen den Spiegeln. So wuchs die Energiedichte im Medium stark an. Erst als sie die Unterbrechung wieder aufhoben – das musste natürlich extrem schnell geschehen –, konnten die Photonen wieder im Resonator zirkulieren. Binnen weniger Umläufe vermochten sie nun die gespeicherte Energie als einzelnen Puls abzuziehen. Eine kurze Rechnung zeigt, dass bei einem Spiegelabstand von etwa 10 bis 30 Zentimetern jeder Umlauf zwischen 0,66 und 2 Nanosekunden dauert. Diese Zeitskala liegt bereits um vier oder fünf Größenordnungen unter der Dauer, während derer ein Medium gepumpt wird. Letztlich lieferte das Instrument der beiden Forscher Pulse mit 100 Nanosekunden Dauer. In seiner Spitzenleistung, von knapp einem Megawatt übertraf es Maimans Laser um mehr als das 1000-Fache.

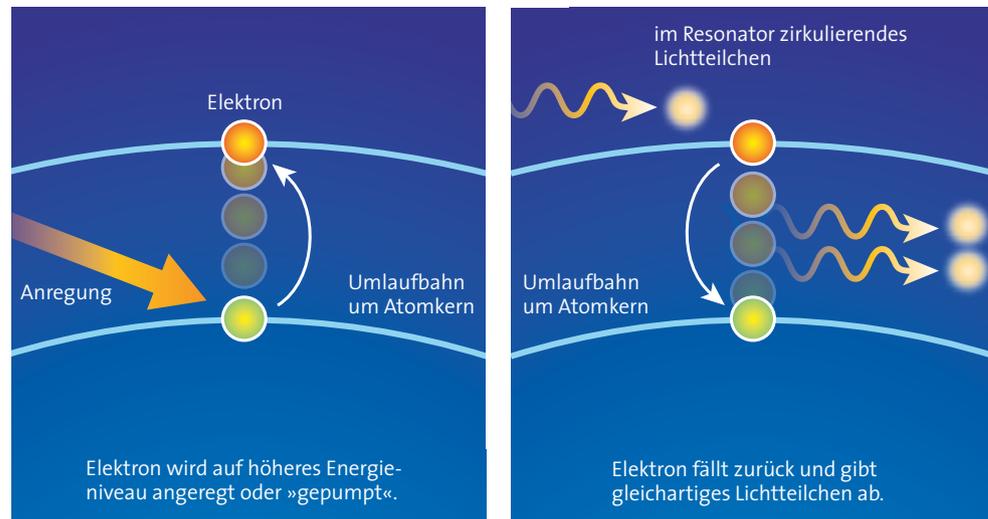
### Güteschaltung zur Pulsverkürzung

Entscheidend ist bei diesem Verfahren der so genannte Q-Faktor des Resonators. Dieser Quality Factor oder Gütefaktor besitzt einen hohen Wert, wenn nur geringe optische Verluste des hin- und herlaufenden Strahls auftreten. Und er ist niedrig oder null, wenn der optische Weg blockiert ist. Instrumente der Art, wie sie McClung und Hellwarth entwickelt hatten, bezeichnet man darum als gütegeschaltete oder Q-switched-Laser. Seither hat man vor allem auch so genannte Nd:YAG-Festkörperlaser, deren aktives Medium aus mit Neodym (Nd) versetztem Yttrium-Aluminium-Granat (YAG) besteht, oder Laser auf Basis von neodymdotiertem optischem Glas um die Q-Switching-Technik ergänzt. Kommerziell erhältliche Nd:YAG-Laser mit Güteschaltung liefern heute Pulse, in denen bis zu ein Joule an Energie steckt und die gerade einmal ein bis zehn Nanosekunden lang sind. Die Spitzenleistung solcher Geräte liegt also bei annähernd einem Gigawatt ( $10^9$  Watt).

1960 entwickelte der US-Physiker Theodore Maiman den ersten Laser. Er bestand aus einem Rubinstab, dessen Stirnseiten mit reflektierendem Material beschichtet waren. Das helle Licht einer um den Stab gewundenen Blitzlichtlampe hob die Elektronen der Chromionen des Rubins auf ein höheres Energieniveau. Fielen sie wieder herunter, ließen sie einen tiefroten Lichtstrahl mit einer Wellenlänge von 694 Nanometern entstehen.



In einem Lasermedium kreisen Elektronen um die Atomkerne. Sie lassen sich, etwa durch Licht, auf ein höheres Energieniveau anregen (links). Fliegt dann ein Photon mit bestimmten Eigenschaften vorbei (rechts), bewirkt es, dass ein angeregtes Elektron wieder auf ein niedrigeres Niveau fällt. Dabei gibt es seine Energie in Form eines weiteren Photons mit denselben Eigenschaften ab, das auch in dieselbe Richtung fliegt. Der passierende Lichtstrahl besitzt nun ein Photon mehr.



Indem man einen Nanosekundenpuls aus einem Q-switched-Laser durch zusätzliche Lasermedien leitet, lässt er sich sogar noch weiter verstärken. Dieses Grundprinzip heißt MOPA-Architektur (*Master Oscillator, Power Amplifier*). Auf MOPA-Basis entwickelte das kalifornische Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) schon ab den frühen 1970er Jahren eine Serie zunehmend größerer und leistungsstärkerer Laser. Treibende Kraft dieser Entwicklung war die Hoffnung, eines Tages extrem energiereiche Laserpulse von vielen hundert Kilojoule auf »Brennstoff«-Targets richten zu können, um deren Atomkerne mittels der so genannten Trägheitsfusion verschmelzen zu lassen (siehe »Wann kommt der Fusionsreaktor?« in *SdW* 5/2010, S. 88).

Weil die Forscher immer energiereichere Pulse erzeugen wollten, wurde allerdings bald der Bau von Systemen mit mehrfachen MOPA-Strahlen erforderlich, die man einander überlagern konnte. Zudem benötigten die Laser Medien größerer Querschnittsflächen. Denn wird die Intensität (also die Leistung pro Fläche) zu hoch, kommt es zu starker Wärmeentwicklung und anderen unerwünschten Effekten. Als Verstärkermaterial nutzten die Forscher stets Nd-dotiertes Glas, denn dieses Material ließ sich mit Durchmessern von vielen Dezimetern in der nötigen Qualität herstellen.

### 192 Strahlen, gebündelt zu einem strahlenden Blitz

Die Entwicklung von Lasern für die Trägheitsfusion am LLNL überspannt mehr als vier Jahrzehnte. 1974 entstand dort der 100-Joule-Laser Cyclops. Schon 1976 löste ihn der zweistrahlige Argus ab. 1977 wurde Shiva konstruiert, ein 20-strahliger 10-Kilojoule-Laser. Auf ihn folgte 1985 der 100-Kilojoule-Laser Nova, der mit zehn Strahlen arbeitete. 2008 fand diese Entwicklung ihren bisherigen Höhepunkt, als am LLNL die National Ignition Facility in Betrieb ging: Die NIF liefert Nanosekundenpulse, in denen Laserlicht aus 192 einzelnen Strahlen gebündelt ist. Sie setzen insgesamt fast vier Millionen Joule frei! Energie und Leistung der Pulse übertreffen die der ersten Q-switched-Pulse also um etwa das Milliardenfache.

Auf MOPA-Architekturen basieren auch Gaslaser für die Hochenergieforschung. Dazu gehören Kohlendioxidlaser, die in den 1970er und 1980er Jahren etwa am Los Alamos National Laboratory in New Mexico entwickelt wurden, und Kilojoule-Nanosekundenlaser wie der am Naval Research Laboratory in Washington D. C. konstruierte Ultraviolettlaser Nike, der ein Krypton-Fluorid-Gas nutzt. Das Nonplusultra für energiereiche Nanosekundenlaser blieb indessen die Verwendung von Nd-dotiertem Glas.

Das Ende des Leistungswachstums markieren jedoch selbst Q-switched-Laser und MOPA-Architektur noch nicht. Der zweite wesentliche Durchbruch bei der Entwicklung von Lasern mit hoher Spitzenleistung fand praktisch zeitgleich mit der Entwicklung des Q-Switching statt. Die so genannte Modenkopplung, schon Mitte der 1960er Jahre vorgestellt, revolutionierte die Lasertechnologie, indem sie die Pulsdauern gemessen an Q-Switching-Geräten noch um mehrere Größenordnungen verringerte. Modengekoppelte Laser erreichen Pulsdauern von weniger als einer Pikosekunde ( $10^{-12}$  Sekunden) und in einigen Fällen sogar von wenigen Femtosekunden ( $10^{-15}$  Sekunden). Mit ihrer Hilfe konnten physikalische und chemische Phänomene auf bis dahin unerreichbaren Zeitskalen untersucht werden, was Forschern detaillierte Einsichten in die Bewegung von Atomen und die Reaktionen von Molekülen verschaffte. Ahmed H. Zewail (siehe seinen Artikel »Bewegte Bilder aus der Nanowelt« ab S. 76) wurde 1999 für seine Arbeit auf diesem Gebiet mit dem Nobelpreis für Chemie gewürdigt.

Was bedeutet Modenkopplung? Der heisenbergschen Unschärferelation zufolge sind bestimmte Paare physikalischer Eigenschaften nicht gleichzeitig exakt messbar. Misst man also eine Größe genau, lässt sich die andere nur »unscharf« bestimmen. Im Fall von Laserstrahlen besagt diese Relation, dass ein Puls mit umso höherer Frequenzbreite einhergeht, je kürzer er ist. Mit anderen Worten: Ein ultrakurzer Puls besteht nicht aus wenigen, sondern zwangsläufig aus einer Überlagerung vieler Frequenzen.

Cyclops



Janus



Argus



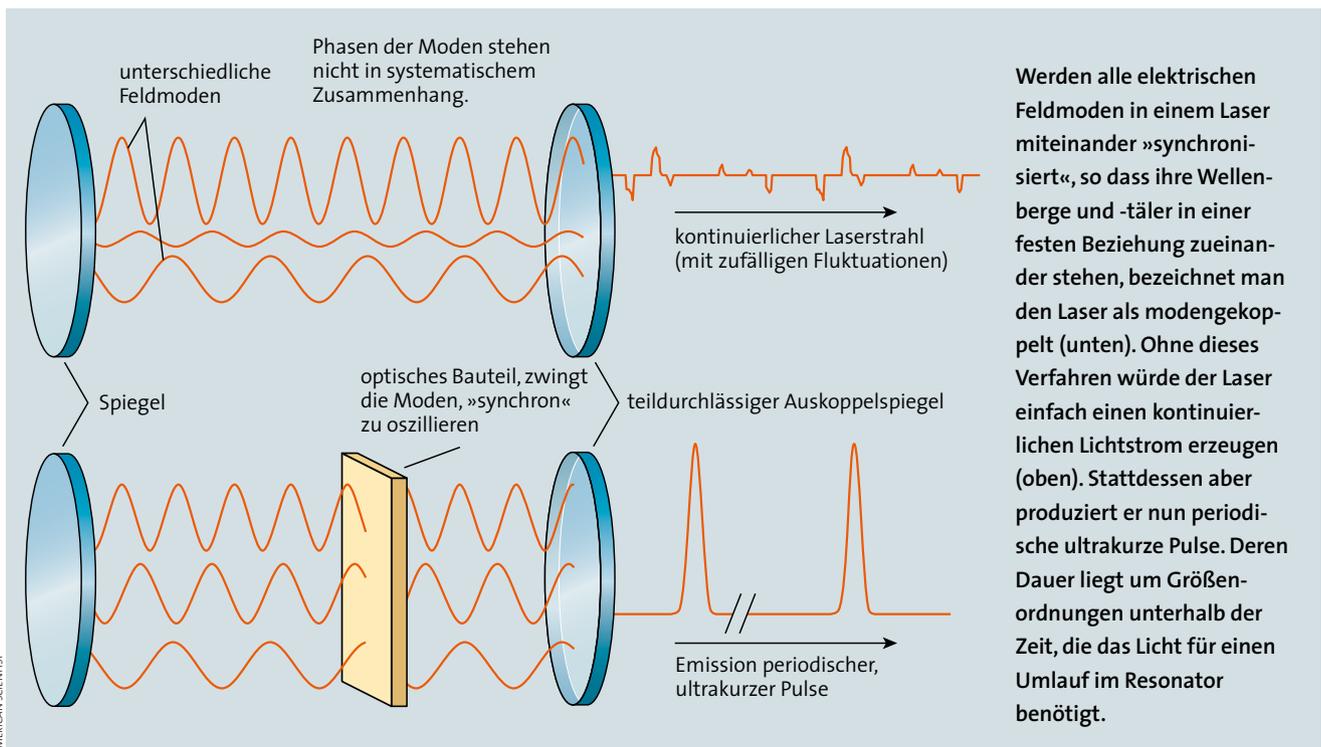
FOTOS DIESER REIHE: LAWRENCE LIVERMORE NATIONAL LABORATORY UND TODD DITMIRE

All diese Frequenzen müssen nun zwischen die beiden Spiegel eines Resonators »passen«, in dem sie als so genannte stehende Wellen hin- und herwandern. Sie können viele unterschiedliche Wellenlängen besitzen; die einzige Bedingung besteht darin, dass der Raum zwischen den Spiegeln einem ganzzahligen Vielfachen der Wellenlänge entspricht. Die einzelnen Schwingungsmuster der Wellen, die sich dabei bilden, werden als Moden bezeichnet, ähnlich wie die Grund- und Oberschwingungen einer Gitarrensaite. Abhängig vom Lasermedium können einige wenige oder gar Zehntausende solcher Moden verstärkt werden.

Wie lässt sich die gesamte Bandbreite der Wellenlängen nutzen, um einen entsprechend kurzen Lichtpuls zu erzielen? Der Schlüssel zum Erfolg liegt darin, alle Moden zu zwingen, mit genau derselben Phase zu oszillieren, sozusagen im

Gleichschritt zu marschieren. Besitzen also möglichst viele Wellenberge und -täler eine feste Phasenbeziehung zueinander, spricht man von gekoppelten Moden. Dann summieren sich die sinusförmigen Wellen tatsächlich zu einem kurzen Puls. Und je mehr Frequenzen man hineinsteckt (die auch tatsächlich vom Lasermedium verstärkt werden müssen), desto kürzer wird der Puls. Lässt man nun einen Teil des im Resonator umherwandernden kurzen Lichtpulses durch den Auskoppelspiegel aus dem Gerät austreten, stellt man fest: Die erzielte Pulsdauer ist viel geringer als die Zeit, die ein Puls für einen Umlauf im Resonator benötigt.

Modenkopplung kann mittlerweile auf unterschiedlichste Arten erzielt werden. Die meisten Techniken fallen in eine von zwei Kategorien: aktive und passive Modenkopplung. Bei der zuerst entwickelten aktiven Variante wird ein Mate-



Shiva



Nova



National Ignition Facility



Auf Basis der so genannten MOPA-Architektur lassen sich energiereiche Laserpulse erzeugen, die nur Nanosekunden andauern. Am intensivsten wurde diese Technik am kalifornischen Lawrence Livermore National Laboratory entwickelt und eingesetzt. 1974 errichteten die Wissenschaftler dort den Cyclops: den ersten Laser, dessen aktives Medium aus neodymdotiertem Glas bestand und der mehr als ein Joule Energie lieferte. Janus, die zweistrahlige Version dieses Lasers, wurde der erste Terawatt-

Laser. Auf dem ebenfalls zweistrahligen Argus beruht wiederum Shiva: Ein 20-strahliger Nanosekundenlaser, dessen Pulsenergie rund 20 000 Joule erreichte. 1985 wurde er durch den zehnstrahligen Nova ersetzt, der die zehnfache Energie lieferte. Im Jahr 2008 führte schließlich die milliardenteure National Ignition Facility 192 separate Laserstrahlen so zusammen, dass die resultierende Pulsenergie eine Million Joule betrug. Sie dient nun zu Kernfusionsexperimenten.

rial in den Resonator eingebracht, das für optische Verluste im umlaufenden Lichtstrahl sorgt (was dem Verändern der Güte beim Q-Switching-Verfahren ähnelt). Die Größe der Verluste wiederum lässt sich durch elektrische Signale verändern. Moduliert man sie mit einer Wiederholungsrate, die genau der Umlaufzeit des Laserpulses im Resonator entspricht, zwingt dies die Lasermoden zur Kopplung.

### Der Laser moduliert sich selbst

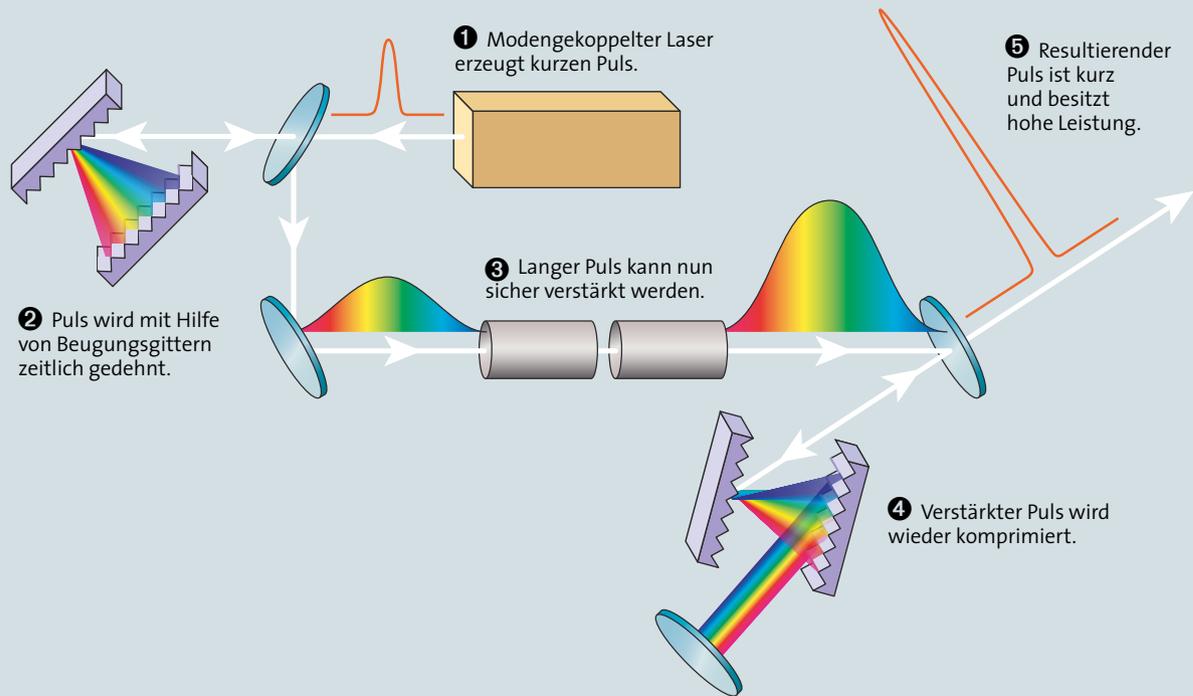
Bei der passiven Modenkopplung wird ein Bauelement in den Resonator eingebracht, das für intensitätsabhängige Verluste sorgt: Es absorbiert viel Licht, solange dessen Intensität gering ist, aber kaum Licht, wenn dessen Intensität hoch ist (man sagt, die Absorption saturiert bei hoher Lichtintensität). Letztlich führt dies dazu, dass der Laser seine Verluste gewissermaßen selbst moduliert und schließlich in einen Zustand kommt, in dem die Moden gekoppelt sind und die geringsten Verluste auftreten. Genau dieses Verfahren hat die Basis für die modernen Höchstleistungslaser gelegt, indem es die bislang kürzesten Pulse möglich machte.

Bemerkenswerterweise wurde der erste modengekoppelte Laser bereits 1964 konstruiert. Der in den Bell Telephone Labs mit Hauptsitz im US-Bundesstaat New Jersey vorgestellte Helium-Neon-Laser produzierte Pulse von ungefähr einer Nanosekunde Dauer. Ende der 1960er Jahre erzeugten modengekoppelte, mit Blitzlichtlampen gepumpte Festkörperlaser bereits Pulse von unter 100 Pikosekunden Dauer. 1972 stellten Erich P. Ippen, Charles V. Shank und Andrew Dienes dann den ersten modengekoppelten Farbstofflaser vor. In

ihm dienten Fluoreszenzfarbstoffe in Lösung als Medium. Diese in den späten 1960er Jahren entwickelte Art von Medium erlaubte es, Laser über eine ganze Anzahl von Frequenzen hinweg abzustimmen. Die Forscher konnten sie also entweder mit einzelnen ausgewählten Frequenzen betreiben oder aber mit der ganzen Frequenzbandbreite. In den frühen 1980er Jahren durchbrachen die kürzesten Pulse der Farbstofflaser dank der hohen Bandbreite die Ein-Pikosekunde-Schranke und stießen damit in den Femtosekundenbereich vor. 1987 demonstrierten Shank und seine Mitarbeiter mit einem modengekoppelten Farbstofflaser sogar Pulse, die gerade einmal sechs Femtosekunden dauerten – ein Rekord, der nahezu 15 Jahre Bestand hatte.

Ein weiterer Durchbruch in der Technologie der Modenkopplung führte schließlich zu den heutigen Höchstleistungslasern. Er datiert auf das Jahr 1982: Damals setzte Peter Moulton erstmals titandotierte Saphirkristalle (Ti:Saphir) als Medium in einem Festkörperlaser ein. Ti:Saphir besitzt eine extrem große Verstärkungsbandbreite, verstärkt also so viele Frequenzen, dass die daraus resultierenden Pulsdauern gerade einmal vier oder fünf Femtosekunden betragen. Die Eigenschaften dieses Materials sind denen der Fluoreszenzfarbstoffe weit überlegen: Der Umgang mit einem solchen Laserkristall ist viel einfacher, und er lässt sich in ausgezeichneter optischer Qualität herstellen. In einem Ti:Saphir-Laser können mit passiver Modenkopplungstechnologie wie der Kerr-Linsen-Kopplung, die 1990 fast zufällig im Labor von Wilson Sibbett an der schottischen University of St Andrews entdeckt wurde, ohne Weiteres Laserpulse von weniger als

## Wie sich ultrakurze Laserpulse gefahrlos verstärken lassen: das Prinzip der *chirped pulse amplification*



AMERICAN SCIENTIST

Verstärkt man einen ohnehin schon kurzen Laserpuls, kann die Laseroptik durch die hohe Intensität Schaden nehmen. Abhilfe schafft die so genannte *chirped pulse amplification* (CPA): Ein kurzer Laserpuls aus einem modengekoppelten Laser (1) wird zeitlich gedehnt (»gechirpt«), um seine Intensität zu verringern. Dazu lenkt man ihn durch Beugsgitter (2). Den aufgeweiteten Puls kann man nun gefahrlos verstärken (3). Anschließend wird der Prozess umgekehrt (4), der Puls also wieder komprimiert. Am Ende erhält man einen sehr kurzen Puls hoher Leistung (5).

20 Femtosekunden Dauer erreicht werden. Zwar wurden seither weitere Kristalle mit ebenso nützlichen Eigenschaften entdeckt, doch für Forscher, die mit ultraschnellen Geräten arbeiten, sind modengekoppelte Ti:Saphir-Laser trotzdem das Standardwerkzeug geblieben.

Die kurzen Pulse modengekoppelter Laser kann man schließlich auch noch durch eine MOPA-Verstärkerkette schicken. Auf diese Weise baute man am LLNL im Jahr 1975 Janus, den ersten Terawatt-Laser ( $10^{12}$  Watt). Hierfür wurden modengekoppelte Pulse von ungefähr 100 Pikosekunden Dauer in einer Nd:Glas-Verstärkerkette auf ungefähr 100 Joule verstärkt. Mittels geeigneter Laserfarbstoffe ließ sich aber auch die Energie der Femtosekundenpulse eines modengekoppelten Farbstofflasers noch erhöhen. So konnte man in den frühen 1980er Jahren Laser bauen, die auf einem Labortisch Platz fanden und trotzdem über ein Gigawatt Spitzenleistung bei einer Pulsdauer von unter einer Pikosekunde erbrachten.

Allerdings lässt sich die Leistung nicht beliebig weiter erhöhen. Bei gegebener Querschnittsfläche des Lasermediums wächst die Intensität des Laserpulses, während er durch die Verstärker tritt. Wird diese Intensität zu hoch, kommt es zu nichtlinearen Effekten – ein große Herausforderung für die Konstrukteure von Hochleistungslasern, denn dadurch verändern sich wichtige Eigenschaften der Pulse. Das größte Problem beruht auf der Tatsache, dass sich der Brechungsindex jedes Materials (das Maß, in dem es Licht bricht) ganz leicht erhöht, wenn die Lichtintensität steigt. In Alltagssituationen lässt sich diese Veränderung völlig vernachlässigen. Nicht aber bei der Verstärkung eines Laserpulses.

### Wie Schüsse aus einem Schrotgewehr

Jeder reale Lichtstrahl erfährt als Folge von Unvollkommenheiten in den optischen Bauteilen, die er durchquert, kleine räumliche Modulationen seiner Intensität. Gewissermaßen im Zentrum eines kleinen Intensitätsmaximums »sieht« der Strahl dann einen erhöhten Brechungsindex. Dieser verzögert die Phase der Welle, so dass sich eine konkav gekrümmte Wellenfront um das Maximum bildet, die nichts anderes als eine zusätzliche Fokussierung des Strahls an ebendieser Stelle ist. Das Problem der Intensitätsmodulationen verstärkt sich also von selbst, und schließlich kann die Intensität an einzelnen Orten so hoch werden, dass die teure Optik in der Laserkette durch »Laserschüsse« wie aus einem Schrotgewehr beschädigt wird. Bis Mitte der 1980er Jahre nahm man an, dass der einzige Weg, das Problem zu lösen, darin bestünde, die Querschnittsfläche des Mediums immer weiter zu

vergrößern. Schon wegen der hohen Qualitätsanforderungen an das Material und an die zugehörige Optik war das jedoch weder technisch zu leisten noch finanziell tragbar.

1985 fand man allerdings eine elegante Lösung. Gerard Mourou, der damals an der University of Rochester im US-Bundesstaat New York forschte, entwickelte mit Hilfe seiner Schülerin Donna Strickland ein Verfahren, das seither die ultraschnellen Spitzenleistungslaser revolutioniert hat, also jener Geräte mit Pulsdauern ab dem Pikosekundenbereich. Es nutzt die Tatsache, dass sich ein ultraschneller Laserpuls aus eine Reihe von Wellenlängen zusammensetzt. Mourou und Strickland ordneten optische Bauteile wie Prismen oder Brechungsgitter so an, dass Licht unterschiedlicher Wellenlängen unterschiedliche Wegstrecken zurücklegen musste. Die Dauer des resultierenden Laserpulses erhöht sich dann gegenüber der des ursprünglichen Pulses, weil zum Beispiel rotes Licht auf Grund seiner großen Wellenlänge dem Puls ein wenig voraneilt, während ihm blaues Licht mit seiner geringeren Wellenlänge folgt. Der Puls wird also gedehnt.

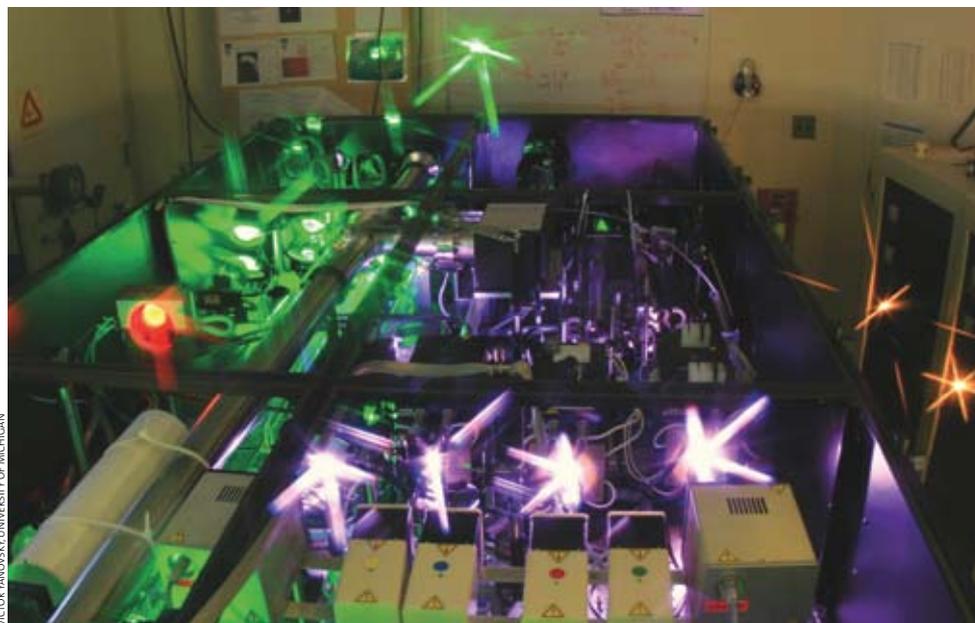
### Terawatt-Laser auf dem Labortisch

Mourous schöne Idee bestand darin, einen ultraschnellen Laserpuls optisch zu dehnen, ihn zu »chirpen«, bevor man ihn verstärkte. So würde man ihn auf viele hunderte Pikosekunden verlängern und dadurch seine Intensität so niedrig halten, dass es nicht zu Schäden an der Optik oder im Medium käme. Dann wären auch keine außergewöhnlich aufwändigen optischen Bauteile erforderlich. Nach dem Durchgang des Pulses durch die MOPA-Kette, die seine Energie erhöht, würde man ihn mit derselben Technik wieder auf (fast) dieselbe kurze Dauer rekomprimieren. Mourou und Strickland gelang das Kunststück. Mit Hilfe der so genannten *chirped pulse amplification* (CPA) bauten sie ein kompaktes Tischlasersystem, das Pulse mit Dauern im Pikosekundenbereich

und einer Leistung von fast 100 Gigawatt erzeugte. Das schafften damals nur die aufwändigsten Großlaser der nationalen Labore. Schon drei Jahre nach der ersten Vorstellung der CPA-Technik demonstrierten Mourou und seine Kollegen darüber hinaus einen Kompaktlaser, den Table Top Terawatt oder auch T<sup>3</sup>. Er passte auf einen Labortisch (*table top*) und besaß dennoch eine Spitzenleistung von über einem Terawatt. Die CPA-Technik machte daraufhin rasante Karriere in Forschungsinstituten weltweit.

Insbesondere die großen Labore statteten sich mit Geräten aus, die Dutzende Terawatt Leistung erzielten. Für Wissenschaftler lag die Motivation zum Bau solcher Hochleistungs-CPA-Laser darin, die Wechselwirkung von Licht mit Materie bei immer höherer Intensität zu untersuchen. Fokussiert man die Strahlen moderner Multiterawatt-Laser auf einen Fleck von wenigen Mikrometern, übertrifft ihre so genannte fokussierte Intensität die Intensität des Sonnenlichts auf der Erde um den Faktor  $10^{18}$  oder  $10^{19}$ . So können Forscher unter anderem die Physik ultrastarker Felder untersuchen. Die intensiven Pulse lassen sich aber auch auf ein Gas oder einen Festkörper richten. Aus diesem entsteht dann ein Plasma mit Temperaturen von Millionen Grad Celsius, das es wiederum erlaubt, kontrollierte Kernfusionen zu zünden. Auch lassen sich an ihm Extrembedingungen erforschen, wie sie etwa im Inneren eines explodierenden Sterns herrschen.

Zunächst wurden die Multiterawatt-Ultrakurzpulslaser allesamt aus Nd:Glas-Verstärkern gebaut. Bald aber setzten die Entwickler zur Konstruktion von CPA-Lasern Ti:Saphir ein, das Licht in einem sehr breiten Frequenzband verstärken kann. Mit seiner Hilfe ließen sich Pulse verstärken, die anschließend auf Pulsdauern von nur 30 Femtosekunden rekomprimiert wurden. Seit dem ersten Einsatz von Ti:Saphir in solchen Instrumenten – das war um 1990 in den Laboren



Titandotierter Saphir (Ti:Saphir) ist heute bei Tischlasern mit CPA weit verbreitet. Der Hercules an der University of Michigan (Foto) erreicht eine Leistung von vielen Terawatt. Seine Pulse dauern nur 30 Femtosekunden.



LAWRENCE LIVERMORE NATIONAL LABORATORY

Der Petawatt-Laser am Lawrence Livermore National Laboratory in Kalifornien erreichte als erster eine Leistung von über  $10^{15}$  Watt. Dafür bedienten sich die Forscher der CPA (siehe Grafik S. 56). Dabei wird der Puls zunächst zeitlich gedehnt, um gefahrlos verstärkt werden zu können. Für die anschließende Rekompresseion des Pulses bedurfte es sehr großer Beugungsgitter (rechts im Foto).

der University of Michigan und der kalifornischen Stanford University – ist Ti:Saphir darum zum vorherrschenden Material in diesem Gebiet geworden. Von den Hochleistungs-CPA-Lasern haben neben der Grundlagenphysik unter anderem die Chemie ultraschneller Vorgänge, manche Bildgebungsverfahren in der Biologie, Präzisionswerkzeugmaschinen und zahlreiche weitere Anwendungen profitiert.

### Der Rekord hielt kaum länger als ein Jahr

Trotz der Vormachtstellung, die Ti:Saphir bei CPA-Lasern erlangte, blieb Nd:Glas dasjenige Verstärkermaterial, mit dem sich die höchste Laserleistung erzeugen ließ. 1995 durchbrach ein CPA-Laser des LLNL auf Nd:Glas-Basis die 100-Terawatt-Grenze. Der Rekord hielt aber kaum länger als ein Jahr, dann überbot ihn ein weiteres LLNL-Team unter Leitung von Michael Perry. Aufbauend auf einem Strahl aus dem zehnstrahligem Nd:Glas-Laser Nova nutzte es die CPA-Technik, um einen Laserpuls von 500 Joule zu erzeugen, der anschließend auf eine Dauer von ungefähr 400 Femtosekunden rekompriert wurde. Erstmals war damit eine Leistungsspitze von über einem Petawatt ( $10^{15}$  Watt) erzeugt worden, und die fokussierte Intensität des Geräts erreichte fast  $10^{21}$  Watt pro Quadratcentimeter! Perrys Petawatt-Laser war allerdings eine technische Tour de Force. Beispielsweise waren Brechungsgitter von fast einem Meter Größe erforderlich – die das LLNL erst einmal mit massivem Forschungsaufwand entwickeln musste –, um seine Pulse zu komprimieren.

Zu den Geräten dieser Klasse zählen inzwischen auch der Vulcan am englischen Rutherford Appleton Laboratory oder der Petawatt-Laser, den wir selbst an der University of Texas in Austin entwickelt haben. Dank neuer Technik ist ihre Qualität weiter gestiegen; außerdem lassen sich die Pulse eines Nd:Glas-CPA-Lasers mittlerweile auf rund 100 Femtosekunden komprimieren. Fortschritte hat zudem die Ti:Saphir-CPA-Technik gemacht. In Laboren wie dem Japanese Atomic

Energy Research Institute in der Nähe von Kioto, am Laboratoire d'Optique Appliquée in Frankreich und am LLNL können Petawatt-Laser nun Pulse von 20 bis 50 Femtosekunden Dauer erzeugen. Mit Hilfe solcher Systeme beschleunigen Forscher zum Beispiel Protonen, um sie in der Krebstherapie einzusetzen, oder erzeugen Elektronenstrahlen, deren Energie allmählich an jene ihrer Pendanten in den großen Teilchenbeschleunigern heranreicht.

Trotz aller Verbesserungen der CPA-Technologie ist die Pulsspitzenleistung seit dem Jahr 2000 aber nicht über den Wert von einem Petawatt gestiegen. Das dürfte sich demnächst ändern. Die Europäische Union fördert das Programm »Extreme Light Infrastructure«, das Konstruktion und Bau einer Laseranlage mit einer Leistung von 200 Petawatt plant – und derzeit schnelle Fortschritte erzielt. In den USA plant man sogar die Entwicklung eines Exawatt-Lasers ( $10^{18}$  Watt). Dabei wird eine vielfach bewährte Nd:Glas-Architektur verwendet, wobei deren neuartiges Laserglas es erlauben soll, auch Pulse mit einer Dauer um 50 Femtosekunden noch zu verstärken.

Unterdessen befindet sich auch die Wissenschaft, die derart leistungsstarke Maschinen in vollem Umfang nutzen kann, in einem aufregenden Entwicklungsprozess. Alles sieht danach aus, dass sie selbst Exawatt-Laser für eine wachsende Zahl von Experimenten einsetzen können. Die Rekordjagd nach den leistungsstärksten Lichtblitzen dürfte also ebenfalls noch lange nicht am Ende sein. ~

### DER AUTOR



**Todd Ditmire** ist Professor für Physik an der University of Texas in Austin und leitet das Texas Center for High Intensity Laser Science sowie das Texas Petawatt Project. Zuvor war er Projektleiter am kalifornischen Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL).

© American Scientist

### QUELLEN

**Ditmire, T.:** The Texas Petawatt Laser and Technology Development toward an Exawatt Laser. Vorgestellt bei der Jahrestagung der Optical Society »Frontiers in Optics 2009« am 13. Oktober 2009

**Hecht, J.:** Beam: The Race to Make the Laser. Oxford University Press, Oxford, 2005

**Parker, A.:** Empowering Light: Historic Accomplishments in Laser Research. In: LLNL Science and Technology Review, S. 22–29, September 2002

**Perry, M. D., Mourou, G.:** Terawatt to Petawatt Subpicosecond Lasers. In: Science 264, S. 917–924, 1994

### WEBLINKS

[www.rp-photonics.com/encyclopedia\\_de.html](http://www.rp-photonics.com/encyclopedia_de.html)

Frei zugängliche Enzyklopädie für Photonik und Lasertechnologie

[www.youtube.com/user/SPIETV#p/u](https://www.youtube.com/user/SPIETV#p/u)

Englischsprachige Videos zur Lasertechnik – zum Beispiel mit Gérard Mourou, Peter Moulton und Theodore Maiman

[www.50-jahre-laser.com/50-jahre/meilensteine.html](http://www.50-jahre-laser.com/50-jahre/meilensteine.html)

Meilensteine der Lasertechnik (auf der Internetseite eines Laserherstellers)





HANS LEHRACH ist einer der führenden Genomforscher weltweit. Er entdeckte die für Morbus Huntington verantwortliche Genmutation und war im Rahmen des Humangenomprojekts maßgeblich an der Entzifferung von Chromosom 21 beteiligt.

- ▶ geboren 1946 in Wien
- ▶ Studium der Chemie
- ▶ Forschungsstationen an der Harvard University, am European Molecular Biology Laboratory (EMBL) in Heidelberg sowie am Imperial Cancer Research Fund (ICRF) in London
- ▶ seit 1995 Direktor am Max-Planck-Institut für molekulare Genetik in Berlin
- ▶ Mitglied im Führungskomitee des internationalen 1000-Genom-Projekts

STREITGESPRÄCH

# Der modellierte Patient

Wirkung, Nebenwirkung, keine Wirkung – verschiedene Menschen reagieren höchst unterschiedlich auf ein und dasselbe Medikament. Auf der Suche nach der optimalen Therapie für den Einzelnen wollen Forscher künftig alle zur Verfügung stehenden Präparate vorab per Computersimulation testen. Basis der virtuellen Extrabehandlung ist die Genomsequenz des jeweiligen Patienten. Doch lassen sich die Versprechungen einhalten? Und vor welche ethischen Herausforderungen stellt uns die individualisierte Medizin? Ein kritischer Dialog mit dem Genetiker **Hans Lehrach** und dem Philosophen **Urban Wiesing**

*Herr Professor Lehrach – Sie leisten Grundlagenforschung auf dem Weg zu einer individualisierten Medizin. Woran arbeiten Sie konkret?*

**PROF. DR. HANS LEHRACH:** Wir sequenzieren die Genome und Transkriptomte von 1000 Krebspatienten, um daraus ein Computermodell zu gewinnen, auf dessen Basis Onkologen ihre Patienten besser behandeln können. Wenn das Modell steht, können wir es individuell an jeden Patienten und seinen Tumor anpassen. An diesem virtuellen Patienten simulieren wir daraufhin alle in der Realität zur Verfügung stehenden Behandlungen beziehungsweise ihre Kombinationen. Auf diese Weise lässt sich für jeden Betroffenen die optimale Therapie ermitteln.

*Das wäre dann das Ende der Standardtherapie?*

**LEHRACH:** Hoffentlich! Die Erfolgsraten der meisten heutigen Krebsmedikamente sind miserabel. Im Schnitt erhöhen sie die Lebenszeit eines Patienten nur um ein bis zwei Monate. Und diese Verlängerung geht häufig mit einer drastischen Verschlechterung der Lebensqualität durch Nebenwirkungen einher. Wir verwenden den Menschen hier noch immer als sein eigenes Versuchskaninchen: Ein Patient erhält Standardmedikament A, und wenn dieses nicht wirkt, folgt Standardmedikament B. Dabei könnten wir schon längst wissen, dass A auf Grund der Änderungen im Genom des Tumors bei diesem Patienten gar nicht helfen kann – und B womöglich auch nicht.

**URBAN WIESING** ist einer der renommiertesten deutschen Medizinethiker. Zu seinen Forschungsgebieten zählen unter anderem »Reproduktionsmedizin und genetische Diagnostik« sowie »Verantwortung des Arztes«.

- ▶ geboren 1958 in Ahlen
- ▶ Studium der Medizin, Philosophie, Soziologie und Medizingeschichte
- ▶ seit 1998 Direktor des Instituts für Ethik und Geschichte der Medizin an der Universität Tübingen
- ▶ seit 2004 Vorsitzender der Zentralen Ethikkommission bei der Bundesärztekammer
- ▶ seit 2009 Mitglied des Medical Ethics Committee des Weltärztebundes



ALLE FOTOS DIESES INTERVIEWS: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / JAN-PETER BOENING

*Wie muss man sich das genau vorstellen: Wie simulieren Sie die Wirkung einzelner Medikamente?*

**LEHRACH:** Wir versuchen, die biologischen Netzwerke im Tumor und im Patienten möglichst genau im Computermodell nachzubilden – vergleichbar mit der Wettervorhersage, die ja auf einem Modell des Wetters im Computer beruht. Der Unterschied besteht darin, dass das Wettermodell uns nur helfen kann, das Wetter richtig vorherzusagen. Im Computermodell des Tumors können wir testen, wie der Tumor auf bestimmte Behandlungen reagieren würde.

*Herr Professor Wiesing – bei der Genomsequenzierung im großen Stil werden ja enorme Datenberge angehäuft. Was werden wir mit diesen Daten alles anfangen?*

**PROF. DR. DR. URBAN WIESING:** Wir wissen momentan noch nicht, wie wir diese Daten zu interpretieren haben oder was sie für die praktische Medizin bedeuten. Ebenso ist unklar, ob aus ihrer Interpretation Therapien folgen werden – und ob diese besser wären als die bisherigen. Ich zweifle nicht daran, dass wir grundlegende neue Erkenntnisse gewinnen werden. Aber was zuweilen im Rahmen genetischer Grundlagenforschung versprochen wird, scheint mir nicht realistisch.

*Sie teilen Herrn Lehrachs positiven Blick in die Zukunft einer individualisierten Medizin also nicht?*

**WIESING:** Was Herr Lehrach prophezeit, hat Rudolf Virchow vor weit mehr als 100 Jahren schon in Aussicht gestellt: Wären die biologischen Grundlagen erforscht, kämen die Therapien quasi von selbst. Bisher ist das nicht eingetreten. Bei vielen Erkrankungen wissen wir inzwischen ja recht genau, was auf molekularer Ebene geschieht und wo man dort eingreifen könnte – aber die neuen Therapien wirken keineswegs immer besser.

*Können Sie ein Beispiel geben?*

**WIESING:** Nehmen Sie Typ-II-Diabetes. Heute ist sehr genau bekannt, was hier auf molekularer Ebene passiert, und wir

können Insulin von außen zuführen. Aber die Behandlung von Diabetes beschränkt sich nicht darauf! Es ist sogar so: Die beste Wirkung stellt sich dann ein, wenn sich die Betroffenen bewegen und anders ernähren. Damit keine Missverständnisse aufkommen – ich halte die Genomforschung für wichtig. Ich glaube aber, dass die Wissenschaft einen Fehler macht, wenn sie dort einseitig einen Schwerpunkt setzt und andere Aspekte vergisst. In der praktischen Medizin zählen auch psychologische und soziale Faktoren, etwa eine gute Arzt-Patienten-Beziehung.

**LEHRACH:** Sie missverstehen, was wir machen. Ich will ein Modell des Patienten im Computer haben und an diesem 50 000 verschiedene Medikamentenkombinationen testen. Wir entwickeln Simulationen, die die gesamte Komplexität eines Tumors und der verschiedenen Körpergewebe des Patienten erfassen. Dabei stellen wir fest, welche Behandlungen helfen können – und welche den Zustand des Betroffenen unnötig verschlechtern. Und um das zu machen, müssen wir den Patienten auf molekularer Ebene untersuchen. Ich glaube nicht, dass diese Informationen durch ein Gespräch mit dem Patienten gewonnen werden können. Gut möglich, dass wir bei Diabetes mit Verhaltensänderungen viel erreichen. Ein wirklich aussagekräftiges Modell für Diabetes gibt es ja noch nicht. Wenn es einmal eines gibt, würde es auch den Effekt von Verhaltensänderungen voraussagen.

**WIESING:** Sie stellen in Aussicht, dass wir dank rationaler Modelle auf klinische Versuche verzichten können. Dass wir quasi im Voraus berechnen, wie ein Patient reagieren wird. So etwas ist in der Geschichte der Medizin schon mehrfach versprochen, aber noch nie erfüllt worden. Im Gegenteil: Die moderne evidenzbasierte Medizin ist ja gerade eine Gegenbewegung dazu. Sie versucht eine in der Theorie entwickelte Therapie durch klinische Forschung zu evaluieren, weil sich Berechnungen der Wirksamkeit als trügerisch erwiesen ha-

ben. Ärzte sollen dann nur dem folgen, was sich empirisch als zielführend erwiesen hat.

**LEHRACH:** Dass frühere biologische Ansätze ins Leere gelaufen sind, hat einen einfachen Grund. Man ging vom Organismus als einer Art Maschine aus. Doch darüber sind wir hinweg. Die Zündkerze eines Autos hat genau eine Funktion: das Treibstoffgemisch zu zünden. Ist sie kaputt, tauschen wir sie aus. Aber der Organismus besteht aus zahlreichen Komponenten, die allesamt mehrere Funktionen haben und millionenfach miteinander interagieren. Das hat man früher so nicht gewusst. Durch Modellierung können wir heute die Komplexität des Organismus erfassen – und dann zum Beispiel herausfinden, bei welchen Patienten eine bestimmte Behandlung nicht funktionieren wird.

*Sparen Sie durch Vermeidung von unnötigen Therapien die notwendigen Kosten ein? Die Sequenzierung von Patientengenomen wird es ja nicht zum Nulltarif geben.*

**LEHRACH:** Bei vielen Medikamenten sieht die Lage derzeit so aus: Eine Anwendung kostet vielleicht 30 000 Euro, aber nur bei rund einem Viertel stellt sich eine Besserung ein. Alle anderen zeigen ausschließlich Nebenwirkungen. Die können wir ihnen ersparen.

**WIESING:** Herr Lehrach – was Sie auf Grund Ihrer Computersimulationen vermuten, muss man aber doch letzten Endes wieder in klinischen Studien testen. Wir können mit Modellen nur die Anzahl und die Richtung der klinischen Versuche beeinflussen; ersetzen können wir sie nicht. Das heißt aber, dass wir eben doch nicht mittels der Modelle vorhersagen können, ob ein Patient geheilt wird oder nicht.

**LEHRACH:** Ich sage nicht, dass wir auf klinische Versuche verzichten können. Aber statt sie mit tausenden Patienten durchzuführen – von denen die meisten nicht auf das verwendete Medikament ansprechen –, brauchen wir womöglich nur wenige, vielleicht 20 Patienten zu behandeln. Und zwar solche, bei denen wir auf Grund der Modellierung ziemlich sicher sind, dass das Medikament wirken wird. Unter Umständen sind wir sogar langfristig in der Lage, Modelle als solche klinisch zu testen. Wenn man etwa zeigen könnte, dass von 100 Krebspatienten, die gemäß der Aussage eines Modells behandelt wurden, 90 Prozent nach fünf Jahren noch leben, wäre das Modell als solches validiert.

*Herr Lehrach – Sie sagten, dass Sie mit Hilfe der Gensequenz vorhersagen könnten, dass ein bestimmtes Medikament bei einem bestimmten Patienten nicht wirken wird. Vorausgesetzt das stimmt, ersparen Sie dem Betroffenen dadurch unnötige Nebenwirkungen. Aber bessere Heilungschancen hat er dadurch noch nicht.*

**LEHRACH:** Das ist nicht wahr. Denn einerseits können wir in Computermodellen wesentlich mehr Medikamente durchprobieren, als wir je an einem Patienten testen könnten, dazu noch in beliebig vielen Kombinationen. Andererseits gibt es zahlreiche Medikamente, die nur in einem anderen Bereich

der Medizin zugelassen sind oder sogar vollständig in klinischen Studien scheiterten, weil sich zufällig unter den Probanden zu viele befinden, die nicht auf das Medikament ansprechen. All diese in der Praxis nicht berücksichtigten Präparate könnten unter Umständen bestimmten, auf Grund ihres Tumorgenoms und Transkriptoms charakterisierten Patienten

helfen. Im Modell können wir das austesten.

**WIESING:** Aber mal Hand aufs Herz: Wie viele neue Medikamente haben Sie auf diese Weise schon entwickelt?

**LEHRACH:** Bislang noch keines.

**WIESING:** Sehen Sie. Und wie wollen Sie von der molekularen Ebene zum Beispiel auf die Ebene von verbreiteten Nebenwirkungen wie Kopfschmerz, Schwindel, Übelkeit schließen? Das geht nicht!

**LEHRACH:** Manches geht schon: Wenn Sie zum Beispiel in einem Tumor einen bestimmten Signalweg lahmlegen, dann schalten Sie ihn in allen Zellen aus. Dass das unter Umständen Kopfschmerzen oder Darmprobleme auslöst, überrascht niemanden. Aber natürlich können wir nicht alle Nebenwirkungen aller Medikamente voraussagen.

*Bei welchen weiteren Erkrankungen außer Krebs könnte sich eine genetisch maßgeschneiderte Behandlung als sehr erfolgreich erweisen: Herz-Kreislauf? Rheuma? Depression?*

**LEHRACH:** Individualisierung ist immer dann sinnvoll, wenn die gängigen Medikamente nur einem Teil der Patienten nützen. Soweit ich weiß, ist das bei Depression zum Beispiel der Fall.

## Wir verwenden den Menschen noch immer als sein eigenes Versuchskaninchen

Hans Lehrach

## Schlüsselbegriffe der Genetik

Das **Genom** ist die Gesamtheit der Erbinformation einer Zelle. Diese liegt als **DNA** (Desoxyribonukleinsäure) vor. Ein Gen ist ein Abschnitt der DNA, der in **RNA** (Ribonukleinsäure) übersetzt werden kann und oft den Bauplan für ein Protein enthält. Die Synthese von RNA anhand der DNA-Vorlage nennen Genetiker **Transkription**. Das **Transkriptom** bezeichnet die Gesamtheit aller RNA-Moleküle, die zu einem bestimmten Zeitpunkt in einer Zelle vorliegen – quasi eine Momentaufnahme der genetischen Aktivität der Zelle.

**Epigenetische Veränderungen** sind chemische Modifikationen der DNA – etwa durch Anheften von Methylgruppen –, welche die Aktivität von Genen regulieren. Sie beeinflussen, inwieweit Gene in RNA umgesetzt werden, und damit auch die Proteinherstellung. Epigenetische Effekte werden durch Umweltfaktoren hervorgerufen und sind vererbbar, obwohl die eigentliche DNA-Sequenz unverändert bleibt. So kann beispielsweise starkes Hungern in frühen Lebensjahren die Aktivität bestimmter Gene verändern, was sich noch in späteren Generationen bemerkbar macht.



Wir stehen unweigerlich vor der Frage: Können wir eine solidarische Gesellschaft bleiben, wenn die Zukunft des Einzelnen so viel vorhersagbarer wird?

Urban Wiesing

**WIESING:** Aber Herz-Kreislauf-Erkrankungen sind ein Gegenbeispiel. Vermutlich können wir anhand der Genomanalyse bald herausfinden, dass ein bestimmter Mensch eine leicht erhöhte Wahrscheinlichkeit gegenüber der Durchschnittsbevölkerung hat, im Lauf der nächsten 20 Jahre einen Herzinfarkt zu erleiden. Doch ich brauche jemanden ja nur anzusehen, zu wiegen, seinen Blutdruck zu messen und ihn zu fragen, ob er raucht – und schon weiß ich viel mehr! 80 bis 90 Prozent der Herzinfarkte ließen sich durch konventionelle Prävention vermeiden. Auch hier sehe ich die Gefahr, dass wir uns demnächst auf die Genomanalyse konzentrieren und darüber alle anderen Perspektiven vernachlässigen.

**LEHRACH:** Das ist jetzt in gewisser Weise ein Argument gegen jeden Fortschritt. Wenn wir die Wahl haben, ob wir Patienten mit teuren Medikamenten behandeln, die sie kränker machen, oder mit Medikamenten, die für sie optimal geeignet sind, dann sollten wir Letzteres machen – unabhängig davon, ob sie ihr Leid durch jahrelanges Rauchen womöglich selbst verschuldet haben.

**WIESING:** Ich argumentiere auf keinen Fall gegen den Fortschritt, ich differenziere: Sie müssen unterscheiden zwischen dem Fortschritt in der Biologie einerseits und in der praktischen Medizin andererseits. Letzteren müssen wir klinisch-empirisch nachweisen, und bislang hat sich zumeist eine multiperspektivische Sichtweise in der Therapie als erfolgreich erwiesen, die nicht nur genetische Aspekte berücksichtigt.

*In den letzten Jahren hat die Epigenetik unser Bild von der Bedeutung der Gene präzisiert, vielleicht auch relativiert. Arbeiten Sie eigentlich noch an dem wirklich spannenden Projekt, Herr Lehrach, oder müssten Sie nicht viel weiter gehen?*

**LEHRACH:** Die Epigenetik befasst sich mit den Informationen, die nicht im DNA-Kode selbst stecken, aber trotzdem

von Zelle zu Zelle, manchmal auch von Organismus zu Organismus vererbt werden. Oft sind das Modifikationen der DNA, die im Lauf des Lebens entstehen und Gene aktivieren oder stilllegen. Auf diese Weise haben Umweltfaktoren einen gewissen Einfluss auf epigenetische Veränderungen, aber ein Großteil dieser Prozesse unterliegt dennoch der Kontrolle durch die Gene. In erster Linie wirken epigenetische Einflüsse auf der Ebene der Transkription. Wenn wir also das Transkriptom zusammen mit dem Genom analysieren, können wir die Epigenetik bei unserer Arbeit mitberücksichtigen – und zwar viel besser, als wenn wir uns nur die epigenetische Modifikation anschauen. Denn dann lernen wir nichts über ihre Auswirkungen. Wenn wir allerdings nur die DNA haben und das Transkriptom nicht bestimmen können, ist die epigenetische Modifikation ein guter Marker.

*Gibt es technische Grenzen, die Sie derzeit noch daran hindern, die epigenetischen Veränderungen gleich mitzubestimmen, also zum Beispiel die Methylierung der DNA?*

**LEHRACH:** Technisch stellt das gar kein Problem dar. Es ist lediglich eine Kostenfrage, weil es zusätzlichen Aufwand bedeutet. Hier stehen wir vor dem Problem, dass man für die Entwicklung und Validierung eines neuen Konzepts meist erst dann Geld bekommt, wenn man es bereits entwickelt und validiert hat.

*Herr Wiesing – was sind die größten ethischen Herausforderungen, wenn immer mehr Genome, vielleicht auch Transkriptome sequenziert werden: Sind es Zufallsbefunde, ist es die Datensicherheit?*

**WIESING:** Ich glaube nicht, dass wir unsere ethischen Grundüberzeugungen ändern müssen. Doch was ihre Umsetzung betrifft, stehen wir vor zahlreichen Herausforderungen. Das geht los mit der Überschussinformation: Die allermeisten

Daten aus der Sequenzierung können wir ja noch gar nicht interpretieren. Dennoch müssen wir entscheiden, wie wir mit ihnen umgehen: Man kann sie sofort nutzen, man kann sie verwerfen, oder man speichert die Daten, um sie bei späterer Gelegenheit mit dem Patienten zu besprechen. Ein ganz anderes Problem besteht darin, dass wir bisher zwar wissen, dass wir sterben, aber nicht wann, und genau dies wollen wir ändern.

*Wie meinen Sie das?*

**WIESING:** Die Zukunft des Einzelnen wird durch die prädiktive Genetik weniger ungewiss. Ich denke, dass das für das Lebensgefühl eines Menschen höchst bedeutsam ist. Er muss lernen, damit umzugehen: Will ich meine Zukunft eher offen lassen, oder will ich alles wissen, um vielleicht entsprechende Entscheidungen zu fällen? Eine weitere Schwierigkeit besteht darin, dass nicht nur der Bürger ein Interesse an seinen Daten hat, sondern auch andere, beispielsweise Versicherungen und Arbeitgeber. Hier stehen wir unweigerlich vor der Frage: Können wir eine solidarische Gesellschaft bleiben, wenn die Zukunft des Einzelnen so viel vorhersagbarer wird?

de ich persönlich jedenfalls das sehr vage Arbeitnehmersrisiko in Kauf nehmen.

*Wenn Sie die Daten eines Krebspatienten nach erfolgreicher Behandlung speichern und sich später einmal daran ablesen ließe, dass der Betreffende mit großer Wahrscheinlichkeit an Alzheimer erkranken wird, würden Sie es ihm sagen?*

**LEHRACH:** Ich würde es dem Patienten freistellen, ob er nur Informationen zu behandelbaren Krankheiten will, alle Informationen oder überhaupt keine. Denn für mich ist die Autonomie jedes einzelnen Menschen sehr wichtig.

**WIESING:** In diesem Punkt stimme ich Ihnen zu, möchte aber eines hinzufügen: Die Ärzte sollen gut beraten. Das ist eine komplexe Aufgabe. Die Patienten brauchen zusammengefasstes, verständliches Expertenwissen, um mit ihren Daten vernünftig umgehen zu können. Derlei Beratung kostet und muss finanziert werden.

*Womit wir bei der Frage nach Verteilungsgerechtigkeit angekommen sind.*

**WIESING:** Wir müssen davon ausgehen, dass all das, worüber wir hier sprechen, Hightechmedizin ist, die derzeit allenfalls



Kontroverse Diskussion in freundschaftlicher Atmosphäre. Das Gespräch fand in den Räumen des Max-Planck-Instituts für molekulare Genetik in Berlin-Dahlem statt. Frederike Buhse und »Spektrum«-Chefredakteur Carsten Könneker (Mitte) moderierten es.

Das Gendiagnostikgesetz hat diese Frage für weite Bereiche geregelt, aber wie das Problem sich in Zukunft entwickelt, ist ungewiss.

**LEHRACH:** Es muss stets das Recht des Einzelnen bleiben, zu entscheiden, was mit seinen Daten geschieht. Natürlich liegt es im Interesse des Patienten, die Daten aufzubewahren, wenn das Genom einmal sequenziert worden ist, und immer wieder neu mit dem voranschreitenden Wissen abzugleichen. Denn die nicht behandelbaren Krankheiten von heute sind die behandelbaren von morgen. Und solange es um tödliche Erkrankungen geht, fällt die Arbeitgeberproblematik aus meiner Sicht eher wenig ins Gewicht. Wenn ich die Gefahr einer Kündigung um ein Prozent erhöhe, jedoch gleichzeitig mein Risiko halbiere, an Krebs zu erkranken, dann wür-

zehn Prozent der Weltbevölkerung zugutekommt. Daher sollten wir uns bei dieser Diskussion auch vor Augen führen, dass der Großteil der Menschheit ganz andere medizinische Probleme hat.

**LEHRACH:** Ich glaube, die Methoden werden viel weiter verbreitet sein. An China oder Indien etwa wird die Entwicklung, über die wir hier sprechen, nicht vorbeigehen. Wir sollten versuchen, jedem alle Möglichkeiten zur Verfügung zu stellen, anstatt sie im Namen der Gerechtigkeit zu beschränken.

*Sie blicken sehr optimistisch in die Zukunft, Herr Lehrach. Sehen Sie gar keine Probleme?*

**LEHRACH:** Im Hinblick auf die individualisierte Medizin sehe ich durchaus viele Probleme, doch sie sind nicht direkt an

die Grundlagenforschung geknüpft. So müssen wir klären, wie bestimmte Leistungen abgerechnet werden sollen – und ob die Ärzte überhaupt etwas machen wollen, was viel Mühe bereitet und ihnen relativ wenig Geld einbringt. Womöglich müsste sich das Verfahren ändern, wie wir Medikamente zu lassen. Auch ist die rechtliche Situation solcher Ärzte zu klären, die nicht einfach das unangreifbare Standardmedikament A verabreichen – auch wenn sie wissen, dass es nichts nützen wird –, sondern das, was ihnen die Modellierung rät.

*Kritiker der Genforschung haben auch in Bezug auf Genpatente rechtliche Bedenken. Wenn wir richtig informiert sind, halten Sie selbst Patente an Genen, Herr Lehrach. Was sind das für Gene, und wie äußert es sich rein praktisch, ein Gen patentiert zu haben?*

**LEHRACH:** Möglicherweise steht tatsächlich auf einigen wenigen Genpatenten mein Name, etwa beim Huntington-Gen, an dessen Entdeckung ich beteiligt war. Aber ich wusste nicht, dass das irgendjemandem geschadet hätte. In gewisser Weise ist es auch sinnvoll, für bestimmte Anwendungen Gene zu patentieren, etwa für Medikamente. Ich bin aber entschieden dagegen, Gene zu patentieren, wenn dies zum Beispiel die medizinische Diagnose erschwert. Grundsätzlich ist die Zeit, in der man Gene patentieren konnte, lange vorbei. Das waren die 1990er Jahre.

**WIESING:** Das Thema »Genpatente« ist sehr strittig. Ich bezweifle grundsätzlich, dass man etwas, was man in der Natur vorfindet, patentieren kann. Was man freilich schützen lassen kann, ist der Weg dahin, die Methode. Darüber hinaus muss man fragen, ob die Patentgesetzgebung dazu anregt, Forschung zu betreiben, oder ob sie diese eher verhindert.

*Derzeit explodiert die medizinische Fachliteratur zum Thema Enhancement. Es geht um die Verbesserung körperlicher oder geistiger Eigenschaften Gesunder. So etwas könnte auf Grundlage einer individuellen Genomsequenzierung womöglich besser funktionieren. Herr Wiesing – wie sehen Sie diese Möglichkeit?*

**WIESING:** Wir stehen hier vor einer großen anthropologischen, ethischen und sozialen Herausforderung. Alle bisherigen Medikamente, die Leistungen des Menschen nachweislich verbessern können, haben langfristig fürchterliche Nebenwirkungen, was sie inakzeptabel macht. Ob es jemals welche geben kann, die den Einzelnen ohne negative Folgen in bestimmten kognitiven, vielleicht auch emotionalen Eigenschaften verbessern, ist ungewiss. Das müsste man klinisch erproben. Aber ich denke, die Wissenschaft sollte sich nicht auf Medikamente für Gesunde konzentrieren. Wir haben drängendere Probleme.

*Inzwischen kann jeder Interessierte sein Genom für deutlich unter 20 000 Euro entziffern lassen. Warum sollte das jemand ohne konkreten Hinweis auf eine Krankheit machen?*

**WIESING:** Das Motiv kann reine Neugierde sein. Vielleicht auch die Aussicht, anhand der Ergebnisse mögliche Risiken

durch entsprechenden Lebenswandel zu verringern oder biografische Entscheidungen zu fällen, die beispielsweise die Fortpflanzung betreffen. Das ist Privatangelegenheit jedes Einzelnen, aber die beteiligten Mediziner müssen natürlich für die Qualität der Untersuchungen bürgen. Die Direct-to-Consumer-Kits, die Sie heute im Internet bestellen können, erfüllen nicht die nötigen Qualitätsanforderungen. Bei dieser Methode schicken Sie eine Speichelprobe an ein Labor und erhalten äußerst fragwürdige Aussagen über Erkrankungsrisiken. Zudem ist keine ausreichende Beratung sichergestellt.

**LEHRACH:** Was die Direct-to-Consumer-Kits angeht, stimme ich absolut zu: Es ist billiger und möglicherweise vom Ergebnis her nicht so verschieden, stattdessen ein Horoskop zu lesen.

*Sollte am Ende jeder sein Genom sequenzieren lassen, um sein Leben besser planen zu können?*

**WIESING:** Nein, das ist die individuelle Entscheidung eines jeden Einzelnen.

**LEHRACH:** Richtig. Ich sehe das jedoch als das Recht des Einzelnen auf das Streben nach Glück, als einen nächsten Schritt in Richtung der Befreiung des Menschen. Denn je mehr Informationen uns zur Verfügung stehen, desto mehr befreien wir uns aus der Leibeigenschaft.

*Aber ergibt sich hier nicht eine neue Leibeigenschaft – indem uns das Wissen über die eigenen Gene zu Lebensentscheidungen zwingt?*

**WIESING:** Wahrscheinlich. Zwar können wir durch die neuen Technologien über mehr verfügen – zum Beispiel über unsere Lebensgestaltung, vielleicht auch über behandelbare Erkrankungen und Prävention. Gleichzeitig wird aber auch über uns verfügt. Wir sind abhängig von neuen Experten und stehen vor neuen Herausforderungen, auf die wir reagieren müssen. Das Leben unter diesen hochtechnisierten Bedingungen hat gewiss Vorteile. Aber wir dürfen nicht glauben, dass wir dafür keinen Preis zu zahlen hätten. ~

*Die Fragen stellten »Spektrum«-Chefredakteur Carsten Könneker und die Wissenschaftsjournalistin Frederike Buhse.*

## Das Streitgespräch im Spektrum-Video



Auszüge des Streitgesprächs zwischen Hans Lehrach und Urban Wiesing können Sie in einem 45-Minuten-Mitschnitt auf [spektrum.de](http://spektrum.de) verfolgen:

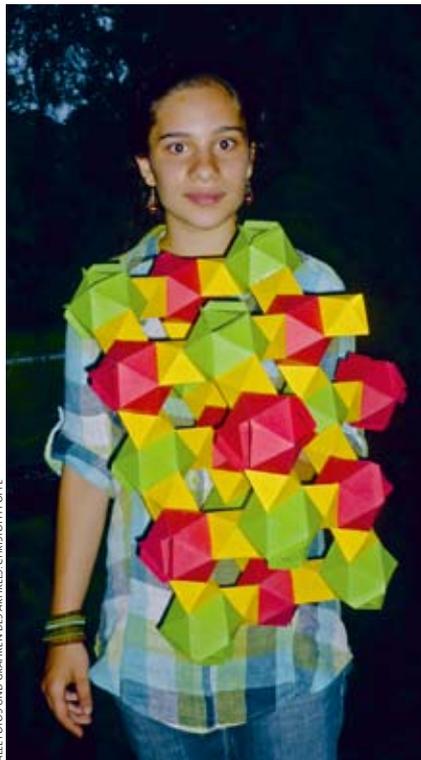
[www.spektrum.de/streitgesprach](http://www.spektrum.de/streitgesprach)

GEOMETRIE

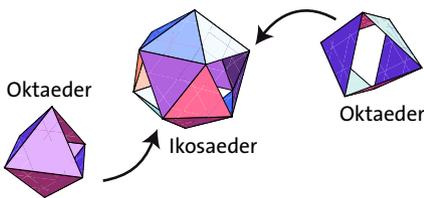
# Unendliche regelmäßige Körper

Kann es ein geometrisches Gebilde geben, bei dem sich in jeder Ecke sieben, acht oder gar neun gleichseitige Dreiecke treffen? Die Antwort lautet: Ja – sofern sich dieses Gebilde durch den ganzen unendlichen Raum erstreckt.

VON CHRISTOPH PÖPPE



ALLE FOTOS UND GRAFIKEN DES ARTIKELS: CHRISTOPH PÖPPE



Die 16-jährige Mona präsentiert ein endliches Stück aus dem unendlichen platonischen Körper  $\{3, 7\}$ , das sie gemeinsam mit anderen Jugendlichen im vergangenen Sommer auf dem Preisträgertreffen des Mathematik-Wettbewerbs »Känguru« gebaut hat. Das Atom dieses Körpers ist zusammengesetzt aus einem Ikosaeder und zwei Oktaedern, denen gewisse Flächen weggenommen wurden (Grafik).

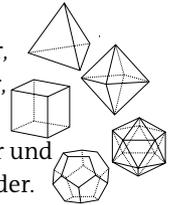
Hauptberuflich arbeitet Dirk Huylebrouck als Dozent am Fachbereich Architektur der Hochschule für Wissenschaft und Kunst »Sint-Lucas« in Brüssel. Seine Liebe zur Mathematik zeigt sich in zahlreichen Kurzfilmen bei YouTube, seinen Arbeiten über den Knochen von Ishango, der als das früheste materielle Zeugnis mathematischen Denkens gilt (Spektrum der Wissenschaft Spezial 2/2006 »Ethnomathematik«, S. 10), seiner Kolumne in der Zeitschrift »The Mathematical Intelligencer« sowie in einem jüngst fertig gestellten Werk, in dem er einen neuen, überraschenden Blick auf ein sehr klassisches Thema der Geometrie wirft: die platonischen Körper.

Huylebrouck verallgemeinert diesen überkommenen Begriff an einer unscheinbaren Stelle. Mit modernen mathematischen Mitteln findet er dann eine große Anzahl potenzieller neuer Formen. Der Versuch, Ordnung in diese Vielfalt zu bringen, führt ihn unversehens auf noch gänzlich unbeackertes Gelände. So kurz kann der Weg von der antiken Mathematik bis zum Unbekannten sein!

Die platonischen Körper sind der Abschluss und Höhepunkt des klassischen mathematischen Werks der Antike, der »Elemente« des Euklid. Das XIII. und letzte Buch ist dem Nachweis gewidmet, dass es genau fünf von ebenen Flächen begrenzte räumliche geometrische Körper (Polyeder) mit dem größtmöglichen Maß an Regelmäßigkeit gibt. Genauer: Wenn gefordert ist, dass ein Körper von lauter gleichen, regelmäßigen (gleichseitigen und gleichwinkli-

gen) Vielecken begrenzt sein soll, von denen sich in jeder Ecke gleich viele unter den gleichen Winkeln treffen, dann gibt es genau fünf Möglichkeiten, diese Forderung zu erfüllen. Nach dem Schweizer Mathematiker Ludwig Schläfli (1814–1895) pflegt man einen solchen Körper durch die Kurzbezeichnung  $\{p, q\}$  zu charakterisieren; das heißt, er ist von lauter regelmäßigen  $p$ -Ecken begrenzt, von denen sich jeweils  $q$  in einer Ecke treffen. Die fünf platonischen Körper sind

- ▶  $\{3, 3\}$ : das Tetraeder,
- ▶  $\{3, 4\}$ : das Oktaeder,
- ▶  $\{4, 3\}$ : der Würfel,
- ▶  $\{3, 5\}$ : das Ikosaeder und
- ▶  $\{5, 3\}$ : das Dodekaeder.



Zum Beispiel wird vom Dodekaeder nur gefordert, dass sich in jeder seiner Ecken drei regelmäßige Fünfecke treffen. Dass es insgesamt zwölf Stück sind und diese sich allesamt zu einer geschlossenen und höchst symmetrischen Figur fügen, mag schon etwas wundersam erscheinen und ist auch nicht ganz einfach zu beweisen.

Nun kommen vor reichlich 250 Jahren die respektlosen modernen Mathematiker, allen voran Leonhard Euler (1707–1783), und scheren sich nicht um diese Beziehungen zwischen Längen und Winkeln. Sie betreiben Topologie; das ist die Wissenschaft von den Eigenschaften räumlicher Gebilde, die unter beliebigen Deformationen, Zerschneiden und Zusammenkleben ausgenommen, erhalten bleiben (daher auch der Spitzname »Gummigeometrie«). Es stört sie also nicht, wenn ein Dodekaeder schief, krumm und bucklig ist.

Trotz dieser bemerkenswerten Missachtung können sie beweisen, dass es nicht mehr als die bekannten fünf platonischen Körper geben kann – allerdings nicht, dass es sie mit ihren Symmetrieeigenschaften tatsächlich gibt.

Dazu verwenden die Topologen den nach Euler benannten Polyedersatz: »Ecken plus Flächen gleich Kanten plus zwei«, oder weniger salopp ausgedrückt:

$$E - K + F = 2,$$

wobei  $E$  die Anzahl der Ecken,  $K$  die der Kanten und  $F$  die der Flächen eines beliebigen Polyeders (Vielflächners) ist.

Der Beweis geht dann so: Der Körper soll aus lauter Flächen mit  $p$  Kanten bestehen, und in jeder seiner Ecken sollen sich  $q$  Flächen treffen. Dann ist  $pF = 2K$ , denn alle Flächen zusammen haben  $pF$  Kanten, was aber die Kanten doppelt zählt, da jede Kante zu zwei Flächen gehört. Andererseits gehören zu jeder Kante zwei Ecken. Demnach gäbe es insgesamt  $2K$  Ecken; da aber auf diese Weise jede Ecke  $q$ -fach gezählt wird, gilt  $qE = 2K$ . Diese beiden Gleichungen setzen wir in die eulersche Polyederformel ein. Das ergibt

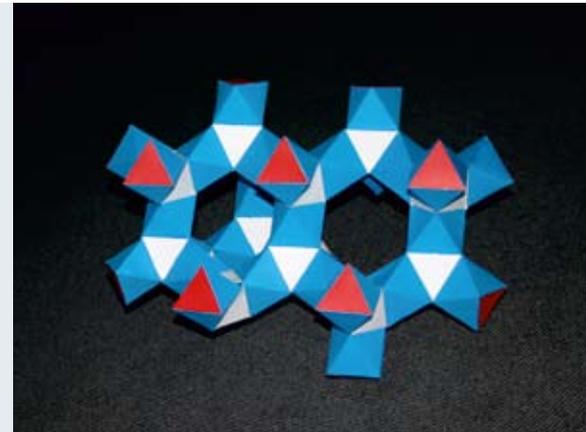
$$\frac{2K}{q} - K + \frac{2K}{p} = 2$$

oder auch

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{2} + \frac{1}{K}.$$

Die rechte Seite dieser Gleichung ist stets größer als  $1/2$ . Sowohl  $p$  als auch  $q$  müssen mindestens 3 sein; Zweiecke gibt es ebenso wenig wie Ecken mit nur zwei angrenzenden Flächen. Wenn aber beide größer als 3 sind, ist die linke Seite der Gleichung kleiner als  $1/2$ , was nicht sein darf. Also muss eine der beiden Zahlen  $p$  und  $q$  gleich 3 und die andere höchstens gleich 5 sein, denn  $1/3 + 1/6$  ist gleich  $1/2$  und damit schon zu klein. Folglich sind die einzigen verbleibenden Möglichkeiten  $\{3, 3\}$ ,  $\{3, 4\}$ ,  $\{4, 3\}$ ,  $\{3, 5\}$  und  $\{5, 3\}$ , was zu beweisen war.

Interessant wird dieser Zugang, wenn man die Fragestellung auf nicht-konvexe platonische Körper erweitert. Nach wie vor suchen wir Polyeder aus



## Unendliche Polyeder nach Diamantenart

In dem platonischen Körper  $\{3, 7\}$  (links) sind die Ikosaeder so durch oktaedrische Tunnel miteinander verbunden wie die Kohlenstoffatome in einem Diamantkristall. Rote und grüne Ikosaeder sind spiegelbildlich zueinander. Man erkennt Sechsringe, die ebenso »gewellt« sind wie Benzolringe, und findet einen Fundamentalbereich aus zwei Ikosaedern plus vier Oktaedern, der in unendlich vielen parallelverschobenen Exemplaren den ganzen Körper ausmacht. Weiße Dreiecke kennzeichnen die Stellen, an denen man sich dieses endliche Teilstück fortgesetzt denken muss.

Im  $\{3, 8\}$  (rechts) bilden Tetraeder (weiß), die durch Oktaeder verbunden sind, die Sechsringe, die sich ineinander verhäkelt (jedes Tetraeder gehört vier Ringen an) über den ganzen Raum erstrecken. Die »Wundflächen«, an denen das endliche Teilstück gewissermaßen aus dem unendlichen Körper herausgeschnitten wurde, sind hier rot.

lauter gleichen, regelmäßigen Vielecken und mit lauter gleichen Ecken. Aber wir bestehen nicht mehr darauf, dass der Körper konvex sein muss, das heißt keine einspringenden Ecken haben darf.

Die oben zitierte Version des eulerschen Polyedersatzes erzählt noch nicht die ganze Wahrheit. Die vollständige Formel lautet

$$E - K + F = 2 - 2g,$$

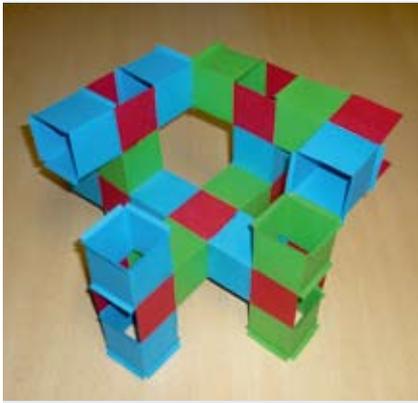
wobei  $g$  das »topologische Geschlecht« der Körperoberfläche ist. Anschaulich gesprochen ist  $g$  die Anzahl der Löcher; so hat ein Schwimmring oder eine Tasse mit einem Henkel (mathematisch: ein Torus) das Geschlecht 1, und eine Tasse mit  $g$  Henkeln hat das Geschlecht  $g$ . Die »undurchlöcherten« Körper, an die man zuerst zu denken pflegt, haben das Geschlecht 0; das gilt auch für die platonischen Körper.

Kann es denn einen verallgemeinerten platonischen Körper geben, der ungefähr wie ein Torus aussieht, nur

eckig? Nein. Den Torus mit einem Netz aus Dreiecken zu überziehen (die Oberfläche zu »triangulieren«), ist nicht schwer; es geht auch noch, allerdings deutlich mühsamer, mit gleichseitigen Dreiecken. Aber gleiche Winkel in den Ecken sind beim besten Willen nicht zu erreichen.

Wenn der Körper irgendwo eine einspringende Ecke hat, dann muss jede Ecke einspringend sein. Das aber ist nur möglich, wenn der Körper unendlich ausgedehnt ist.

Unendliche Polyeder sind zweifellos etwas gewöhnungsbedürftig. Nach wie vor bestehen sie aus ebenen Vielecken im Raum, die entlang ganzer Kanten miteinander verbunden sind. Aber von der Vorstellung, sie würden so etwas wie ein inneres Volumen einschließen, muss man sich verabschieden. Es kann allenfalls vorkommen, dass ein Polyeder den gesamten Raum in zwei sorgfältig voneinander getrennte Teile zerlegt, so wie angeblich gewisse Ameisenhügel von zwei einander feindlich



## Nicht ganz regelgetreue Polyeder

**Müssen die Flächen beiderseits einer Kante** in verschiedenen Ebenen liegen? Für klassische Polyeder erübrigt sich die Frage, für unendliche entscheidet sie über Sein oder Nichtsein. Die räumliche Variante des  $\{4, 5\}$  (links) besteht aus rot-grün und rot-blau gestreiften, unendlich langen Balken mit quadratischem Querschnitt. An jedem roten Streifen durchdringen sich ein rot-grüner und ein rot-blauer Balken so, dass sie aufeinander senkrecht stehen. Entlang jedes Balkens ragen die Partnerbalken abwechselnd nach rechts und links beziehungsweise nach oben und unten. J. Richard Gotts Polyeder  $\{5, 5\}$  (rechts) besteht aus lauter unendlichen Zweierreihen von in einer Ebene liegenden Fünfecken. Die Farben kennzeichnen die vier möglichen Orientierungen dieser Ebenen im Raum.

gesinnten Arten bewohnt werden, die jedoch nie in Kontakt zueinander geraten, weil eine unglaublich kompliziert gebaute Wand die beiden labyrinthartigen Wohngebiete trennt. Aber nicht einmal darauf kann man sich verlassen.

Selbst wenn man die strengen Bedingungen für platonische Körper anlegt – lauter gleiche regelmäßige Vielecke als Flächen, lauter gleiche Ecken –, ist die Situation unübersichtlich. Eine erschöpfende Aufzählung gibt es bislang nicht, schon weil die Abgrenzung umstritten ist (Kasten oben). Immerhin kann die eulersche Polyederformel, die bereits im konvexen Fall die Anzahl der Möglichkeiten auf fünf begrenzt, auch hier Klarheit schaffen.

Das funktioniert allerdings nicht durch einfaches Abzählen. Unendlich viele Ecken, Kanten, Flächen und Löcher lassen sich nicht sinnvoll addieren oder subtrahieren. Vielmehr muss man zu Hilfe nehmen, dass unendliche platonische Körper periodisch sind: Sie entstehen dadurch, dass man unendlich viele Exemplare eines gewissen Fundamentalbausteins parallel-

verschoben aneinandersetzt. Auf diesen Fundamentalbaustein wendet man dann die topologischen Argumente an. (Einen nichtperiodischen unendlichen platonischen Körper kann sich bislang anscheinend niemand vorstellen.)

Damit geht es in unserem unendlichen Gebilde ähnlich zu wie in einem Kristall: Um zu verstehen, wie dieser aufgebaut ist, zerlege man ihn, wie oben den unendlichen geometrischen Körper, in so genannte Fundamentalbereiche, die parallelverschoben aufeinander gestapelt den ganzen Kristall ausmachen. Es genügt dann zu wissen, wie sich die Atome in einem Fundamentalbereich zueinander verhalten. Wo gewisse Beziehungen, zum Beispiel Anziehungskräfte, über dessen Grenze hinweg wirken, ersetzt man den außerhalb sitzenden Partner durch sein Pendant im Inneren oder, was auf dasselbe hinausläuft, man identifiziert gegenüberliegende Seitenflächen eines Fundamentalbereichs miteinander.

Manchmal ist der Fundamentalbereich sogar in noch kleinere Teile zerlegbar, die zwar untereinander kongruent

sind, aber nicht unbedingt durch Parallelverschiebung auseinander hervorgehen. Dieses Vorgehen bietet sich beim Diamantkristall an (Spektrum der Wissenschaft 11/2007, S. 36): Da hat jedes Kohlenstoffatom seine Privatsphäre; sie hat die Form eines Tetraeders, von dessen vier Spitzen ein bisschen abgeschnitten ist. Alle Privatsphären – die Kristallografen nennen sie »Wigner-Seitz-Zellen« – sind kongruent zueinander.

Überraschenderweise kann man nun in eine derartige Wigner-Seitz-Zelle lauter gleichseitige Dreiecke so einpassen, dass sich der Fundamentalbaustein eines unendlichen platonischen Körpers ergibt; Huylebrouck nennt ein solches Stück eines Polyeders ein »Atom«. Manche Ecken des Atoms liegen im Inneren der Zelle, andere auf einer ihrer Grenzflächen. Setzt man dort eine weitere Zelle auf, so fallen die Ecken beider Grenzflächen zusammen und verbinden sich zu Ecken, die denen im Inneren gleichen, womit die letzte Bedingung für einen platonischen Körper erfüllt ist.

Ein solcher Körper, bei dem sich in jeder Ecke sieben gleichseitige Dreiecke treffen, also ein  $\{3, 7\}$ , kommt auf folgende Weise zu Stande: Erstens entferne man aus einem gewöhnlichen Ikosaeder vier seiner 20 Dreiecke derart, dass keine zwei von ihnen auch nur einen Eckpunkt gemeinsam haben. Die Ebenen dieser vier Dreiecke bilden dann ein Tetraeder. Zweitens entferne man aus einem gewöhnlichen Oktaeder zwei einander gegenüberliegende, parallele Seitenflächen. Zwei derart verstümmelte Oktaeder setze man – Loch auf Loch – auf das Ikosaeder, und fertig ist das Atom (Grafik S. 66). Im vollständigen Körper grenzt stets Oktaeder an Ikosaeder, und zwei durch einen Oktaedertunnel verbundene Ikosaeder sind Spiegelbilder voneinander (das Entfernen der vier Dreiecke bricht die Spiegelsymmetrie des Ikosaeders).

Das Atom des  $\{3, 7\}$  hat vier dreieckige Löcher; aber wie in der Kristallografie hat man sich je zwei dieser Löcher miteinander verbunden vorzustellen. Das wäre am konkreten Objekt nur unter den aberwitzigsten Verrenkungen zu bewerkstelligen, aber darauf kommt

es gar nicht an. Wir können ganz abstrakt topologisch die Flächen, Kanten, Ecken und Löcher des Atoms zählen. Dabei zählt das, was am Rand der Zelle liegt, nur zur Hälfte, denn eine Randecke wird ja erst zusammen mit ihrer Kollegin am Rand der Nachbarzelle zur vollwertigen Ecke; das Gleiche gilt für Kanten und Löcher. Demnach hat unser Atom 12 Ecken, 28 Flächen, 42 Kanten und das Geschlecht 2, denn die insgesamt vier Löcher liegen am Rand und zählen deshalb nur für zwei. Durch Einsetzen überzeugt man sich, dass die eulersche Polyederformel in ihrer erweiterten Form erfüllt ist.

### Die Liste der elf Kandidaten

Dirk Huylebrouck dreht nun den Spieß um und fragt, welche unendlichen platonischen Körper  $\{p, q\}$  denn die eulersche Polyederformel für  $g = 2$  überhaupt zulässt. Es ist etwas mehr Rechenarbeit als in dem eingangs beschriebenen Fall  $g = 0$ , aber die Bedingung, dass  $p, q, E, F$  und  $K$  positive ganze Zahlen und darüber hinaus  $E$  und  $F$  größer als 3 sein müssen, schränkt die Anzahl der Möglichkeiten stark ein. Am Ende bleibt eine Liste von elf Kandidaten:  $\{3, 7\}$ ,  $\{3, 8\}$ ,  $\{3, 9\}$ ,  $\{4, 5\}$ ,  $\{4, 6\}$ ,  $\{5, 5\}$ ,  $\{5, 4\}$ ,  $\{6, 4\}$ ,  $\{7, 3\}$ ,  $\{8, 3\}$  und  $\{9, 3\}$ .

Wohlgemerkt: Das topologische Argument liefert nur eine notwendige Bedingung. Jeder unendliche platonische Körper vom Geschlecht 2 muss zu der Liste gehören. Für jedes der elf Schläfli-Symbole stellt sich nun die Frage, ob es einen zugehörigen unendlichen platonischen Körper gibt – und die ist nicht in jedem Fall einfach zu beantworten. Schon für das  $\{3, 7\}$  musste man in nicht unbedingt naheliegender Weise mit Ikosaedern und Oktaedern hantieren.

Andere Körper sind etwas zugänglicher. So ist bekannt, dass der Oktaederstumpf – alle acht Dreiecke des Oktaeders sind durch Abschneiden der Ecken zu Sechsecken verstümmelt, die Schnittflächen quadratisch – ein Raummüller ist: Mit unendlich vielen Exemplaren dieses halbregelmäßigen («archimedischen») Körpers lässt sich der Raum lückenlos vollstapeln. Man entferne aus einer solchen Stapelung alle

Quadrate, so dass nur noch die Sechsecke übrig bleiben, und hat ein  $\{6, 4\}$ .

Eine andere Raumfüllung besteht aus Tetraedern und Oktaedern. Zwei der vier Oktaeder, die an ein Tetraeder grenzen, bilden das Atom eines  $\{3, 9\}$ . Der vollständige Körper enthält sozusagen jedes zweite Oktaeder der Raumfüllung und die Tetraeder nur als Hohlräume.

Zwölf Oktaeder, in einer Art Zickzack aneinandergesetzt, bilden einen Ring, an den man oben und unten gleichartige Ringe anfügen kann. Das Verfahren lässt sich beliebig fortsetzen und liefert ein  $\{3, 8\}$  (Kasten S. 67, rechts).

Der Fall  $\{4, 5\}$  ist in mehrfacher Hinsicht bemerkenswert. Erstens gibt es mehrere deutlich verschiedene Lösungen des Problems: eine platte und eine, die sich in den ganzen Raum ausdehnt. Zweitens ist es nicht zu vermeiden, dass benachbarte Quadrate in einer Ebene liegen. Nach klassischem Verständnis hat sich damit die Kante zwischen den beiden Quadraten erübrigt, und der Körper ist nicht mehr aus Quadraten zusammengesetzt, sondern aus größeren Einheiten. Wenn man diese Körper überhaupt als Lösungen des Problems akzeptieren will, muss man die Definition von »Polyeder«, je nach Standpunkt, aufweichen oder präzisieren (Kasten links).

Das gilt ebenso für die bislang einzige bekannte Realisierung eines  $\{5, 5\}$ . Gefunden hat sie 1967 ein Schüler namens J. Richard Gott, der sich später als Astrophysiker mit eigenwilligen Ideen einen Namen gemacht hat (Spektrum der Wissenschaft 9/1993, S. 30).

Je größer  $p$  und  $q$  werden, desto schwieriger wird es, an jeder Ecke  $q$  Stück  $p$ -Ecke unterzubringen. Während das  $\{3, 7\}$  und das  $\{3, 8\}$  noch recht luftig aussehen, ist es im  $\{3, 9\}$  schon richtig eng, und das  $\{5, 5\}$  verströmt mit seiner Kompaktbauweise den herben Charme eines Heizkörpers.

Für hohe Werte von  $p$  wird es noch schwieriger. Im klassischen Fall  $g=0$  hilft das Prinzip der Dualität: Alle wesentlichen Formeln bleiben unverändert, wenn man die Ecken- und die Flächenzahl vertauscht. So wird aus dem Würfel das Oktaeder und umgekehrt;

entsprechend sind Dodekaeder und Ikosaeder dual zueinander, und das Tetraeder ist dual zu sich selbst.

Auch für  $g=2$  gilt das Dualitätsprinzip; aber der Versuch, durch Dualisierung aus einem  $\{6, 4\}$  ein  $\{4, 6\}$  zu machen, liefert lauter Würfel, die nur an ihren Ecken miteinander zusammenhängen – nicht ganz das, was man sich unter einem unendlichen Körper vorstellt. Und die dualen Körper zu  $\{3, 7\}$ ,  $\{3, 8\}$  und  $\{3, 9\}$  sind zwar nicht schief oder krumm, aber bucklig, und es ist nicht zu sehen, wie man diese nichtebenen Siebenecke zu ebenen zurechtbiegen könnte. Aber vielleicht mangelt es uns einfach an Fantasie. Es wäre vernünftig zuzulassen, dass die Sieben- (Acht-, Neun-)ecke einander durchdringen dürfen; aber von einem solchen Gestrüpp eine brauchbare Vorstellung zu gewinnen, ist überaus schwierig.

Bis heute ist nicht bekannt, ob es ein  $\{7, 3\}$ , ein  $\{8, 3\}$  oder ein  $\{9, 3\}$  überhaupt geben kann, geschweige denn, wie sie aussehen. Erstaunlicherweise gibt es also selbst in einem der ältesten Teilgebiete der Mathematik, der euklidischen Geometrie des Raums, noch ungelöste Probleme. ~

### DER AUTOR



**Christoph Pöppe** ist promovierter Mathematiker und Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

### QUELLEN

- Courant, R., Robbins, H.:** Die Eulersche Polyederformel. In: Was ist Mathematik? Springer, Heidelberg 2010, S. 181–184
- Gott, J. R.:** Pseudopolyhedrons. In: The American Mathematical Monthly 74, S. 497–504, 1967
- Huylebrouck, D.:** Infinite »Platonic« Polyhedra of Genus 2. Noch unveröffentlichtes Manuskript

### WEBLINKS

- [www.uwgb.edu/dutchs/SYMMETRY/hypwells.htm](http://www.uwgb.edu/dutchs/SYMMETRY/hypwells.htm)  
Unendliche Polyeder auf der Website von Steven Dutch
- <http://etopia.sintlucas.be/3.14/>  
Homepage von Dirk Huylebrouck, mit Verweis auf seine YouTube-Filme und mehr



TREIBHAUSEFFEKT

# Große Wäsche für das Klima

Noch ist es nur ein Konzept, doch schon in wenigen Jahren könnten spezielle »Waschmaschinen« der Atmosphäre Kohlendioxid entziehen – und so der globalen Erwärmung entgegenwirken.

Von Klaus S. Lackner

Nur wenige Experten zweifeln noch daran: Die seit Beginn der Industrialisierung zunehmende CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Luft lässt die globale mittlere Temperatur ansteigen. Bisher ist es der Staatengemeinschaft nicht gelungen, das Problem zu lösen. Im Gegenteil, alles weist darauf hin, dass die Emissionen jahrzehntelang ansteigen werden. Auf absehbare Zeit werden Industrie- und Schwellenländer vor allem Kohle, Öl und Erdgas verbrennen, um Energie zu erzeugen. Auch im Transportwesen bleibt der Verbrennungsmotor vorerst konkurrenzlos.

Um trotzdem zu verhindern, dass die CO<sub>2</sub>-Konzentration noch über ihren derzeitigen Wert von 389 ppm (parts per million; eine relative Einheit wie die Prozentangabe) hinaussteigt, gibt es nur einen Weg: Man muss das Gas der Luft wieder entziehen – und anschließend speichern oder sinnvoll nutzen; Fachleute sprechen von CCS, *carbon dioxide capture and storage technologies*. Auf natürliche Weise geschieht dies Tag für Tag, da Pflanzen das Gas in ihrem Stoffwechsel nutzen, um Biomasse aufzubauen. Doch leider produziert die Menschheit weit mehr Treibhausgas, als sich beispielsweise durch eine weltweite Aufforstung einfangen ließe. Mehr Erfolg dürften spezielle Filtermaschinen bringen.

Derzeit arbeiten etliche Forschungsgruppen an Prototypen, darunter auch mein Team an der Columbia University

in New York. Alle variieren letztlich das gleiche Grundprinzip: Luft wird durch eine Apparatur geblasen und kommt dabei mit einem »Sorbens« in Kontakt, einem Material, das CO<sub>2</sub> chemisch bindet, Stickstoff, Sauerstoff und andere Gase hingegen passieren lässt. Dergleichen existiert schon länger, etwa um Kohlendioxid aus der Atemluft in U-Booten und Raumschiffen zu filtern. Auch bei der Herstellung von flüssigem Stickstoff wird dieses aus der Luft herausgefiltert.

## CO<sub>2</sub>-Filter im Kreisverkehr

Demonstrationsmodelle sollen bald die Praxistauglichkeit der Verfahren testen. Sie werden, so der Plan, pro Tag eine bis zu mehrere hundert Tonnen CO<sub>2</sub> aus der Luft entfernen. Der von meiner Arbeitsgruppe gemeinsam mit dem Unternehmen Global Research Technologies (heute: Kilimanjaro Energy) entworfene Typ zeigt beispielhaft, wie das gehen soll. Dünne Fasern aus Sorbensmaterial bilden Filterplatten, die einen Meter breit und 2,5 Meter hoch sind. Diese fahren in einer Schiene auf einem Standardtransportcontainer so lange im Kreis herum, bis sie vollständig mit CO<sub>2</sub> beladen sind (siehe Grafik S. 72). Dann verlassen sie automatisch ihre Spur und gelangen in eine Regenerationskammer im Containerinneren. Das Gas wird abgelöst und zu einer Flüssigkeit komprimiert. Die regenerierte Platte kommt erneut zum Einsatz.



JOE ZEFF DESIGN

Das gesammelte CO<sub>2</sub> könnte unterirdisch gespeichert werden, wie dies derzeit schon zur Emissionsminderung bei Kohlekraftwerken erprobt wird (Spektrum der Wissenschaft Spezial 1/2007, S. 22). Das Gas wäre aber auch eine gute Ausgangsbasis für die Herstellung von Treibstoffen: Aus CO<sub>2</sub> und Wasser (H<sub>2</sub>O) lässt sich Synthesegas gewinnen, ein Gemisch aus CO und H<sub>2</sub>. Dieses wird in der chemischen Industrie seit fast einem Jahrhundert als Zwischenprodukt eingesetzt. Zum Beispiel fabriziert die südafrikanische Energiegesellschaft Sasol synthetisches Benzin und Dieseltreibstoff aus Synthesegas, welches wiederum aus Kohle gewonnen wurde. Es ist ein verlockender Gedanke, zu diesem Zweck Kohlendioxid zu verwenden, das bei der Verbrennung fossiler Kraftstoffe entstanden ist. Natürlich handelt es sich dabei nicht um ein Perpetuum mobile; die Herstellung des Synthesegases erfordert Energie, um chemische Bindungen aufzubrechen.

Das verweist auf einen wichtigen Aspekt, der von Anfang an zu bedenken ist: Die Luftwäsche muss praktikabel und bezahlbar sein. Eine entsprechende Maschine darf also nur wenig Raum beanspruchen. Ein etwa türgroßer Filter, wie wir ihn planen, würde bei einer Windgeschwindigkeit von sechs Metern pro Sekunde täglich von mehr als 700 Kilogramm CO<sub>2</sub> durchströmt. Auch wenn solche Luftströmungen nicht überall anzutreffen sind, der Filter sie zudem verlangsamt

und natürlich niemals 100 Prozent des Gases wieder ausgewaschen werden, dürften solche kompakten Kollektoren eine ansehnliche Ernte einfahren.

Im Verkehrssektor böte sich theoretisch eine Alternative zu großen Reinigungsstationen an – die Auspuffgase selbst zu behandeln. Doch dann müsste das CO<sub>2</sub> im Fahrzeug zwischengespeichert und der entsprechende Tank regelmäßig

#### AUF EINEN BLICK

##### MIT HIGHTECH GEGEN DEN TREIBHAUSEFFEKT

**1** Spezielle Filter können Kohlendioxid aus der Luft binden und nach einem Regenerationsprozess wieder frei geben. Das Verfahren wird derzeit zur Reinigung des Rauchgases von Kraftwerken erprobt.

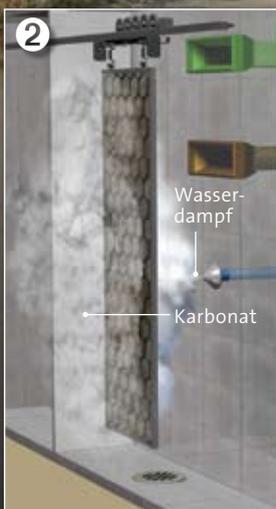
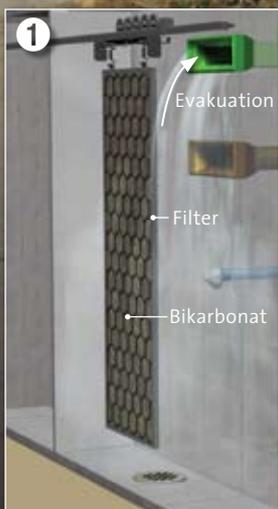
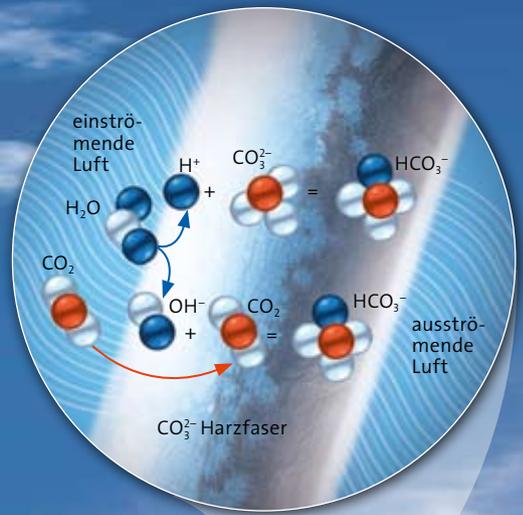
**2** Experten diskutieren darüber, kleinere Einheiten solcher Luftwäscher auch dezentral einzusetzen. Zehn Millionen davon, auf dem ganzen Globus verteilt, könnten die CO<sub>2</sub>-Konzentration theoretisch um 5 ppm (Teile pro Million) pro Jahr reduzieren – das wäre mehr als der jährliche globale Zuwachs derzeit.

**3** Die Kosten lägen zunächst bei etwa 150 Euro pro Tonne Gas, dürften aber nach Optimierungen und in Massenproduktion auf gut 30 Euro sinken. Das gewonnene Kohlendioxid ließe sich entweder speichern oder für industrielle Prozesse verwenden.

# Das Kohlendioxidkarussell

Im Konzept des Unternehmens **Global Research Technologies** streicht Luft durch etwa türgeröße Kunstharzfilter, die langsam auf einer Schiene im Kreis laufen. Ein voll beladener Filter wird von einem Aufzug aus der Spur gehoben und in einen Transportcontainer abgesenkt, der ihn in eine der sechs Regenerationskammern des Containers befördert. Dort wird das  $\text{CO}_2$  feucht extrahiert und der Filter anschließend zurückgebracht. Beim nächsten Umlauf trocknet das Harz und steht anschließend wieder zur Verfügung.

Wenn Luft durch die Filterfasern weht, wird das  $\text{CO}_2$  eingefangen. Auf der Filteroberfläche befinden sich negativ geladene Karbonationen ( $\text{CO}_3^{2-}$ ). Diese ziehen Protonen ( $\text{H}^+$ ) aus dem natürlich vorhandenen Wasserdampf ( $\text{H}_2\text{O}$ ), und es bildet sich Bikarbonat ( $\text{HCO}_3^-$ ). Das verbleibende Hydroxidion ( $\text{OH}^-$ ) fängt  $\text{CO}_2$  ein; dabei entsteht ebenfalls Bikarbonat.



Die Regeneration eines Filters beginnt mit dem Evakuieren der Kammer (1). Dann wird der Filter mit Wasserdampf besprüht; dabei wird Bikarbonat wieder zu Karbonat.  $\text{CO}_2$  kommt frei (2) und kann abgepumpt und komprimiert werden (3). Restliches Wasser läuft zur erneuten Verwendung ab (4).

## Begehrtes Gas: die CO<sub>2</sub>-Nachfrage in Deutschland

**Hier zu Lande werden pro Jahr 795 000 Tonnen Kohlendioxid gehandelt**, etwa die Hälfte davon nimmt die Lebensmittel- und Getränkeindustrie ab. Seit einigen Jahren werden größere Mengen Kohlendioxid auch für die Herstellung von Harnstofflösungen wie adBlue benötigt, die dem Abgas von Dieselmotoren zugesetzt werden, um NO<sub>x</sub>-Emissionen umzuwandeln. Industriell wird der Harnstoff aus Ammoniak und CO<sub>2</sub> synthetisiert.

Nur einige wenige Unternehmen teilen sich den deutschen Markt. Sie erzeugen aber kein Kohlendioxid, beispielsweise aus Erdgas, sondern verwenden vor allem CO<sub>2</sub>, das in der chemischen Industrie als Abfallprodukt anfällt, insbesondere in der Ammoniak-, Ethylenoxid- und Wasserstoffherstellung. Außerdem wird natürlich vorkommende Kohlensäure aufgefangen. Im Umfeld früherer vulkanischer Aktivität tritt sie entweder

gasförmig oder in Wasser gelöst auf – zum Beispiel in der Eifel. Schließlich wird auch das bei Gärungsprozessen in Brauereien oder bei der Produktion von Bioethanol entstehende Kohlendioxid aufgefangen, gereinigt und erneut verwertet.

Eine Reihe aktueller Forschungsvorhaben beschäftigt sich mit CCS (*carbon dioxide capture and storage technologies*). Bei so genannten CO<sub>2</sub>-freien Kraftwerken wird das entstehende Kohlendioxid aus dem Rauchgas abgetrennt, verflüssigt und gespeichert. Da ein durchschnittliches Kraftwerk zirka eine Million Tonnen pro Jahr erzeugt, stellen vor allem Transport und Speicherung eine Herausforderung dar. Der Bedarf seitens der Abnehmer wäre vorhanden: Die Nachfrage übersteigt vor allem während der Sommermonate die hier zu Lande verfügbaren Mengen, und CO<sub>2</sub> muss importiert werden.

*Die Redaktion*

an einem Sammelpunkt entladen werden. (Bei der Verbrennung von einem Kilogramm Benzin entstehen drei Kilogramm Kohlendioxid.) Das Waschen der Umgebungsluft erscheint deutlich praktikabler. Bei der Kostenkalkulation muss man zwei grundlegende Schritte betrachten: Absorption und Regeneration. Da Erstere wohl kaum ins Gewicht fällt, bestimmt der zweite Schritt die Kosten der Luftfiltration. Aus Sicht eines Chemikers muss das Sorbens das Treibhausgas stark genug binden, um es der Luft zu entziehen – jedoch nicht so stark, dass die anschließende Regeneration zu viel Energie und Aufwand erfordert. Die gute Nachricht dabei ist, dass die »Absorptionskraft« kaum von der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Luft abhängt. Deshalb lassen sich die Filtermaterialien, die derzeit für die Reinigung von Rauchgas (CO<sub>2</sub>-Konzentration 10 bis 15 Prozent) erprobt werden, auch für das Waschen der Umgebungsluft (CO<sub>2</sub>-Konzentration 0,04 Prozent) verwenden.

### Feste oder flüssige Sorptionslösung

Prinzipiell stehen feste und flüssige Sorptionsmittel zur Auswahl. Letztere erleichtern den Transport zwischen Kollektor und Regenerator. Doch sie für die Umgebungsluft zugänglich zu machen, ist eine Herausforderung. David Keith von der University of Calgary etwa tropft eine Natriumhydroxidlösung (Natronlauge) auf Kunststoffoberflächen, über die Luft geblasen wird. Zwar erreicht er so den gewünschten Kontakt, doch es ist nicht leicht, das in der Lauge stark gebundene CO<sub>2</sub> wieder zu entfernen.

Forscher, die ein festes Sorptionsmittel verwenden, rauhen dessen Oberfläche auf, um die Zahl der Bindungsstellen für die Gasmoleküle zu vergrößern. Hier stellen zum einen der Transport zur Regenerationskammer und wieder zurück, zum anderen ebenfalls die Regeneration die Entwickler vor Probleme. Beispielsweise untersucht das Unternehmen Glo-

bal Thermostat auf der Grundlage von Vorarbeiten am Georgia Institute of Technology, wie sich das gebundene Treibhausgas durch Erwärmen wieder freisetzen lässt.

Ob fest oder flüssig, der Filterprozess beruht stets auf Säure-Base-Chemie: Kohlendioxid ist eine Säure, die meisten Sorptionsmittel sind Basen. Beide reagieren miteinander unter Salzbildung. Zum Beispiel entsteht bei der Verwendung von Natronlauge Natriumkarbonat. Dieses ist immer noch basisch, kann also ein weiteres Kohlendioxidmolekül absorbieren. Dabei bildet sich Natriumbikarbonat. Im Prinzip sollte es möglich sein, CO<sub>2</sub> wieder zu entfernen und so das Sorptionsmittel in den ursprünglichen Hydroxidzustand zurückzusetzen.

In der Praxis funktioniert ein kontinuierliches Recycling aber nicht. Die verschiedenen Regenerationsmethoden erreichen immer nur einen Teilerfolg: Entweder überführen sie Bikarbonat in Karbonat oder Karbonat in Natriumhydroxid. Weil für Ersteres weniger Energie verbraucht wird, dürfte es vorteilhafter sein, lediglich zwischen Bikarbonat und Karbonat hin- und herzuwechseln. Einige neuartige Sorptionsmittel sind für diesen Ansatz gut geeignet. Dazu gehören Anionenaustauschharze, also Karbonatpolymere, wie sie auch bei der vollständigen Entsalzung von Wasser eingesetzt werden. Das Harz fixiert positive geladene Ionen, während negative wie das Karbonat (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) darin mobil bleiben und sich deshalb gegen andere austauschen lassen, wenn man das Harz mit einer entsprechenden Lösung wäscht.

Ein solches Karbonatharz wurde von Global Research Technologies entwickelt und in einem Labormodell getestet. Filter aus diesem Material beladen sich im Luftstrom mit Kohlendioxid, bis das Harz den Bikarbonatzustand erreicht. Feuchtigkeit setzt das Gas wieder frei, und das Harz kehrt zum Karbonatzustand zurück. Sobald es wieder trocken ist, kann der Zyklus von vorne beginnen. Wir planen, den bela-

denen Filter automatisch in eine Regenerationskammer zu befördern. Dort soll Luft abgepumpt werden, Wasser – etwa in Form von Nebel – kommt hinzu. Die Maschine pumpt frei werdendes  $\text{CO}_2$  ab und verdichtet es zu einer Flüssigkeit. Dabei sollte auch unverbrauchter Wasserdampf kondensieren und für den nächsten Regenerationsprozess zur Verfügung stehen. Der gereinigte Filter kann nach einer Trocknungszeit wieder aufgestellt werden.

### Positive Energiebilanz

Vor allem zwei Schritte bestimmen den Energieverbrauch: das Herauspumpen der Luft aus der Regenerationskammer und die weit energieaufwändigere Kompression des Kohlendioxids. Ohne Kühlung, also bei normaler Umgebungstemperatur, erfordert die Verflüssigung einen Druck von mehreren Dutzend Bar. Damit benötigt der gesamte Prozess je Kilogramm  $\text{CO}_2$  1,1 Megajoule elektrische Energie, was eine positive Bilanz ergibt: Heutige Kraftwerke in den USA emittieren im Mittel 0,21 Kilogramm  $\text{CO}_2$ , wenn sie diese Energiemenge aus fossilen Brennstoffe erzeugen; unser Prozess entzieht der Umgebungsluft aber das Fünffache davon (wobei die Herstellung der Maschinen noch nicht in die Bilanz eingerechnet ist). Dabei belaufen sich die Energiekosten für eine Tonne Kohlendioxid, realistisch geschätzt, auf gut zehn Euro,

also nicht viel mehr als für eine Rauchgasreinigung. Teuer werden zunächst vor allem Herstellung und Wartung solcher Anlagen; sie dürften zunächst bei knapp 150 Euro pro Tonne Kohlendioxid liegen. Doch diese Kosten sollten bei Serienproduktion deutlich sinken.

Was aber geschieht mit dem gewonnenen Kohlendioxid? Eine Option wäre die unterirdische Speicherung; die »Waschanlagen« könnten direkt vor Ort aufgestellt werden. Davon abgesehen bieten sich diverse Nutzungsmöglichkeiten an. Denn viele Industriezweige benötigen das Gas bei Produktionsprozessen – sei es um Getränke mit Kohlensäure zu versetzen, um Fleisch einzufrieren oder um Trockeneis herzustellen. So genanntes überkritisches Kohlendioxid ist zudem ein umweltfreundliches Extraktions- und Lösungsmittel, das beispielsweise zum Entkoffeinieren von Kaffee dient. In Gewächshäusern regt  $\text{CO}_2$  das Pflanzenwachstum an. Pro Jahr werden weltweit fast 30 Millionen Tonnen  $\text{CO}_2$  verkauft. Dabei bestimmt im Wesentlichen der Transport den Preis: Eine Tonne  $\text{CO}_2$  kostet in den USA meist mehr als 100 Dollar (70 Euro), in abgelegenen Regionen sogar zwei- bis dreimal so viel; in Deutschland sind die Größenordnungen vergleichbar. Ausgehend von Nischenmärkten wie der Lebensmittelverarbeitung könnte  $\text{CO}_2$  aus Luftwäsche-Anlagen den etablierten Produktionsverfahren durchaus Konkurrenz machen.

## Die nützlichen Seiten des $\text{CO}_2$

**Kohlendioxid wird seit Langem in der Industrie eingesetzt**, beispielsweise in der Getränkeherstellung oder als Lösungsmittel. Zu den neueren Anwendungsgebieten zählen: Kompensation

von nachlassendem Druck in Erdöllagerstätten (links oben), Herstellung von karbonatbasierten Zementsorten (links unten) sowie Düngung von Algen, die Biotreibstoffe produzieren (rechts).



GETTY IMAGES / BLOOMBERG / CHIP CHIPMAN



CORBIS / WAVE



MIT FRIEL GEN VON JIM DEMATTIA

## Ein Plan für die Erde

Um die globale Erwärmung zu verlangsamen, benötigen wir laut Modellrechnungen von Klaus S. Lackner

**10 Millionen** »Luftwäscher« weltweit.

**10 Tonnen** CO<sub>2</sub> könnte jede solche Maschine täglich sammeln (wobei die durch ihren eigenen Energieverbrauch verursachten Emissionen berücksichtigt sind),

**36 Gigatonnen** CO<sub>2</sub> insgesamt würden dann jährlich aus der Atmosphäre entfernt, das entspräche einer Reduktion um

**5 Teile pro Million** (ppm) jährlich. Die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre liegt derzeit bei 389 ppm – mit steigender Tendenz.

Sollte der Preis dank effizienter Serienproduktion die 70-Euro-Marke unterschreiten, ließe sich die Extraktion auch als Gutschrift im Emissionshandel verkaufen. Das wäre sogar ein Anreiz für die Erdölförderung. Seit den 1970er Jahren pumpen Ölfirmen Kohlendioxid in ihre Lagerstätten, um einen allmählich nachlassenden Druck zu kompensieren (Spektrum der Wissenschaft 6/2010, S. 92). Viele Ölfelder liegen weit entfernt von industriellen CO<sub>2</sub>-Produzenten – Luftwäscher lassen sich hingegen überall aufstellen und wären eine echte Alternative. Überdies könnten die Erdölfirmen dann Emissionsgutschriften beanspruchen, denn im Allgemeinen verbleibt etwa die Hälfte des hinabgepumpten Gases auch dauerhaft unter der Erdoberfläche.

### Wie sich ein herkömmliches Auto klimaneutral machen lässt

Eine Zukunftsvision sieht so aus: Strom würde mit Hilfe regenerativer Energiequellen erzeugt und eingesetzt, um aus dem per Luftwäsche gewonnenen CO<sub>2</sub> und Wasser Synthesegas herzustellen. Daraus entstünden Treibstoffe für Verbrennungsmotoren. Solange das aber noch nicht möglich ist, könnten Luftwäscher immerhin die Emissionen des derzeitigen, auf petrochemischen Treibstoffen basierenden Transportwesens reduzieren. So ließe sich ein Auto mit Verbrennungsmotor klimaneutral machen, indem die 100 Tonnen CO<sub>2</sub>, die es während seiner mittleren Lebensdauer ausstößt, schon gesammelt werden, bevor es das Fließband verlässt. Dabei ist es unerheblich, ob dies dort geschieht, wo das Fahrzeug tatsächlich eingesetzt wird. Denn anders als Ozon oder Schwefeldioxid bleibt Kohlendioxid oft jahrzehnte- oder sogar jahrhundertlang in der Atmosphäre. Diese wird in einem solchen Zeitraum gründlich durchmischt, so dass es legitim wäre, das Treibhausgas in Australien zu entfernen und dafür in Nordamerika Emissionsgutschriften zu erhalten.

Sollte es der Staatengemeinschaft doch noch gelingen, das Ansteigen der CO<sub>2</sub>-Konzentration zu bremsen, böte die

Luftwäsche sogar eine Chance, die Werte wieder zu senken und so die Emissionssünden der Vergangenheit gutzumachen. Die hier vorgestellten Maschinen binden jeweils eine Tonne pro Tag. Zehn Millionen davon könnten die atmosphärische Konzentration um 0,5 ppm (3,6 Gigatonnen) pro Jahr reduzieren. Diese Anzahl klingt zunächst aberwitzig, doch sie wäre technisch machbar: Pro Jahr laufen weltweit 71 Millionen Autos und leichte Transporter vom Band! Außerdem dürfte auch hier die Technik voranschreiten. Betrachtet man die Erfolgsgeschichten anderer Technologien, sollte es doch innerhalb weniger Gerätegenerationen möglich sein, die Produktivität der Luftwäscher auf das Zehnfache und die jährliche CO<sub>2</sub>-Reduktion somit auf 5 ppm zu steigern – mehr als die derzeitige Zuwachsrate des Treibhausgases!

Kritiker bemängeln, dass die zahlreichen Maschinen sehr viel Energie verbrauchen würden. Zudem müssten die Kunststofffilter aus Erdöl hergestellt werden. Doch wir stehen noch ganz am Anfang, es gibt ein großes Optimierungspotenzial. Auch dass für jede Tonne gesammeltes Gas einige Tonnen Wasser beim Trocknen der Filter anfallen und beim derzeitigen Stand der Planung frei in die Atmosphäre verdampfen, sollte kein unlösbares Problem darstellen. Zwar fördert Wasserdampf den Treibhauseffekt stärker als CO<sub>2</sub>, doch die anfallende Menge ist weit geringer als beispielsweise diejenige, welche bei der Verdunstung eines Waldes oder Feldes entsteht.

In der Startphase wären die Kosten mit knapp 150 Euro pro Tonne Kohlendioxid eine große Einstiegshürde. Entwickelt sich die Technologie jedoch wie andere weiter, würden schließlich nur noch Material- und Energiekosten eine Rolle spielen. Dann könnte sich der Betrag bei etwa 30 Euro pro Tonne einpendeln. Natürlich stellt sich die Frage, wer dafür aufkommen soll. Eine Möglichkeit wäre, das Geld bei den Verursachern einzutreiben. Zum Beispiel an Tankstellen, denn jeder Liter verbranntes Benzin trägt zur globalen Erwärmung bei. Bei optimierter Luftwäsche fielen etwa acht Cent pro Liter an – ein Preis, den zu zahlen sich lohnen würde. ~

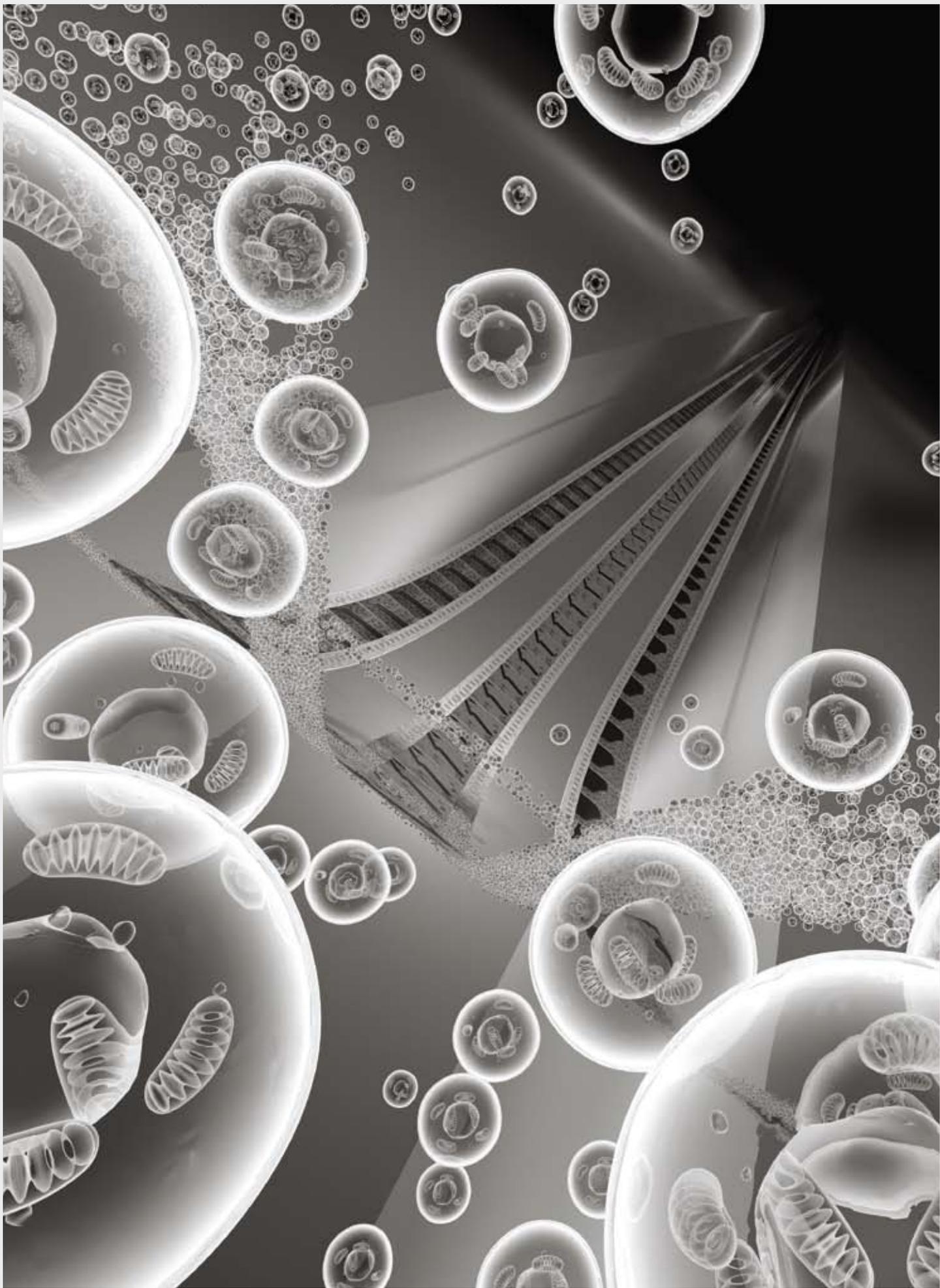
### DER AUTOR



Der deutschstämmige **Klaus S. Lackner**, Professor für Geophysik, leitet die Abteilung für Erd- und Umwelt-Ingenieurwesen an der Columbia University in New York. Lackner ist Mitbegründer des Unternehmens Global Research Technologies (jetzt Kilimanjaro Energy), das Technologien zur CO<sub>2</sub>-Gewinnung aus der Umgebungsluft entwickelt.

### QUELLEN

**Broecker, W. S., Kunzig, R.:** Fixing Climate: What Past Climate Changes Reveal about the Current Threat – and How to Counter it. Hill and Wang, New York 2008  
**Keith, D. W. et al.:** Climate Strategy with CO<sub>2</sub>-Capture from the Air. In: Climate Change 74, S. 17–45, 2006  
**Lackner, K. S.:** Capture of Carbon Dioxide from Ambient Air. In: European Physical Journal: Special Topics 176, S. 93–106, 2009



## ELEKTRONENMIKROSKOPIE

# Bewegte Bilder aus der Nanowelt

Eine neue Abbildungstechnik erweitert das Elektronenmikroskop um die vierte Dimension: Ultrakurze Elektronenpulse liefern Serien von Schnappschüssen eines Untersuchungsobjekts – und gewähren bisher ungeahnte Einblicke in extrem schnelle Abläufe im Nanoreich. Erstmals lassen sich so auch Vorgänge im Inneren einer Zelle filmen.

Von Ahmed H. Zewail

Die Welt ist mehr, als wir mit bloßem Auge sehen. Objekte, die viel dünner sind als ein Haar (ein Bruchteil eines Millimeters), können wir nicht erkennen. Und Bilder, die schneller als ein Wimpernschlag (etwa eine Zehntelsekunde) aufeinander folgen, vermögen wir nicht voneinander zu unterscheiden. Große Fortschritte in Optik und Mikroskopie im vergangenen Jahrhundert haben unsere Wahrnehmungsgrenzen zwar erheblich ausgedehnt und zuvor Verborgenes sichtbar gemacht. Man denke etwa an die mikroskopische Abbildung eines Virus oder die stroboskopisch erzeugte Fotografie einer Gewehrkartridge in jener Millisekunde, in der sie eine Glühbirne durchschlägt. Trotzdem konnte man noch bis vor Kurzem bei Videos, auf denen bewegte Atome zu sehen sind, sicher sein, dass es sich entweder um einen Trickfilm oder eine Computersimulation handelt.

Das hat sich grundlegend geändert. Neue Techniken ermöglichen uns nun Einblicke in die Nanowelt, die noch vor Kurzem niemand für möglich gehalten hätte. So hat mein Team am California Institute of Technology im vergangenen Jahrzehnt eine Art von Bildgebung entwickelt, die Bewegungen im atomaren Maßstab und in Zeitintervallen von Femtosekunden (billiardstel Sekunden) sichtbar macht. Da die Methode Vorgänge in der vierdimensionalen Raumzeit wiedergibt und mit dem altherwürdigen Elektronenmikroskop arbeitet, gaben wir ihr den Namen 4-D-Elektronenmikroskopie. Mit ihr gelang es uns, nie zuvor gesehene Phänomene zu visualisieren: etwa die Schwingungen von Graphenschichten in Graphit, die nach Anregung mit einem Laserblitz wie ein Trommelfell vibrieren. Auch die Bewegung einzelner Proteine und Zellen konnten wir hoch aufgelöst filmen.

Die vierdimensionale Elektronenmikroskopie verspricht Antworten auf Fragen aus unterschiedlichsten Forschungsgebieten – von der Werkstoffkunde bis zur Biologie. Sie ermöglicht erstmals, das Verhalten von Materialien vom makroskopischen bis hin zum atomaren Maßstab zu beobachten. So lässt sich die Funktionsweise von Nano- und Mikromaschinen damit untersuchen. Wir können sogar sichtbar machen, wie sich Proteine oder Komplexe aus biologischen Molekülen falten und zu größeren Strukturen zusammenlagern – ein entscheidender Vorgang in allen lebenden Zellen. Außerdem offenbart das Verfahren die atomaren Strukturen von Nanomaterialien, von denen wichtige Eigenschaften dieser neuartigen Werkstoffe abhängen. Künftig könnte es auch gelingen, die Bewegungen von Elektronen in Atomen und Molekülen zu verfolgen, die innerhalb von Attosekunden (trillionstel Sekunden) ablaufen. Schließlich ergeben sich in Verbindung

## AUF EINEN BLICK

### VIDEOCLIPS VOM ALLERKLEINSTEN

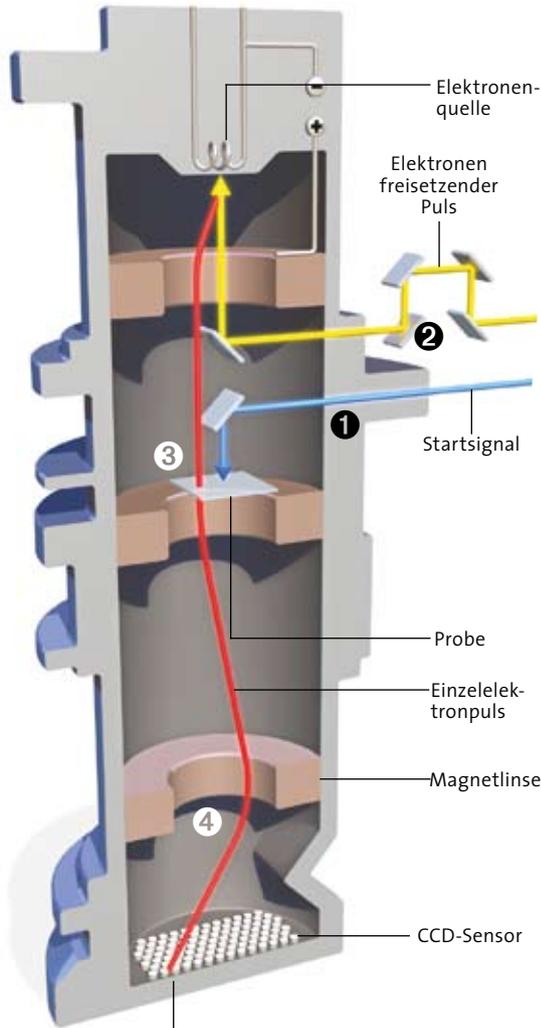
**1** Das 4-D-Elektronenmikroskop erzeugt dreidimensionale Filme von Vorgängen, die im Größenmaßstab von millionstel Millimetern und auf Zeitskalen von billiardstel Sekunden ablaufen. Damit kann es Prozesse auf subzellulärer bis atomarer Ebene sichtbar machen.

**2** Jedes Einzelbild eines solchen Films errechnet sich aus Tausenden von Aufnahmen, die zu präzise definierten Zeitpunkten aufgezeichnet werden.

**3** Die 4-D-Elektronenmikroskopie verspricht spannende Anwendungen von der Materialforschung über die Nanotechnologie bis zur Medizin.

# Das 4-D-Elektronenmikroskop

Ein **herkömmliches Elektronenmikroskop** nimmt unbewegte Bilder von nanoskopisch kleinen Proben auf, indem es einen Elektronenstrahl hindurchschickt und auf einen Detektor fokussiert. Ein 4-D-Elektronenmikroskop hingegen erzeugt mit Pulsen aus einzelnen Elektronen Filme, zwischen deren Einzelaufnahmen nur wenige Femtosekunden (billiardstel Sekunden) liegen.

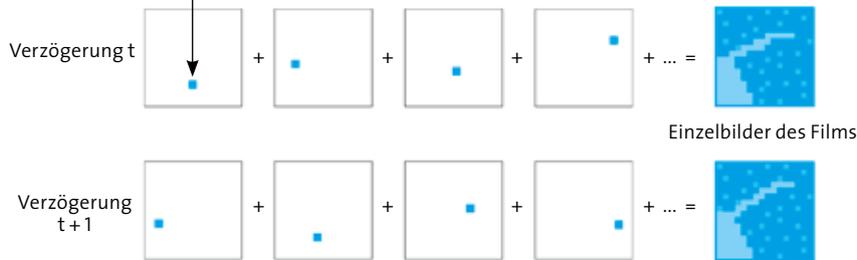


**1** Ein Startsignal – etwa ein nur wenige Femtosekunden langer Laserblitz – setzt in der Probe den beobachteten Prozess zu einem präzise definierten Anfangszeitpunkt  $t_0$  in Gang.

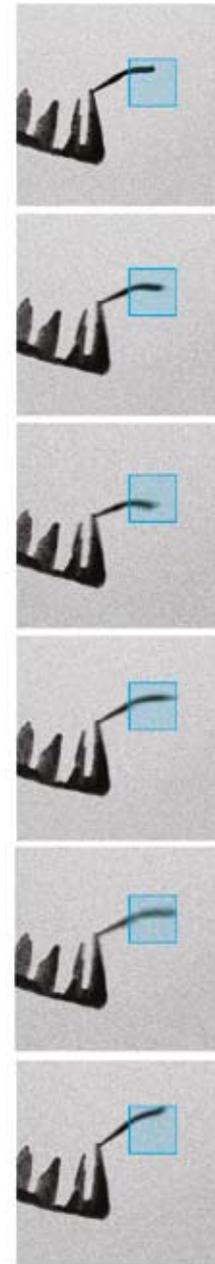
**2** Gleichzeitig mit dem Startsignal wird ein Elektronen freisetzender Laserblitz ausgelöst, aber dann um einen definierten Zeitraum  $t$  verzögert.

**3** Ein Puls, der aus nur einem einzigen Elektron besteht, durchquert die Probe zu einem genau festgelegten Zeitpunkt  $t$ .

**4** Magnetische Linsen fokussieren das Elektron auf einen CCD-Sensor, der seinen Auftreffpunkt als Pixel aufzeichnet, das in das Einzelbild Nummer  $t$  des Nanofilms integriert wird.



Jede Einzelaufnahme des Films entsteht durch vieltausendfache Wiederholung dieses Ablaufs mit der gleichen Verzögerung  $t$  und anschließende Überlagerung aller aufgezeichneten Pixel zu einem Gesamtbild. Das Mikroskop lässt sich je nach Anwendungszweck auch in anderen Betriebsarten einsetzen, etwa mit Pulsen, die aus mehreren Elektronen bestehen. Im Einzelelektronenmodus erreicht es jedoch die höchste Auflösung: Der Abstand zwischen den Bildpunkten ist hier am kleinsten und das Zeitintervall zwischen den Einzelaufnahmen am kürzesten.



Ein 50 Nanometer langer Kragbalken aus einer Nickel-Titan-Legierung oszilliert nach der Anregung durch einen Laserblitz. Die blauen Kästchen markieren den Bereich, den dieser dabei überstreicht. Der Film (online unter [www.spektrum.de/artikel/1055768](http://www.spektrum.de/artikel/1055768)) besteht aus Einzelbildern, die in Abständen von zehn Nanosekunden aufgenommen wurden. Die Schwingungsdaten geben Aufschluss über Materialeigenschaften, deren Kenntnis wichtig für die Konstruktion nanomechanischer Geräte ist.

mit Fortschritten in der Grundlagenforschung vielfältige potenzielle Anwendungen bei der Konstruktion von Nanomaschinen und dem Maßschneidern neuer Medikamente.

Die 4-D-Elektronenmikroskopie stützt sich auf modernste Lasertechnik und unanschauliche Aussagen der Quantenphysik. Dennoch lassen sich viele ihrer Prinzipien verstehen, wenn man die Entwicklung der Hochgeschwindigkeitsfotografie vor mehr als 100 Jahren betrachtet. Zu deren Vätern gehörte der französische Physiologe Étienne-Jules Marey (1830–1904). Als Professor am Collège de France machte er um das Jahr 1890 schnelle Bewegungsabläufe sichtbar, indem er eine vielfach geschlitzte rotierende Scheibe zwischen das bewegte Objekt und eine Fotoplatte oder einen Filmstreifen platzierte. Auf diese Weise produzierte er Serienaufnahmen, die vom Prinzip her modernen Filmen ähnelten.

Unter anderem untersuchte Marey, wie eine Katze es schafft, beim freien Fall immer auf den Pfoten zu landen, indem sie sich in der Luft mit akrobatischen Verrenkungen in eine aufrechte Position dreht. Wie kann sie das, ohne das Gesetz über die Erhaltung des Drehimpulses zu verletzen? Mit bloßem Auge lässt sich der Vorgang nicht detailliert genug verfolgen. Doch Mareys Hochgeschwindigkeitsaufnahmen lieferten die Antwort: Das Tier verdreht die beiden Körperhälften gegeneinander, während es die Vorder- und Hinterbeine im Gegenteil anzieht und ausstreckt. Turmspringer, Tänzer und Astronauten machen es bei ihren Drehungen im freien Raum ähnlich.

### **Zeitdehnung nach dem Stroboskopprinzip**

Auf dem gleichen Prinzip wie Mareys Verfahren beruht die Stroboskopfotografie. Dabei beleuchten Lichtblitze ein im Dunkeln bewegtes Objekt jeweils für einen kurzen Moment, der sich dann auf einem Detektor abbildet – sei es die menschliche Netzhaut, eine Fotoplatte oder ein Kamerasensor. Diese Blitze können sehr kurz sein und die Aufnahmen folglich viel schneller aufeinander folgen, als das mit Schlitzen oder mechanischen Verschlüssen möglich ist. Dadurch erfasst die Stroboskopfotografie noch wesentlich raschere Bewegungen. Mitte des 20. Jahrhunderts brachte Harold Edgerton vom Massachusetts Institute of Technology in Cambridge das Verfahren einen Riesenschritt voran, indem er eine elektronische Schaltung entwickelte, die zuverlässig und regelmäßig Lichtblitze mit einer Dauer von wenigen Mikrosekunden erzeugt.

Das Experiment mit der fallenden Katze erfordert Verschlusszeiten oder stroboskopische Blitze, die kurz genug sind, um scharfe Aufnahmen zu liefern, obwohl das Tier rasch fällt. Nehmen wir an, die Katze bräuchte eine halbe Sekunde zum Aufrichten in der Luft. In dieser Zeit erreicht sie eine Fallgeschwindigkeit von fünf Meter pro Sekunde. Bei Lichtblitzen mit einer Millisekunde Dauer ist also gewähr-

leistet, dass das Tier während einer Aufnahme nie um mehr als fünf Millimeter fällt. Das ergibt eine kaum mehr wahrnehmbare Bewegungsunschärfe. Um das Katzenkunststück in zehn Schnappschüssen festzuhalten, müssten wir alle 50 Millisekunden eine Aufnahme machen.

Wenn wir aber nun statt einer fallenden Katze ein Molekül während einer chemischen Reaktion beobachten wollten, wie kurz müssten dann die Stroboskopblitze sein? Bei den meisten Umwandlungen von Molekül- oder Materialstrukturen bewegen sich Atome mit Geschwindigkeiten von einem Kilometer pro Sekunde, legen dabei allerdings nur eine Strecke von wenigen hundert Pikometern (billionstel Metern) zurück. Für Bilder mit einer räumlichen Auflösung von zehn Pikometern dürfen die Stroboskopblitze also nicht länger als zehn Femtosekunden dauern. Schon seit den 1980er Jahren nutzen Wissenschaftler derart kurze Laserpulse, um den Zeitverlauf chemischer Vorgänge zu ergründen. Allerdings konnten sie die räumliche

Position der sich verschiebenden Atome dabei nicht bildlich darstellen; denn die Wellenlänge des Lichts ist einige hundertmal so lang wie die Atomabstände in Molekülen oder Werkstoffen (Spektrum der Wissenschaft 2/1991, S. 100).

Andererseits lassen sich schon seit Jahrzehnten mit beschleunigten Elektronen – etwa in Elektronenmikroskopen – Bilder mit Auflösungen im atomaren Bereich erzeugen. Dabei sind die Objekte jedoch unbeweglich montiert, und die Aufnahmedauer liegt im Bereich von Millisekunden oder länger, je nach Empfindlichkeit des Kamerasensors oder Filmmaterials. Unsere Idee war nun, beide Verfahren zu kombinieren, um bewegte Bilder mit atomarer Auflösung zu erhalten. Dazu muss man im Elektronenmikroskop »Belichtungszeiten« im Femtosekundenbereich realisieren. Das erfordert, immer nur extrem kurze Elektronenpakete – so genannte Sondenpulse – durch das Instrument zu schicken.

Ein weiteres Problem liegt in der Festlegung des Startzeitpunkts. Schnappschüsse vor Beginn der atomaren Bewegung oder nach ihrem Ende liefern keine verwertbare Information. Beim Fotografieren der fallenden Katze startet die Aufnahmesequenz mit dem Loslassen des Tiers. Für unsere ultraschnelle Elektronenmikroskopie brauchen wir entsprechend einen Femtosekundenblitz, der als Startpuls den zu untersuchenden Ablauf in Gang setzt.

Doch dann bleibt immer noch das Problem der Synchronisation. Und hier unterscheidet sich das ultraschnelle Experiment grundlegend von der Tierfotografie. Wenn alles glatt lief, musste Marey nur eine einzige Katze genau einmal fallen lassen, und er hatte die Aufnahme im Kasten. Es spielte auch keine Rolle, ob die Fotoserie 5, 10 oder 17 Millisekunden nach dem Loslassen des Tiers begann. Bei der ultraschnellen Mikroskopie haben wir es hingegen mit Millionen von Atomen oder Molekülen zu tun und müssen das gleiche Experiment 1000-fach wiederholen, um das Bild peu à peu aufzubauen.

## **Die 4-D-Elektronenmikroskopie lässt sich durch Vergleich mit den Anfängen der Hochgeschwindigkeitsfotografie verstehen**

Man stelle sich vor, Marey hätte bei jedem einzelnen Katzensturz immer nur einen schmalen vertikalen Streifen aufnehmen können. Für eine vollständige Bilderserie des fallenden Tiers wäre es dann nötig gewesen, das Experiment viele Male zu wiederholen und dabei den Ausschnitt jeweils geringfügig zu verschieben. Um die zahlreichen Bildsequenzen anschließend sinnvoll zusammensetzen zu können, hätte Marey die Katze immer in die gleiche Startposition bringen und den Zeitpunkt, zu dem er das Tier jeweils losließ, mit der ersten Verschlussöffnung synchronisieren müssen – und das mit einer räumlichen und zeitlichen Genauigkeit, die Bruchteile der Katzenlänge beziehungsweise der Verschlusszeit betrug. (Eine weitere Bedingung wäre gewesen, dass sich die Katze in der Luft jedes Mal völlig gleich bewegt; in dieser Hinsicht verhalten sich Moleküle zum Glück vorhersagbarer als Tiere.)

In analoger Weise ist auch bei der ultraschnellen Bildgebung von Atomen und Molekülen die Startkonfiguration auf weniger als 100 Pikometer und der zeitliche Abstand zwischen Startsignal und Sondenpulsen auf einige Femtosekunden genau zu reproduzieren. Letzteres gelingt, indem man die Elektronenpakete exakt justierbare Distanzen zurücklegen lässt, bevor sie das aufzunehmende Objekt treffen. Für einen Puls, der sich mit Lichtgeschwindigkeit fortbewegt, bedeutet eine Präzision von einem Mikrometer bei der zurückgelegten Wegstrecke eine zeitliche Genauigkeit von 3,3 Femtosekunden.

Schließlich ist ein weiteres grundlegendes Problem zu lösen. Anders als Photonen sind Elektronen geladene Teilchen. Auf Grund ihrer wechselseitigen Abstoßung weitet sich ein Puls auf, wenn man zu viele von ihnen hineinpackt. Darunter leidet die räumliche und zeitliche Auflösung der Abbildung. In den 1980er Jahren gelang Oleg Bostanjoglo von der Technischen Universität Berlin zwar die Bildgebung mit Pulsen aus nur wenigen hundert Millionen Elektronen. Trotzdem kam er über Auflösungen im Bereich von Nanosekunden und Mikrometern nicht hinaus. Später schafften es Forscher am kalifornischen Lawrence Livermore National Laboratory immerhin, in den Submikrometerbereich vorzustoßen.

Meine Mitarbeiter und ich gingen das Problem an, indem wir Methoden zur Bildgebung mit einzelnen Elektronen (*Single Electron Imaging*) entwickelten. Dabei stützten wir uns auf frühere Untersuchungen zur ultraschnellen Aufzeichnung der Elektronenbeugung. Da jeder Sondenpuls nur aus einem einzelnen Elektron besteht, erzeugt er auch nur einen einzigen Fleck auf dem fertigen Film. Doch dank des sorgfältigen Timings und einer Eigenschaft der Pulse, die Physiker als Kohärenz bezeichnen, summieren sich die vielen Punkte zu einem Gesamtbild des Objekts. Dieses Verhalten erinnert an eine der Merkwürdigkeiten der Quantenmechanik: Auch wenn Photonen oder Elektronen eine Interferenzappa-

atur mit zwei Schlitzen einzeln passieren und jeweils einen einzigen Punkt an einer zufälligen Stelle des Detektors erzeugen, ergibt doch die Summe dieser Punkte ein vorhersagbares Hell-dunkel-Muster, das für sich überlagernde Wellen typisch ist.

Das Arbeiten mit einzelnen Elektronen erwies sich als Schlüssel zur 4-D-Darstellung atomarer Vorgänge, die inzwischen auch als ultraschnelle Elektronenmikroskopie (UEM) bekannt ist. Eines unserer ersten Beobachtungsobjekte war Graphit, der Hauptbestandteil von Bleistiftminen. Wir wählten es aus, weil es sich um ein besonderes Material handelt, das teils unter extremen Bedingungen – etwa im Kern von Atomreaktoren – zum Einsatz kommt. Außerdem hat es einige nicht weniger bemerkenswerte Verwandte wie den Diamanten, in den es sich unter extrem hohem Druck umwandelt.

### Liveaufnahme der Schwingungen im Graphit

Graphit besteht aus Schichten von Kohlenstoffatomen, die in einem maschendrahtartigen Sechseckmuster angeordnet sind. Diese Schichten bilden Stapel, welche von relativ schwachen Bindungen zusammengehalten werden. Wenn man mit einem gewöhnlichen Bleistift schreibt, lösen sich Graphit-schuppen ab und bleiben am Papier kleben. In Spuren enthalten Bleistiftstriche aber auch die Einzelschichten. In isolierter Form heißen sie Graphen und sind das Material mit der höchsten bekannten Festigkeit überhaupt. Wegen möglicher Anwendungen in der Elektronik werden sie derzeit intensiv erforscht.

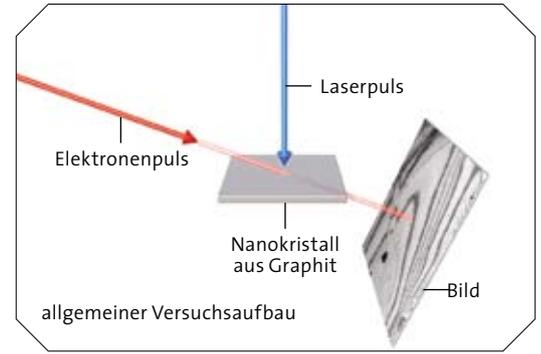
Wir interessierten uns für die Reaktion von Graphit auf mechanische Krafteinwirkungen. Dazu beschossen wir Kristalle von wenigen Nanometern Dicke, die nur aus einigen Atomschichten bestanden, mit intensiven Laserblitzen, die maximal einige Femtosekunden dauerten und als Startimpuls für unser Mikroskop dienten. Jeder einzelne Blitz drückte die Graphitschichten für einen kurzen Moment eng zusammen, so dass sie anschließend auf- und abschwangen (siehe Kasten rechts). Unser Mikroskop schickte dann seine Elektronen durch das schwingende Schichtpaket und erzeugte zwei Arten von Aufnahmen: echte räumliche Abbildungen (ähnlich einer Fotografie der Graphitoberfläche) oder ein Beugungsmuster – also eine regelmäßige Anordnung von Flecken, die Informationen über Anordnung und Abstände der Atome im Graphitgitter liefert. Besonders gut konnten wir die Oszillationen der Schichten anhand der Bewegungen der Flecken im Beugungsmuster verfolgen. Die Schwingungsfrequenz lag bei 10 bis 100 Gigahertz (Milliarden Zyklen pro Sekunde). In keinem zuvor durchgeführten Experiment konnten jemals solch hochfrequente Resonanzschwingungen im Zeitverlauf beobachtet werden.

Aus unseren Experimenten ließ sich die Elastizität von Graphit senkrecht zu seinen Atomschichten ableiten. Stellen

## Das Arbeiten mit Sondenpulsen aus nur einem Elektron war der Schlüssel zur 4-D-Darstellung atomarer Vorgänge

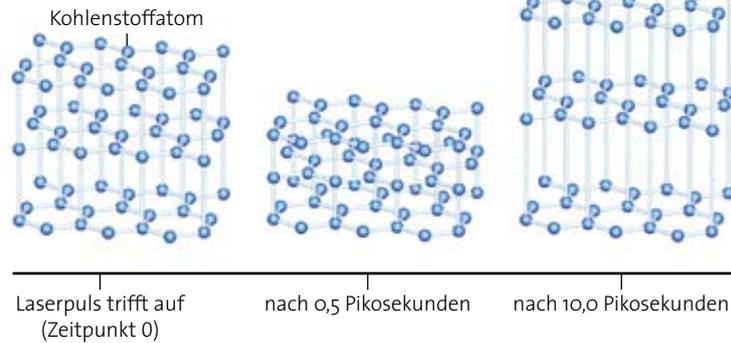
# Nanoskopie in drei Varianten

An **Graphit-Nanokristallen**, die teils nur wenige Atomschichten dick waren, konnte das Team von Ahmed H. Zewail die drei Bildgebungsverfahren demonstrieren, die mit der vierdimensionalen Mikroskopie möglich sind. Die erhaltenen Daten zeigten unterschiedliche Aspekte im Verhalten der Proben beim Auftreffen eines Laserpulses senkrecht zu den – in isolierter Form als Graphen bezeichneten – Schichten, in denen die Kohlenstoffatome zu einem sechseckigen »Maschendraht« verknüpft sind.



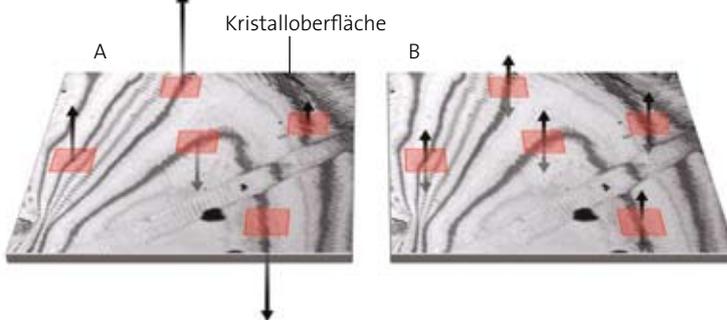
**1** Beugungsmuster ließen erkennen, wie die Graphitschichten nach dem Laserbeschuss oszillieren: Sie werden vom auftreffenden Strahlungspuls zusammengedrückt, schnellen innerhalb weniger Pikosekunden zurück und schwingen dann für einige hundert Pikosekunden nach.

## Elektronenbeugung



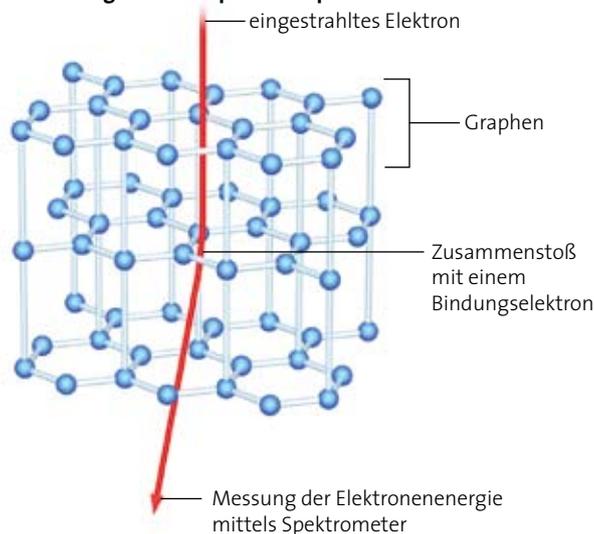
**2** Bilder der Nanokristalle zeigten, wie sich die Oszillationen wellenartig über die Oberfläche ausbreiten. Innerhalb einiger hundertstel Sekunden entwickelt sich dabei aus einer chaotischen Bewegung (A, mit Pfeilen veranschaulicht) eine koordinierte Resonanzschwingung des gesamten Kristalls, die dem Vibrieren eines Trommelfells ähnelt (B).

## Filmen



**3** Wenn eingestrahelte Mikroscopielektronen mit Bindungselektronen des Graphits zusammenstoßen, verlieren sie einen Teil ihrer Energie. Messungen dieses Energieverlustes zeigten, dass die Bindungen im Graphit während der Oszillation abwechselnd denen im Diamanten (Kompressionsphase) und im Graphen (Dehnungsphase) ähneln.

## Elektronen-Energieverlust-Spektroskopie



Graphit-Nanokristalle schwingen nach dem Auftreffen eines Laserpulses wie ein Trommelfell. Das zeigen Filmaufnahmen, deren Einzelbilder einen Bereich von 24 Mikrometer Breite in Abständen von 50 Nanosekunden wiedergeben. Hier ist nur jedes fünfte Bild dargestellt. Leichte Aufwölbungen der Graphitoberfläche erscheinen als dunkle Streifen, die sich bewegen, wenn die Oberfläche vibriert. Die roten Kästchen dienen der Orientierung für das Auge. Der ganze Film ist online unter [www.spektrum.de/artikel/1055768](http://www.spektrum.de/artikel/1055768) zu finden.

Sie sich den Kristall als Stapel von Metallplatten vor, die über Sprungfedern verbunden sind, und den Laserpuls als Vorschlaghammer, der darauf niedersaust. In diesem Bild maßen wir somit, wie steif die Federn sind.

Die Metallplatten-Analogie trifft die Sache recht gut, wenn unsere »Kamera« sehr nah heranrückt. Mit zunehmender Entfernung umfasst der Bildausschnitt jedoch immer größere Teile des Kristalls. Dann sieht man, dass sich die Schichten durchbiegen und Stauchungs- und Dehnungswellen vom Aufschlagpunkt nach außen laufen.

Bei noch größerem Abstand der Kamera und reduzierter Bildfrequenz wird eine weitere Bewegungsform erkennbar: Jetzt ist zu sehen, wie der Laserpuls den gesamten nanoskopisch kleinen Kristall zum Vibrieren bringt, so dass dieser wie ein angeschlagenes Trommelfell schwingt. Unseren Untersuchungen zufolge ist die Bewegung in den ersten Mikrosekunden nach dem Auftreffen des Laserpulses noch chaotisch. Doch dann entwickelt sich eine Resonanzschwingung, die den

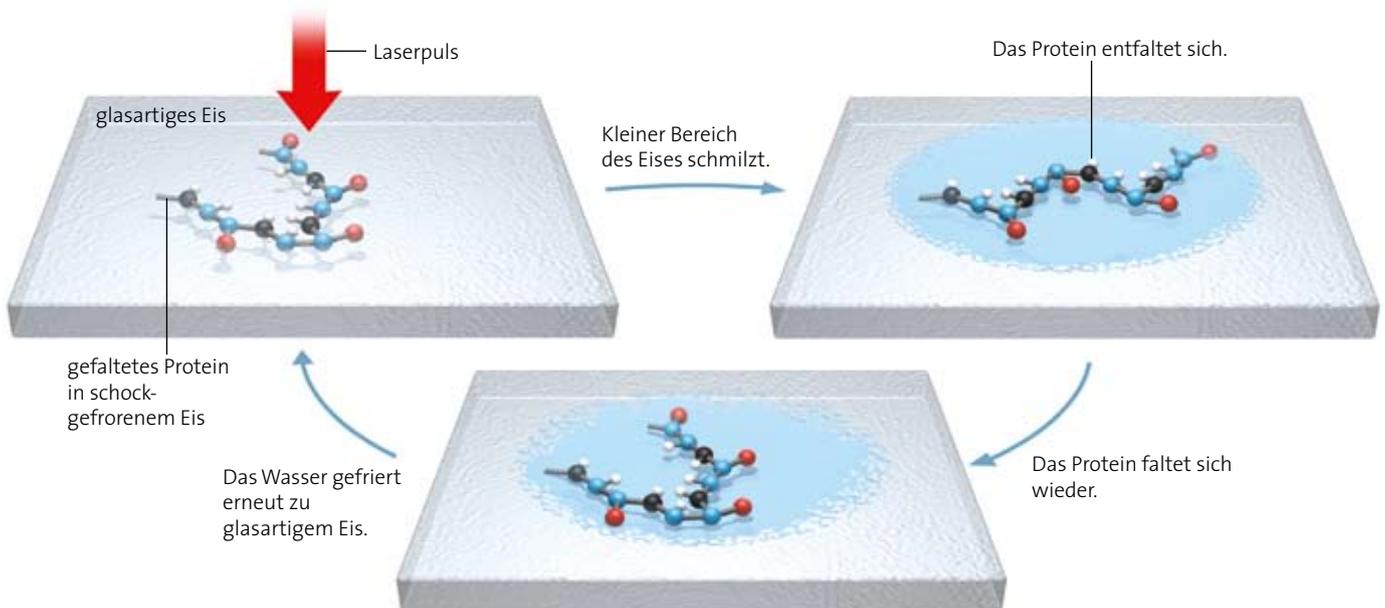
Kristall vollständig erfasst. Deren Frequenz hängt von der Elastizität der Graphitschichten ab – also von ihrem Widerstand gegen Stauchung und Dehnung. Wie sich zeigte, kostet es sehr viel mehr Energie, den Kohlenstoffmaschendraht zu verzerren, als die einzelnen Lagen aufeinanderzupressen oder auseinanderzuziehen. Das ist kein Wunder, denn die chemischen Bindungen zwischen den Atomen des Gitters sind wesentlich stärker als die Haftkräfte zwischen den Schichten.

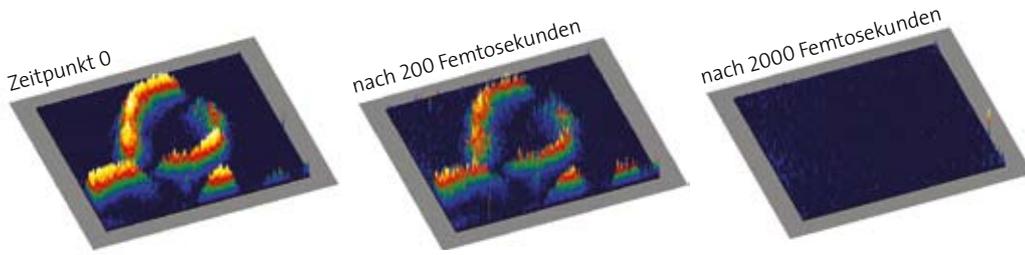
Zwar liefern auch Experimente mit größeren Graphitproben ähnliche Werte für die Elastizität des Materials, doch unsere Untersuchungen versprechen darüber hinaus Antworten auf zwei grundlegende Fragen zum Verhalten eines Festkörpers im Nanomaßstab. Wie klein darf er werden, bis er sich nicht mehr als Kontinuum mit kollektiven Eigenschaften wie der Elastizität beschreiben lässt? Und kann man vom Verhalten eines Materials im atomaren Maßstab auf seine makroskopischen Eigenschaften schließen? Beim Graphit stellten wir fest, dass sich selbst Proben aus nur wenigen Dut-

## Proteinen bei der Faltung zusehen

**Mit Hilfe der Kryobildgebung** wollen Ahmed H. Zewail und seine Mitarbeiter extrem schnelle molekularbiologische Vorgänge wie die Faltung von Proteinen filmen. Der Eiweißstoff ist dabei in glasartigem (amorphem) Eis eingefroren. Für jedes Einzelbild schmilzt ein Laserpuls den Bereich um das Proteinmolekül auf, so dass es

sich im erwärmten Wasser entfaltet. Aufgezeichnet wird dann seine erneute Faltung, während sich der Tropfen blitzartig wieder abkühlt und gefriert. Zusätzlich könnte das Protein an einem Substrat verankert werden, damit es für jede Aufnahme in exakt der gleichen Position bleibt.





Diese Bilder des Bakteriums *Escherichia coli* entstanden mittels photoneninduzierter Nahfeld-Elektronenmikroskopie. Ein Femtosekunden-Laserblitz induzierte dabei ein so genanntes evaneszentes elektromagnetisches Feld in der Zellmembran. Indem das Mikroskop nur diejenigen Elektronen registrierte, die Energie aus diesem Feld aufgenommen hatten, erzeugte es eine hoch aufgelöste, kontrastreiche Aufnahme der Membran (links). Das farbkodierte Konturdiagramm gibt die Signalintensität wieder, die von blau über grün nach rot und gelb zunimmt. Mit dieser Methode lassen sich extrem kurzzeitige Vorgänge festhalten; denn das Feld ist schon nach 200 Femtosekunden deutlich abgeklungen (Mitte) und nach zwei Nanosekunden völlig verschwunden (rechts).

zend Atomschichten schon überraschend ähnlich verhalten wie dicke Blöcke.

Bei der Aufnahme der oben beschriebenen Filme verloren die Sondenelektronen, wenn sie auf die Probe trafen, praktisch keine Energie – ähnlich Gummibällen, die von einer harten Oberfläche abprallen. Manchmal regt ein solches Teilchen jedoch ein Elektron in einem der Kohlenstoffatome an. Dabei überträgt es Energie. Wie viel das ist, hängt davon ab, an welcher Art von Bindung das Elektron des Kohlenstoffatoms beteiligt war. Mit einer schon länger bekannten Untersuchungsmethode, der Elektronen-Energieverlust-Spektroskopie, lässt sich die bei der Wechselwirkung übertragene Energiemenge messen. Daraus ergeben sich Informationen über die Bindungen in einem Material und die chemischen Elemente, aus denen es besteht.

Als wir diese Methode mit der ultraschnellen Elektronenmikroskopie kombinierten, stellten wir fest, dass sich die Bindungen im Graphit beim Vibrieren nach dem Auftreffen des Laserpulses während der Stauchungsphase ähnlich denen im Diamant verhielten. In der Dehnungsphase dagegen nahmen sie Eigenschaften wie im Graphen an. Zum Nachweis solcher Unterschiede ist das zeitliche Auflösungsvermögen der konventionellen Elektronen-Energieverlust-Spektroskopie viel zu gering.

Inzwischen hat meine Arbeitsgruppe weitere Materialien mittels vierdimensionaler Mikroskopie untersucht. Für Eisen erstellten wir Beugungsbilder, um die Umwandlung seiner Kristallstruktur vom raum- zum flächenzentrierten kubischen Gitter zu beobachten – ein Vorgang, der bei der Stahlerzeugung und vielen anderen industriellen Verfahren zur Verarbeitung dieses Metalls bei hohen Temperaturen auftritt. Wenn wir eine Eisenprobe innerhalb einer Nanosekunde auf rund 1200 Grad Celsius erhitzen, bildeten sich

inmitten des Chaos aus unzusammenhängenden Atombewegungen zunächst relativ langsam – in Zeiträumen von Nanosekunden – kleine Flecken mit der flächenzentrierten Kristallphase. Diese Keime wuchsen dann mit Schallgeschwindigkeit und breiteten sich so binnen Pikosekunden (billionstel Sekunden) über die gesamte erhitzte Eisenprobe aus. Bei einer derart raschen Transformation von einer Kristallphase in die andere müssen sich zahlreiche Atome auf koordinierte Weise verschieben – als lenke ein unsichtbarer Dirigent die ungezählten nanoskopisch kleinen Bewegungen plötzlich allesamt in eine Richtung. Ein tieferes Verständnis dieses Phänomens wäre nützlich für die industrielle Verarbeitung von Eisen, Stahl und anderen Materialien.

Zu den interessantesten Anwendungen der ultraschnellen Elektronenmikroskopie zählt die Möglichkeit, Nano- und Mikrosysteme in Echtzeit bei der Arbeit zu beobachten. Zum Beispiel filmten wir erstmals die hochfrequenten Resonanzschwingungen winzig kleiner Kragbalken, eine Art primitiver Miniaturkranarme. Dabei leiteten wir Messgrößen zur Beschreibung ihrer Bewegungen und Materialeigenschaften ab. Solche Daten eignen sich etwa zum Überprüfen theoretischer Modelle für die Konstruktion mikro- und nanoelektromechanischer Systeme.

Auch für Biologen dürfte die ultraschnelle Elektronenmikroskopie ein Geschenk des Himmels sein. Um Körperfunktionen zu verstehen, genügt es nämlich nicht, die Struktur der beteiligten Proteine und anderen Moleküle oder Zellbestandteile zu kennen. Man benötigt auch Informationen über deren Dynamik. Wie faltet sich ein Protein, wie erkennt es selektiv einen Rezeptor, welche Rolle spielt das umgebende Wasser? An manchen biologischen Abläufen sind ultraschnelle Zwischenschritte beteiligt. So beruht unser Sehvermögen ebenso wie die Fotosynthese der Pflanzen darauf,

## Die 4-D-Elektronenmikroskopie macht es möglich, Nano- und Mikrosysteme in Echtzeit bei der Arbeit zu beobachten

dass Lichtquanten Prozesse im Zeitbereich von Femtosekunden auslösen. Zwar spielen sich die meisten zellulären Vorgänge wesentlich langsamer ab. Dennoch können zum Beispiel bei der Proteinfaltung die atomaren und molekularen Bewegungen in den ersten Femtosekunden darüber entscheiden, ob sie korrekt verläuft und zu einer sinnvollen Struktur führt – oder zu einer, die beispielsweise die Alzheimer-Krankheit verursacht.

Welche Erkenntnisse die ultraschnelle Elektronenmikroskopie dabei ermöglicht, illustriert eine Untersuchung meiner Arbeitsgruppe zur Proteinfaltung. Dabei ermittelten wir, wie schnell sich ein kurzes Proteinfragment zu einer einzelnen Helixwindung verdrillte, wenn wir das umgebende Wasser abrupt erwärmten. Dabei zeigte sich, dass sich solche schraubenförmigen Strukturen 1000-mal schneller bilden als zuvor vermutet: in einigen hundert Piko- bis zu wenigen Nano- statt in Mikrosekunden. Diese Erkenntnis könnte zu einem neuen Verständnis biochemischer Vorgänge beitragen – auch krankhafter.

### Nächstes Ziel: die Faltung von Proteinen filmen

Bei biologischen Untersuchungen kombinieren wir unsere ultraschnelle 4-D-Methode gern mit der altbewährten Kryoelektronenmikroskopie. Dabei wird die in Wasser gebettete Probe in flüssiges Ethan getaucht, das bei –89 Grad Celsius siedet. Das Wasser gefriert so schlagartig zu einer glasigen Masse, die im Gegensatz zu kristallinem Eis weder Elektronenstrahlen beugt noch das biologische Material beschädigt. Auf diese Weise haben wir bereits Aufnahmen von Bakterienzellen und Proteinkristallen angefertigt. Eines unserer Ziele ist es, in glasartigem Wasser eingeschlossene Eiweißstoffe bei ihrer Faltung und Entfaltung zu beobachten. Dabei soll ein Startimpuls die Temperatur lokal gerade so weit erhöhen, dass sich der Bereich um das Protein herum verflüssigt. Dieses entfaltet sich in dem warmen Wassertröpfchen – und faltet sich beim anschließenden raschen Abkühlen prompt zurück. Sobald das Wasser erneut gefroren ist, kann der nächste Startpuls folgen.

Auf die gleiche Weise sollte es auch gelingen, die Dynamik der Geißeln von Bakterien und der Lipiddoppelschichten, aus denen Zellmembranen bestehen, sichtbar zu machen. Wie bei unseren Untersuchungen am Graphit könnten wir mit der ultraschnellen Elektronen-Energieverlust-Spektroskopie zugleich Veränderungen der chemischen Bindungen kartieren. Wenn wir es dabei schaffen, die Aufnahme zu machen, bevor das Biosystem sich bewegt oder zerfällt, sollten wir schärfere Bilder erhalten als mit der konventionellen Kryoelektronenmikroskopie.

Mit Abwandlungen der ultraschnellen Elektronenmikroskopie könnte es sogar möglich sein, bei Untersuchungen der Moleküldynamik räumliche Auflösungen unter einem Nanometer zu erzielen und bei der Abbildung der Elektronenverteilung in Materialien in den Attosekundenbereich vorzustoßen. Vor Kurzem hat meine Arbeitsgruppe zwei solche Varianten erstmals erprobt. Bei der Konvergenzstrahl-

UEM wird der Elektronenpuls auf ein nanoskopisch kleines Areal der Probe fokussiert. Die Nahfeld-UEM wiederum ermöglicht die Visualisierung so genannter evaneszenter elektromagnetischer Wellen (Oberflächenplasmonen), die in nanoskopisch kleinen Strukturen bei Bestrahlung mit einem intensiven Laserpuls entstehen. Dieses Phänomen bildet die Grundlage einer neuartigen Technologie, die als Plasmonik bezeichnet wird (siehe Spektrum der Wissenschaft 6/2007, S. 58). Damit sind bereits Aufnahmen von bakteriellen Zellmembranen und Proteinvesikeln mit Auflösungen im Femtosekunden- und Nanometerbereich gelungen.

In den letzten Jahren haben Ferenc Krausz von der Universität München, Paul Corkum von der University of Ottawa (Kanada) und andere Forscher den Attosekundenbereich für optische Untersuchungen erschlossen, indem sie extrem kurze Laserpulse zur Belichtung verwendeten. In meinem Arbeitskreis haben wir dagegen verschiedene ultraschnelle elektronenmikroskopische Verfahren für Aufnahmen auf derart kurzen Zeitskalen erdacht und arbeiten nun gemeinsam mit Herman Batelaan von der University of Nebraska in Lincoln an ihrer experimentellen Umsetzung.

Von statischen Strukturen liefert das Elektronenmikroskop heute schon faszinierende Bilder, die selbst winzigste Details zeigen. Indem wir nun die Zeit als vierte Dimension integrieren, verwandeln wir diese hoch aufgelösten Schnappschüsse in bewegte Bilder, die das Verhalten der Materie auf kleinstem Raum in seiner ganzen Dynamik offenbaren. ~

### DER AUTOR



**Ahmed H. Zewail** erhielt 1999 für die Untersuchung von Übergangszuständen chemischer Reaktionen mittels Femtosekundenspektroskopie den Nobelpreis für Chemie. Er ist am California Institute of Technology in Pasadena Inhaber des Linus-Pauling-Lehrstuhls für Chemie und Direktor des Physical Biology Center for Ultrafast Science and Technology. Außerdem hat der gebürtige Ägypter eine Professur für Physik.

### QUELLEN

- Flannigan, D.J. et al.:** Biological Imaging with 4D Ultrafast Electron Microscopy. In: Proceedings of the National Academy of Sciences USA 107, S. 9933–9937, 2010
- García de Abajo, F.J.:** Microscopy: Photons and Electrons Team Up. In: Nature 462, S. 861, 2009
- Thomas, J.M.:** Ein Durchbruch in der Elektronenmikroskopie. In: Angewandte Chemie 117, S. 5699–5702, 2005
- Zewail, A.H., Thomas, J.M.:** 4D Electron Microscopy: Imaging in Space and Time. Imperial College Press, London 2009
- Zewail, A.H.:** Four-Dimensional Electron Microscopy. In: Science 328, S. 187–193, 2010

### WEBLINKS

- [www.pro-physik.de/Phy/leadArticle.do?laid=8577](http://www.pro-physik.de/Phy/leadArticle.do?laid=8577)  
Beitrag über die ultraschnelle Elektronenmikroskopie bei »Pro Physik«
- [www.chemieonline.de/bibliothek/details.php?id=2674](http://www.chemieonline.de/bibliothek/details.php?id=2674)  
Ultraschnelle Elektronenmikroskopie macht Nanokanäle sichtbar.



# Die kleinsten Bits der Welt

Memristoren sind elektrische Widerstände mit Gedächtnis. Sie sollen Datenspeicher noch schneller machen – und den Energiehunger von Computern drosseln.

Von Rainer Waser, Eike Linn, Regina Dittmann und Kristof Szot

Eines der bekanntesten Gesetze der Physik lautet: In einem elektrischen Leiter verhalten sich Spannung und Strom proportional zueinander. Der Proportionalitätsfaktor ist der elektrische Widerstand  $R$ , sein Kehrwert der elektrische Leitwert. Dieses nach seinem Entdecker Georg Simon Ohm (1789–1854) benannte Gesetz erweist sich bei einem Großteil der Materialien und Bauelemente als gültig. Doch wie so oft bestätigen Ausnahmen die Regel. Der Widerstand von Halbleiterdioden etwa sinkt nicht-linear oder steigt fast ins Unendliche, je nachdem, wie die anliegende Spannung gepolt ist. Eines aber galt bislang immer: Ohne Spannung ist der Widerstand wieder der alte. Das Bauelement hat den erreichten Zustand auf einen Schlag »vergessen«.

Was aber wäre, wenn es ein Gedächtnis besäße? Wenn sich ihm ein hoher oder geringer Widerstand auf Dauer einschreiben ließe? Zwei mögliche Anwendungen wären hochspannend. Zum einen könnten Schichten und Bauelemente aus solch exotischen Materialien Daten speichern, so wie die ma-

gnetische Beschichtung einer Festplatte oder das Raster aus bestimmten Transistoren bei Halbleiterspeichern binäre Informationen bewahrt. Zum anderen wären sie für die Verarbeitung von Informationen in Logikschaltkreisen eine Option. Das gilt freilich vor allem dann, wenn sich auf diese Weise die Dimensionen eines Bits oder eines Schaltelements drastisch reduzieren ließen.

Parallel zu ersten experimentellen Arbeiten von Festkörperphysikern an einem elektrischen Leiter mit Gedächtnis machte sich der amerikanische Elektroingenieur Leon Chua 1971 darüber Gedanken (Chua forscht heute an der University of California in Berkeley). Er nannte sein theoretisches Konstrukt Memristor, ein Kunstwort aus *memory* für Speicher und *resistor* für den elektrischen Widerstand. Während der herkömmliche Widerstand eine lineare Strom-Spannungs-Kennlinie aufweist, deren konstante Steigung dem Wert des Widerstands entspricht, verlief die Kennlinie eines Memristors in Form einer Hystereseschleife (siehe Bild S. 88): Zunächst wüchse der hindurchfließende Strom mit steigender Spannung linear an, wie man es vom ohmschen Widerstand kennt. Dann aber sollte er bei einer bestimmten Spannung  $V_s$  zusammenbrechen – der elektrische Widerstand wäre nun sehr groß. Dieser Zustand änderte sich erst durch Anlegen einer Spannung umgekehrter Polung ( $-V_s$ ) – der Widerstand kehrte dann zu seinem ursprünglichen Wert zurück.

1976 erweiterte Chua sein Konzept vom Memristor zur allgemeineren Klasse so genannter memristiver Bauelemente, deren Strom-Spannungs-Kennlinie zwar eine Hystereseschleife durchlaufen sollen, die nun unter anderem nicht mehr die ideale Form des Memristors besitzen müsste. Inzwischen haben die Begriffe einige Umdeutungen erfahren. In der Praxis verstehen wir heute unter einem Memristor meist einen memristiven Widerstandsschalter, dessen nicht-lineares Verhalten ebenso wie sein Gedächtnis auf den elek-

## AUF EINEN BLICK

### SCHALTER MIT ERINNERUNG

**1** Memristoren, auch memristive Schalter genannt, sind elektrische Bauelemente, deren Widerstand durch eine angelegte Spannung zwischen hohen und niedrigen Werten schaltbar ist. Das Besondere: Der jeweilige Zustand bleibt auch dann erhalten, wenn die äußere Spannung abgeschaltet wird.

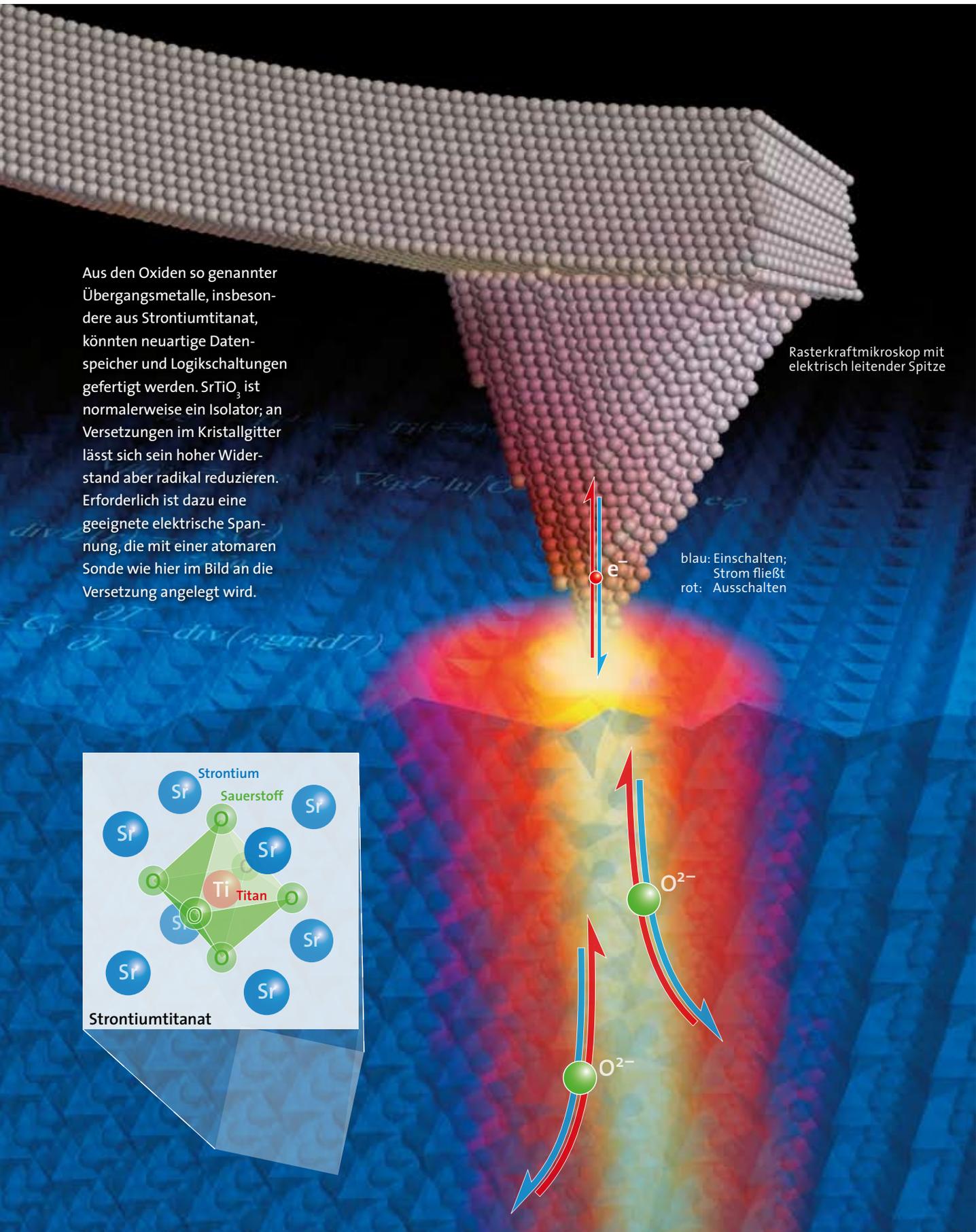
**2** Memristive Schalter beruhen auf Redoxprozessen in Übergangsmetalloxiden, die bevorzugt an atomaren Kristalldefekten auftreten.

**3** Das erste Anwendungsgebiet dürften nichtflüchtige Datenspeicher mit Dichten bis zu einem Terabit pro Quadratzentimeter sein. Darüber hinaus könnten memristive Arrays Computer schneller und energieeffizienter machen.

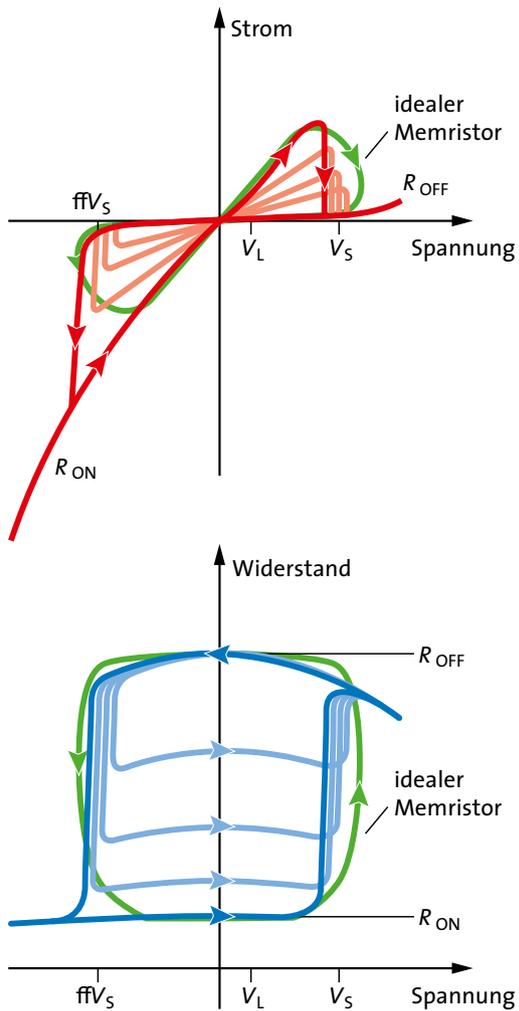
Aus den Oxiden so genannter Übergangsmetalle, insbesondere aus Strontiumtitanat, könnten neuartige Datenspeicher und Logikschaltungen gefertigt werden.  $\text{SrTiO}_3$  ist normalerweise ein Isolator, an Versetzungen im Kristallgitter lässt sich sein hoher Widerstand aber radikal reduzieren. Erforderlich ist dazu eine geeignete elektrische Spannung, die mit einer atomaren Sonde wie hier im Bild an die Versetzung angelegt wird.

Rasterkraftmikroskop mit elektrisch leitender Spitze

blau: Einschalten;  
Strom fließt  
rot: Ausschalten



GRAFIK: THOMAS FOSCHINGER, IDEE: BÄNERWASER, MITWIRKUNG: EIKE LINN



**Die Strom-Spannungs-Kennlinie** (oben) und die Widerstand-Spannungs-Kurve (unten) verdeutlichen, warum sich memristive Elemente als Datenspeicher eignen. Liegt die Spannung  $V_S$  an, schnellert der elektrische Widerstand des Bauteils auf einen hohen Wert, der – weil nun kein Strom hindurchfließen kann – als  $R_{OFF}$  bezeichnet wird. Die entgegengesetzt gepolte Spannung  $-V_S$  hingegen reduziert den Widerstand auf den Wert  $R_{ON}$ . Diese Zustände bleiben so lange erhalten, bis erneut eine »Schreibspannung« anliegt und das Element umschaltet (so genannte hysteretisches Verhalten). Mit der deutlich schwächeren »Lesespannung«  $V_L$  lässt sich der Speicherzustand prüfen, ohne ihn zu verändern. Die Pfeile geben an, in welcher Richtung die Spannungen durchfahren werden; hell gefärbte Kurven zeigen an, dass auch beliebige Zwischenzustände eingeschrieben werden können. Die beiden grünen Kurven stellen zum Vergleich die Charakteristik eines idealen Memristors dar.

Grafik: THOMAS POS-SINGER, IDEE: RAINER WÄGER, MITWIRKUNG: EIKE LINN

trochemischen Prozessen von Reduktion und Oxidation basiert, bei denen Elektronen zwischen atomar benachbarten Materialbereichen übertragen werden.

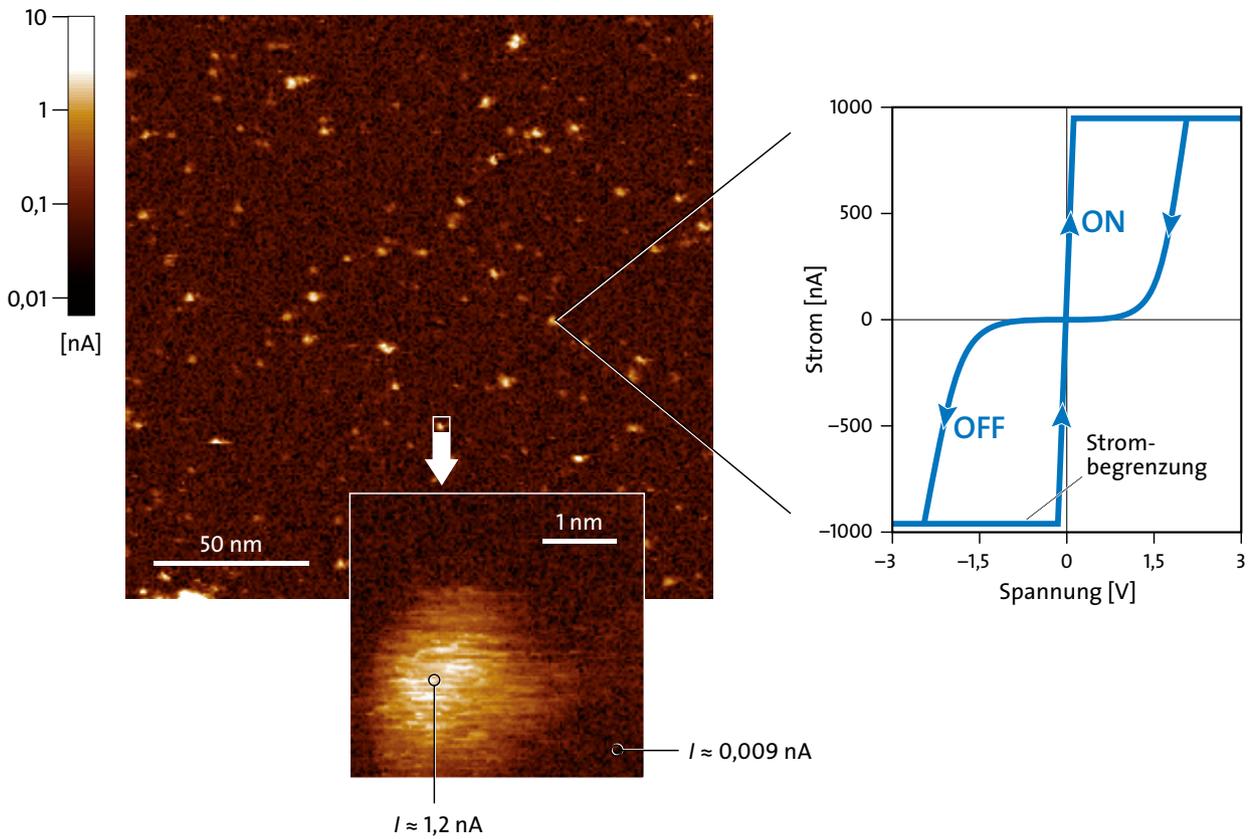
Chuas Konzept geriet schnell in Vergessenheit, obwohl in den 1960er und 1970er Jahren das hysteretische Widerstandsschalten der Oxide und Verbindungen so genannter Übergangsmetalle (siehe Glossar S. 91) erforscht wurde. Das Interesse der Wissenschaftler galt nicht Chuas Idee eines »4. passiven Bauelements« neben Widerstand, Kondensator und Spule, sondern bereits der Informationsspeicherung. Weil es aber weder gelang, den memristiven Effekt zu erklären, noch ihn zu kontrollieren, schief das Interesse wieder ein, zumal Forscher, die Datenspeicher auf Transistorbasis entwickelten, große Fortschritte machten.

### Experimente mit Übergangsmetalloxiden

Mitte der 1990er Jahre befassten sich das Team des Nobelpreisträgers Georg Bednorz am IBM-Forschungslabor in Rüschlikon bei Zürich und das des Physikers Yoshinori Tokura an der Universität Tokio unter ganz anderen Fragestellungen mit Übergangsmetalloxiden; dabei griffen sie das Phänomen des hysteretischen Widerstandsschaltens erneut auf. Zur gleichen Zeit suchte zudem eine weitere Gruppe gezielt danach, um die Abmessungen von Datenspeichern (und auch von Logikschaltungen) weiter schrumpfen zu lassen, als es mit den in der Halbleiterindustrie gängigen Verfahren möglich war. Der Physikochemiker Stanley Williams vom Hewlett-Packard Laboratory in Palo Alto setzte dazu auf spezielle organische Moleküle, die er als widerstandsschaltende Schicht zwischen Leiterbahnen einbrachte. Auch ein zweites Problem der Computerbranche sollte diese Anordnung lösen: Der Stromverbrauch der Chips war und ist bis heute zu hoch, was aufwändige Kühlung und damit zusätzlichen Energieaufwand nötig macht. Williams' Arbeitsgruppe machte zwar Fortschritte, stellte einige Jahre später jedoch fest, dass das beobachtete hysteretische Verhalten auch dann auftrat, wenn die organischen Moleküle nicht direkt angesteuert wurden. Seit 2008 ist klar: Nicht die organischen Moleküle waren verantwortlich, sondern eine Haftschiicht aus Titan, die ihren Kontakt mit den Platinelektroden vermitteln sollte. Dort hatte sich eine hauchdünne Lage Titanoxid gebildet – der eigentliche Urheber des Phänomens.

Die memristiven Eigenschaften von Übergangsmetalloxiden zu verstehen, zu beherrschen und schließlich für die Informationstechnologie nutzbar zu machen, ist seit 2002 das Anliegen unserer Gruppe, die am Forschungszentrum Jülich und an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen angesiedelt ist. Wir vermuteten den Grund für das besondere elektrische Verhalten in der elektronischen Struktur des Titanoxids.

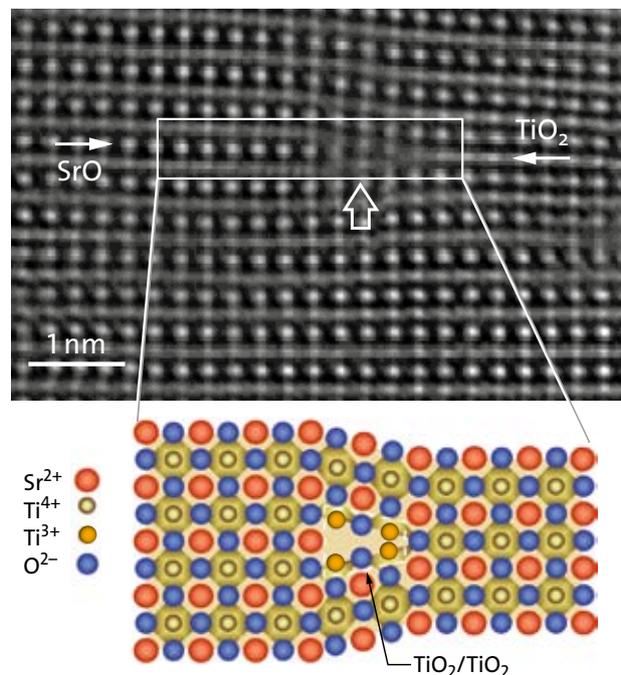
Charakteristisch für alle Übergangsmetalle ist die Art und Weise, wie sie zum Ausgleich ihrer positiven Kernladung die noch nicht vollständig besetzten Orbitale mit Elektronen füllen (siehe Glossar S. 91). Wächst die Kernladungszahl beim Übergang von einem Element des Periodensystems zum



Mit der elektrisch leitfähigen Spitze des Rasterkraftmikroskops wurde die Oberfläche eines SrTiO<sub>3</sub>-Einkristalls abgetastet und so dessen Widerstand beziehungsweise Leitfähigkeit mit atomarer Auflösung gemessen. Die hellen Flecken markieren Orte

erhöhter Leitfähigkeit. Sie treten überall dort auf, wo Versetzungen die Oberfläche erreichen. Legt man über die Sonde an eine solche Durchtrittsstelle Spannung an, lässt sich der Widerstand zwischen dem R<sub>ON</sub>- und dem R<sub>OFF</sub>-Wert umschalten.

**Das Transmissionselektronenmikroskop bringt es an den Tag:** Die Aufnahme zeigt eine Versetzung in einem Strontiumtitanatkristall. Grund der Störung in der regelmäßigen Struktur ist ein atomarer Stapelfehler. Die Elementarzelle des Kristalls besteht aus Sr<sup>2+</sup>-, O<sup>2-</sup>- und Ti<sup>4+</sup>-Ionen. Weil sich diese Zelle periodisch wiederholt, ergeben sich parallel nebeneinander Linien mit der Abfolge Sr-O und O-Ti-O (siehe Mikroskopaufnahme). Im Versetzungskern aber sind zwei O-Ti-O-Linien zueinander benachbart. Das verändert die elektronischen Verhältnisse, so dass dort das Titan als Ti<sup>3+</sup>-Ion vorliegt.



OBERN: AUS KRISTOF SCOT ET AL., NATURE MATERIALS 5, S. 312, 2006; KOMBINATION VON FIG. 3A UND FIG. 4;  
 UNTERN: FOTO AUS CHUNBIN LI ET AL., PHYSICAL REVIEW LETTERS 95, S. 235606, 2005; FIG. 2A; ZEICHNUNG DARUNTER: KRISTOF SCOT

nächstschwereren um eins, okkupiert das nun benötigte zusätzliche Elektron einen Platz, der dem Kern so nahe wie möglich ist. Auf diese Weise erreicht das Atom einen Grundzustand insgesamt möglichst geringer Energie. Übergangsmetalle sollten demnach das dem Kern nächste d-Orbital auffüllen. Stattdessen aber nimmt ein weiter außen liegendes s-Orbital die Elementarladung auf. Denn hier erreicht gerade diese Aufteilung aus quantenphysikalischen Gründen einen energetisch günstigeren Zustand. Erleichtert wird diese Abweichung von der Regel dadurch, dass der Energieunterschied zwischen dem äußeren s- und dem inneren d-Orbital hier sehr klein ist.

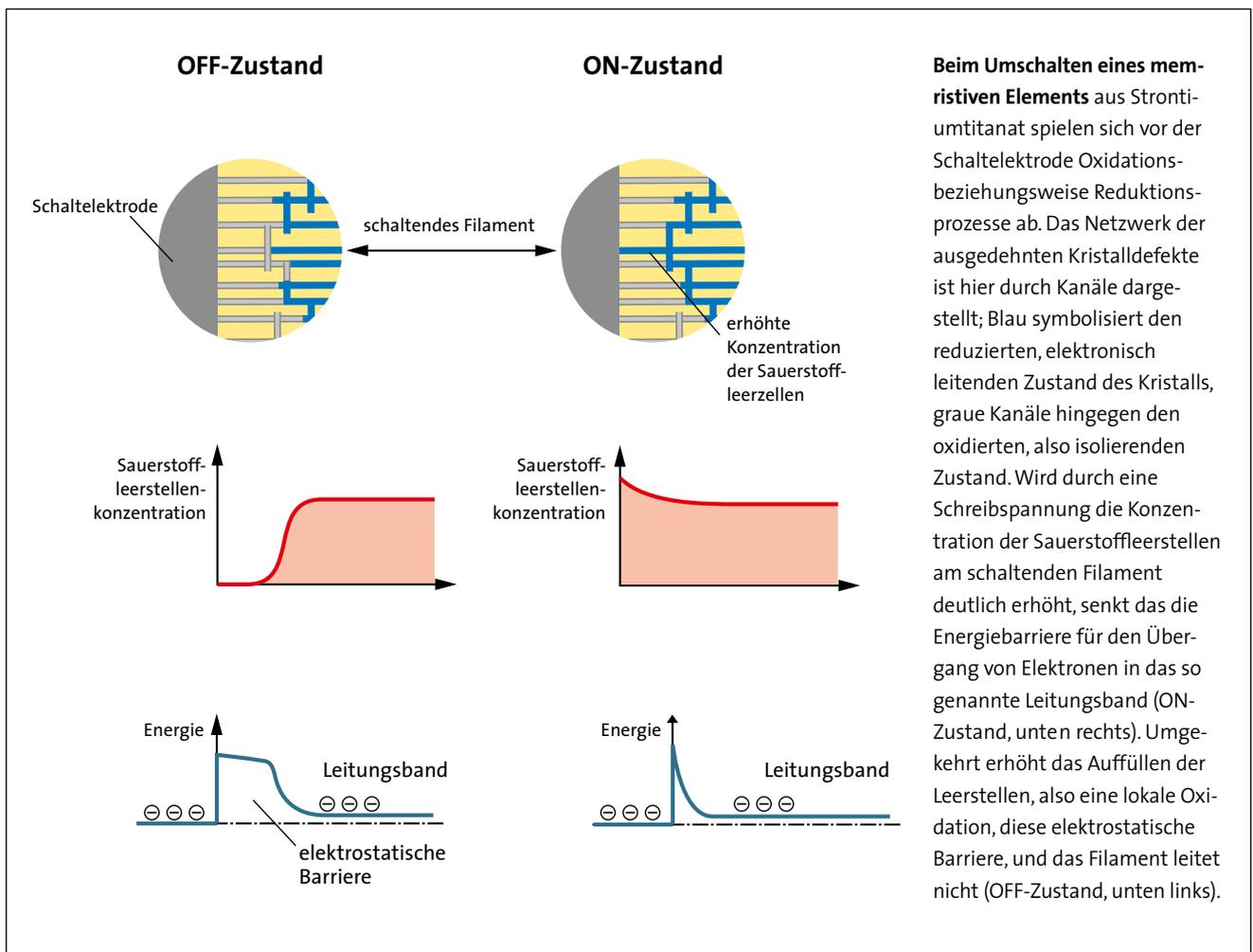
### Oxidation und Reduktion als Schlüsselprozesse

Im Allgemeinen vermitteln äußere Elektronen die Wechselwirkungen zwischen Atomen: Als Valenzelektronen ermöglichen sie chemische Bindungen, als Leitungselektronen bewegen sie sich frei im Kristallgitter elektrischer Leiter. Nicht so bei den Übergangsmetallen: Auf Grund der erwähnten minimalen Energiedifferenz stehen Ladungsträger sowohl aus dem äußeren s- als auch aus dem inneren d-Orbital zur Verfügung. Deshalb kann beispielsweise Titan bis zu vier Elementarladungen an Bindungspartner abgeben. Es wird zum

Beispiel im Strontiumtitanat ( $\text{SrTiO}_3$ ) – das uns als Modell für Übergangsmetalloxide dient – zum  $\text{Ti}^{4+}$ , also einem vierfach positiv geladenen Ion; in der Terminologie der Chemie entspricht dies einer Oxidation. Weil es damit aber keine Elektronen mehr »übrig« hat, ist das Leitungsband in diesem Festkörper leer, das heißt, elektrischer Strom kann nicht fließen. Dieses Metall ist daher normalerweise ein Isolator, stellt elektrischem Strom also einen sehr großen Widerstand entgegen.

Würden hingegen durch welchen Umstand auch immer nur die Elektronen des äußeren s-Orbitals für die Bindung rekrutiert, bliebe das d-Orbital besetzt. Aus dem Isolator würde wieder ein Leiter mit nur kleinem Widerstand. Das geschieht tatsächlich beispielsweise dann, wenn einige für den Sauerstoff vorgesehene Plätze im Kristallgitter von Strontiumtitanat frei bleiben. Weil solche Sauerstoffleerstellen sozusagen die zur Verfügung stehenden Valenzelektronen des Titans nicht in Anspruch nehmen, gibt es dort Ti-Ionen mit Ladungszahlen von +3 oder +2 ( $\text{Ti}^{3+}$  beziehungsweise  $\text{Ti}^{2+}$ , siehe Bild S. 89). Aus Sicht des Chemikers wurde das Titan hier lokal reduziert (also Elektronen auf das Titan übertragen).

Solche Leerstellen entstehen, wenn man den  $\text{SrTiO}_3$ -Kristall (beziehungsweise die  $\text{SrTiO}_3$ -Schicht) auf 800 bis 900



Grad Celsius aufheizt und zudem den Sauerstoffpartialdruck der Umgebungsluft von 212 Millibar auf  $10^{-3}$  bis  $10^{-5}$  Millibar senkt; außerdem wird einmalig eine Spannung angelegt, um den Kristall zu »formieren«.

Einer von uns, Kristof Szot, hatte vor gut zehn Jahren nachgewiesen, dass die so erzeugten Sauerstoffleerstellen sich vor allem an Versetzungen in der Gitterstruktur ansammeln, einer bestimmten Art von Defekten, die bei der Herstellung des Kristalls entstehen. Solche Versetzungen ziehen sich wie atomare Filamente bis zur Kristalloberfläche durch. Mittels hochauflösender Elektronenmikroskopie (*High-resolution transmission electron microscopy*, HRTEM) bestätigten Chunlin Jia und Knut Urban vom Ernst Ruska-Centrum in Jülich, dass in der unmittelbaren Nähe dieser Defekte – wir sprechen hier von Distanzen im Nanometermaßstab – weniger Sauerstoff vorhanden ist als andernorts. Im Jahr 2006 konnten wir zeigen, dass diese Eigenheit das memristive Verhalten maßgeblich verursacht: Es tritt bevorzugt dort auf, wo Versetzungen die Kristalloberfläche erreichen (siehe Bild S. 89).

Wir nutzten dazu ein Rasterkraftmikroskop, das die atomaren Kräfte zwischen einer äußerst feinen Sondenspitze und der Oberfläche einer Probe misst. Damit lässt sich deren Topografie auf weniger als einen Nanometer genau vermessen. (Die an einer Feder gelagerte Nadel wird auf Grund der Wechselwirkungen ausgelenkt und die Amplitude dieser Auslenkung bestimmt.) Da wir eine elektrisch leitfähige Spitze verwendeten, konnten wir überdies eine elektrische Spannung anlegen und so den Widerstand der Oberfläche lokal ermitteln. Weil Strontiumtitanat sehr viele Versetzungen aufweist, ähnelte die resultierende »Karte der Leitfähigkeit« einem Sternenhimmel, wobei die Flecken geringen Widerstands oft kaum mehr als einen Nanometer durchmaß.

### Ein bis zwei Nanometer pro Bit

Als Nächstes positionierten wir die Mikroskopnadel gezielt über einer solchen Stelle und legten eine Spannung an. Als wir diese langsam auf einige Volt steigerten, geschah das Erhoffte: Der elektrische Widerstand ließ sich hysteretisch zwischen einem hohen und einem niedrigen Wert hin- und herschalten. Offenbar hatte das Titanion seine Ladungszahl verändert, war bisweilen zum +4 oxidiert, dann wieder zum +3 oder +2 reduziert worden! Mehr noch: War dieser Zustand erst einmal »eingeschrieben«, konnten wir ihn mit einer sehr viel niedrigeren Spannung »auslesen«, ohne ihn erneut zu verändern. Am Ausgang einer Versetzung könnte Strontiumtitanat also die binäre Information »0« oder »1« als elektrischen Widerstand speichern. Bei einem Durchmesser von ein bis zwei Nanometern pro Fleck ließen sich theoretisch Speicherdichten von über einem Terabit pro Quadratmeter ( $10^{12}$  Bit/cm<sup>2</sup>) erreichen, 100-mal mehr als bei den derzeit besten Halbleiterspeichern.

Unklar blieb aber noch der genaue Mechanismus des Redoxprozesses: Warum wechselten die Titanionen ihre Ladungszahl, und aus welchem Grund blieb diese erhalten, auch wenn keine Spannung mehr anlag? Die naheliegende

## Glossar

**HYSTERESE:** Verhalten eines Systems, das nicht nur von der Größe einer Eingangsvariablen, sondern auch von der Geschichte des Systems abhängt.

**ATOMORBITAL:** Das von Niels Bohr entwickelte Atommodell lässt Elektronen auf Schalen um den positiv geladenen Kern kreisen. Dem Wellencharakter atomarer Teilchen kommt das Orbitalmodell näher: Die elektrische Ladungsdichte ist darin räumlich um den Atomkern verteilt. Dabei haben s-Orbitale die Form einer Kugel, p-Orbitale die einer Hantel und d-Orbitale ähneln einem Komplex aus fünf keulenförmigen Wolken.

**ÜBERGANGSMETALLE:** Im Periodensystem gehören sie zu jenen Elementen, deren d-Orbitale sich mit zunehmender Ordnungszahl füllen. Die Besonderheit der Übergangsmetalle und ihrer Oxide: Noch bevor das jeweils erst teilweise besetzte d-Orbital aufgefüllt wird, kann das nächstaußenliegende s-Orbital die Elementarladung aufnehmen.

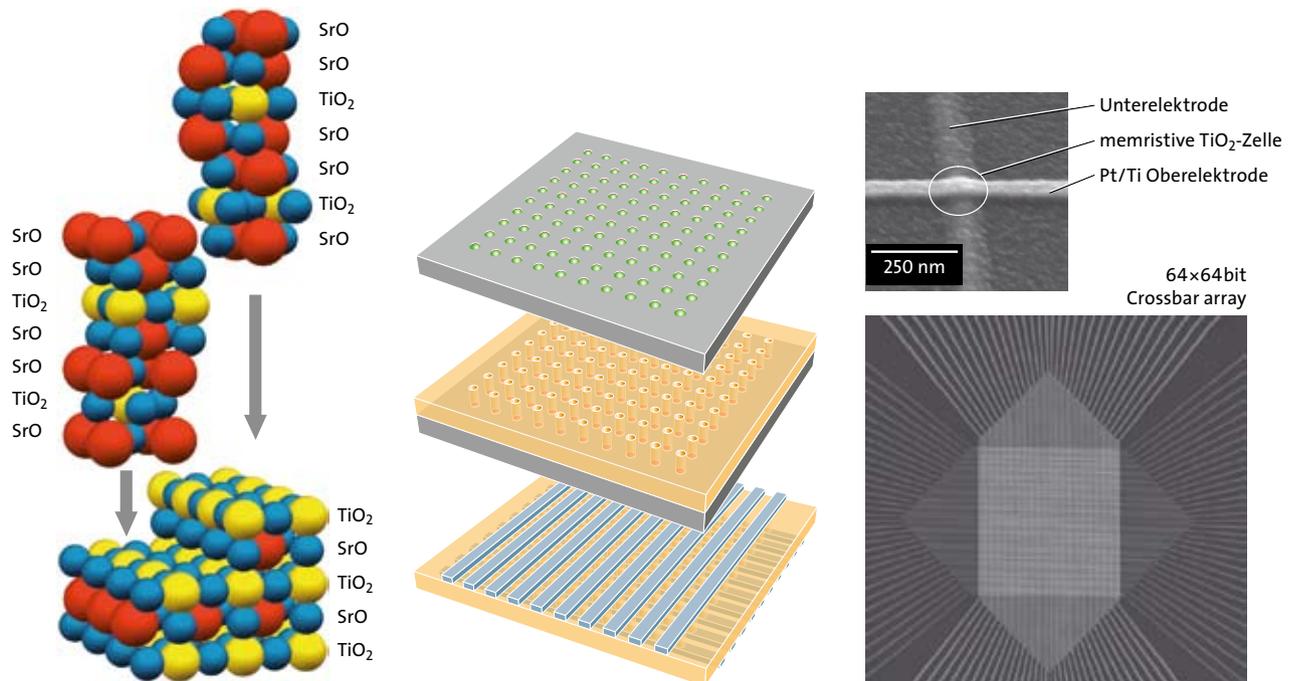
Erklärung lautete: weil Sauerstoffleerstellen unter dem Einfluss der Spannung im Kristallgitter an neue Plätze gewandert sind. Wohlgemerkt ist dergleichen durchaus möglich – erfolgt aber normalerweise bei Temperaturen von mehr als 500 Grad Celsius. Verschiedene Forschergruppen weltweit haben jedoch in den vergangenen Jahren bestätigt: Übergangsmetalloxide zeigen dieses Phänomen schon bei Raumtemperatur – zumindest über Distanzen von wenigen Nanometern hinweg. Dass Stellen im Kristallgitter, an denen Sauerstoff fehlt, derart mobil werden, beruht offensichtlich auf den nur punktuell applizierten Spannungen. Schon wenige Volt, auf kleinstem Raum angelegt, bauen hohe elektrische Felder auf. Je nach Polarität der Spannung bewegen sich die Leerstellen dann auf den elektrischen Kontakt (entweder die Nadel eines Rasterkraftmikroskops oder Metallelektroden) zu oder davon weg, was die Titan-Oxidationszahl erhöht oder senkt, also die Zahl der Leitungselektronen verringert oder erhöht. Zudem fließt in der nächsten Umgebung der Versetzung ein elektrischer Strom, der den Kristall lokal aufheizt, und auch das dürfte Sauerstoffleerstellen im Umfeld weniger Nanometer mobil machen.

In welchem Maß Felder und Ströme jeweils zum memristiven Effekt beitragen, wissen wir noch nicht. Doch beide zusammen machen es möglich, den Schreibvorgang innerhalb von weniger als zehn Nanosekunden abzuschließen. Danach bleibt der jeweilige Zustand des SrTiO<sub>3</sub> in den Versetzungen auf Monate oder Jahre stabil. Die von der Lesespannung erzeugten Felder sind zu schwach, um die Sauerstoffleerstellen wieder auf Wanderschaft zu schicken.

Der Gruppe um Stanley Williams ist es zu verdanken, dass Chuas Konzept des Memristors wieder entdeckt wurde, worauf Williams diese Bezeichnung für redoxbasierte hystere-

**Um das memristive Schalten in der Datentechnik nutzen zu können**, müssen die notwendigen Kristalldefekte in regelmäßiger Anordnung und hoher Dichte hergestellt werden. Eine Option dafür bietet das Abscheiden bestimmter Einkristalle aus Strontium- und Titanoxiden auf Dünnschichten deutlich unterschiedlicher Kristallstruktur (links). Auch ein Raster von Metallclustern kann als Grundlage dienen (Mitte oben): Wächst darauf eine Oxiddünnschicht auf, kann sich ihr Gitter nicht unge-

stört ausbilden, und es bilden sich die erforderlichen Versetzungen (Mitte). Ein Vorteil des Verfahrens: Die Cluster lassen sich mit Elektroden kontaktieren (Mitte unten). Eine dritte Option sind Oxiddünnschichten, die auf nanostrukturierte Elektrodenanordnungen abgeschieden werden, um anschließend darauf wiederum diametral angeordnete Elektroden aufzubringen (rechts oben). An den Kreuzungspunkten zwischen den Elektroden entstehen memristive Nanozellen (rechts unten).



GRAFIKEN: THOMAS ROSSINGER; FOTO RECHTS OBEN (KROSSPOND) AUS: C. MALLENHERR, R. WASER, ET AL., APPL. PHYS. LETT., 06. SEPTEMBER 2009, FIG. 4A; FOTO RECHTS UNTEN (CROSSBAR ARRAY) AUS: C. KUEJELER, R. WASER, ET AL., 9TH NON-VOLATILE MEMORY TECHNOLOGY SYMPOSIUM (NVM-TS), PACIFIC GROVE, USA, 2008, FIG. 1

tische Widerstandsschalter aufgriff. Sie hat sich inzwischen allgemein durchgesetzt, obwohl die Kennlinien dem Ideal der Definition Chuas nicht vollständig entsprechen (siehe Bild S. 88).

Memristive Elemente beziehungsweise Memristoren könnten also den heutigen Arbeitsspeichern gehörig Konkurrenz machen. Zum Vergleich: Die aus Transistoren und Kondensatoren aufgebauten Speicherzellen der Dynamic Random Access Memories (DRAM) haben Kantenlängen von etwa 90 Nanometern; die Flecken hoher Leitfähigkeit auf unseren Modellkristallen haben Durchmesser von nur wenigen Nanometern. Eben deshalb ließe sich theoretisch eine Speicherdichte von mehr als einem Terabit pro Quadratmeter erreichen, also gut 100-mal mehr, als es die DRAM-Technologie heute ermöglicht. In der Praxis sind wir davon noch weit entfernt. Um mit der etablierten Technologie zumindest mithalten zu können, müssten Filamentausgänge in einem regelmäßigen Raster angeordnet werden, statt sich in einer vom Zufall bestimmten Verteilung zu ergeben. Wir verfolgen verschiedene Ansätze (siehe Bild oben), erzeugen bei-

spielsweise Kristalldefekte in regelmäßigen Abständen, indem wir dem Ausgangsgitter eine so genannte Überstruktur einprägen. Wir scheidet auch Strontiumtitanat und andere Übergangsmetalloxide auf geordneten Metallclustern ab, die dann als Wachstumskeime für Kristalldefekte dienen; wir erzeugen amorphe und nanokristalline Oxidschichten zwischen strukturierten Elektroden.

Gelingt es, das Raster potenzieller Speicherzellen in der nötigen Integrationsdichte verlässlich herzustellen, nach Möglichkeit sogar mehrere Ebenen übereinanderzustapeln, bedarf es auch einer Schaltungsarchitektur, um jede einzelne Zelle gezielt anzusprechen. Bei den meisten DRAMs besitzt jede einen so genannten Auswahltransistor, der überdies dafür sorgt, dass sich die einzelnen Zellen nicht gegenseitig elektrisch beeinflussen. Doch sie sind deutlich größer und eignen sich obendrein nicht für dreidimensionale Speicherstapel – die Schichten wären viel dicker, die elektrischen Leitungen entsprechend länger, der Energieaufwand höher und schließlich auch die Fertigungskosten zu groß. Deshalb würde man die Auswahltransistoren gerne einsparen. Bei

# Naturwissenschaftliches Wissen aus erster Hand für Schulen und Schüler



wissenschaft  
in die schulen!

## AUS DER FORSCHUNG IN DEN UNTERRICHT

### Das Projekt Wissenschaft in die Schulen! – eine Investition in die Zukunft

Naturwissenschaften und Technik sind für Oberstufenschüler eine spannende Sache und für den Wirtschaftsstandort Deutschland von fundamentaler Bedeutung. Daher möchten wir gemeinsam mit Ihnen das Interesse der Jugendlichen an diesem Themenbereich wecken und fördern. Wir – das sind der Verlag Spektrum der Wissenschaft, die Gesellschaft für Biochemie und Molekularbiologie, das Max-Planck-Institut für Astronomie, die Landesakademie für Fortbildung und Personalentwicklung an Schulen in Bad Wildbad und das Haus der Astronomie in Heidelberg.

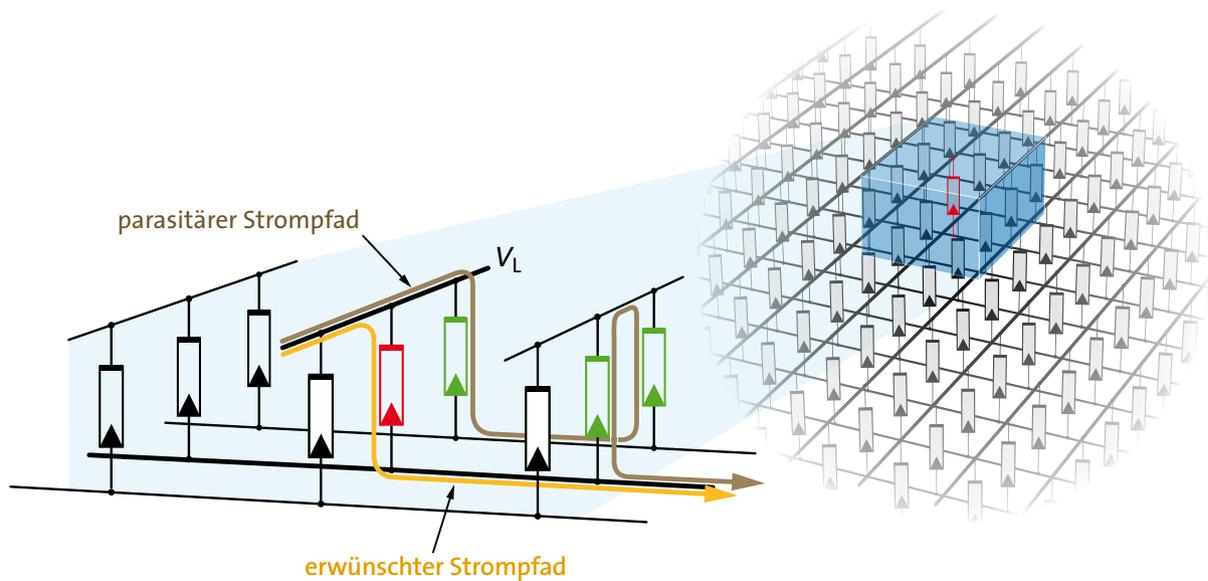
**Bisher haben sich schon über 7500 Schüler für WIS angemeldet.** Wenn Sie wissen möchten, wie Sie eine Klasse und das Projekt unterstützen können und was es mit WIS auf sich hat, dann finden Sie hier die Informationen:

[www.wissenschaft-schulen.de](http://www.wissenschaft-schulen.de)

## MEHR ALS TAUSEND SCHÜLER SIND SCHON DABEI. TAUSEND DANK AN UNSERE SPONSOREN!



Märkischer Arbeitgeberverband | Großdrebnitzer Agrarbetriebe Freundeskreis des evang. Heidehofgymnasiums Stuttgart | Symbio Herborn Group | Förderverein »Freunde des Helmholtzgymsnasiums« Zweibrücken | NDT Systems & Services AG | Weinmann GmbH | Stadtwerke Düsseldorf | Karl-Möller-Stiftung | AREVA Energietechnik GmbH | Förderverein des Eichenfeldgymnasiums | Kernkraftwerk Isar, Essenbach  
Dr. Arnold-Hueck-Stiftung | Josef Stadler GmbH | Moc Danner GmbH | Weserwind GmbH



**Soll eine memristive Zelle in einem Speicherarray ausgelesen werden,** können parasitäre Strompfade den Wert (»0« oder »1«) verfälschen. Denn wenn sich die Zelle im hochohmigen OFF-Zustand (rot) befindet, andere in ihrer unmittelbaren Umgebung hingegen im ON-Zustand (grün), so fließt der von der Lesespannung  $V_L$  ausgelöste Strom nicht nur durch die fragliche Zelle (gelber Pfad), sondern nutzt auf Grund der geringen Widerstände auch die Umgehungsmöglichkeit (brauner Pfad). Ein Sensor registriert dann eine viel zu hohe Stromstärke und übermittelt einen falschen Wert für den Inhalt der Speicherzelle.

spannung  $V_L$  ausgelöste Strom nicht nur durch die fragliche Zelle (gelber Pfad), sondern nutzt auf Grund der geringen Widerstände auch die Umgehungsmöglichkeit (brauner Pfad). Ein Sensor registriert dann eine viel zu hohe Stromstärke und übermittelt einen falschen Wert für den Inhalt der Speicherzelle.

JINSAUS EIRE UNNI ET AL., NATURE MATERIALS 9, 543 (2010); IFC 1; GRAFIK RECHTIS: THOMAS POSSINGER

Halbleiterspeichern sind solche passiven Arrays ausgeschlossen; bei den redoxbasierten Speichern zwar denkbar, aber nicht unproblematisch. Angenommen, man möchte eine Zelle auslesen, die aktuell einen hohen elektrischen Widerstand aufweist (laut Nomenklatur der OFF-Zustand), in ihrer Umgebung gibt es aber andere Zellen mit geringem Widerstand (ON-Zustand), so könnte der Strom, den die Lesespannung in Gang setzt, einen Schleichweg durch diese Gebiete nehmen. Eine Leseschaltung in der Peripherie, die den Stromfluss auswertet, käme zu einem falschen Schluss über den gespeicherten Wert. Ob dabei  $R_{OFF}$  oder  $R_{ON}$  den Wert »0« beziehungsweise »1« repräsentieren oder umgekehrt, ist übrigens nur eine Frage der Festlegung.

### Strom auf Schleichpfaden

Zur Lösung dieses Problems brachten Kollegen, die an molekülbasierten Speichern arbeiteten, bereits vor mehr als zehn Jahren nichtlineare, diodenähnliche Elemente ins Gespräch. Dioden arbeiten als elektronische Ventile, lassen Ladungsträger also nur in einer Richtung passieren. In Serie mit jeder Speicherzelle geschaltet, würden sie Schleichwege unterbrechen, denn der Strom fließt bei seinem Umweg einmal in einer Richtung durch die Zelle und einmal in der Gegenrichtung. Solche Bauelemente könnten aus Halbleitern oder ebenfalls aus Metalloxiden als Dünnschicht direkt auf die Memristoren aufgebaut werden. Doch bei einem Auslestrom von einem Mikroampere für den ON-Zustand und ei-

ner Zellengröße von 20 Nanometer Kantenlänge wäre die Stromdichte zu hoch für die gängigen Materialien; lediglich Dioden aus kristallinem Silizium funktionieren bis 0,25 Megaampere pro Quadratzentimeter verlässlich.

2010 konnten wir zeigen, dass es noch einen anderen Weg gibt, Stromschleichpfade zu verhindern: das Verschalten zweier memristiver Speicherzellen zu einem komplementären resistiven Schalter (CRS, *Complementary Resistive Switch*). Ein solcher CRS-Schalter hat vier mögliche Konfigurationen. Bei zweien nehmen die beiden Speicherzellen verschiedene Zustände ein (also  $R_{ON}$  die eine,  $R_{OFF}$  die andere), bei den beiden anderen stimmen die Zustände überein (beide sind entweder  $R_{ON}$  oder  $R_{OFF}$ ). Definiert man nun die ersten beiden als Repräsentanten der binären Werte »0« beziehungsweise »1«, ist man ein gutes Stück weiter. Denn nun zeigt die Gesamtzelle nach außen auf jeden Fall einen hohen elektrischen Widerstand und kann deshalb nicht Teil eines parasitären Strompfads werden.

Bei diesem Konzept kommt der Lesespannung eine aktive Rolle zu: Sie muss höher sein als bislang und beide Speicherzellen in einen Zustand »all-ON« überführen, falls der Speicherzustand »1« vorlag; im anderen Fall verbleibt der CRS-Schalter im Zustand »0«. Im ersten Fall ist der Gesamtwiderstand gering, und es fließt ein hoher Strom, der von der Peripherieschaltung detektiert werden kann. Schaltungstechnisch lässt es sich überdies erreichen, dass nur der adressierte CRS-Schalter die volle Lesespannung »sieht«, alle an-

deren ein Drittel davon. Zwar wird die gespeicherte Information bei diesem Vorgang zerstört und muss wieder eingeschrieben werden. Das ist allerdings gängige Technik – bei DRAM-Speichern entlädt das Lesen einen Kondensator und löscht so den abgelegten Wert. Mit Computermodellen konnten wir zeigen, dass sich mit CRS-Zellen passive Arrays von sage und schreibe 100 000 mal 100 000 Elementen erreichen lassen, von denen dann unzählige auf einem Quadratzentimeter eines Chips untergebracht werden könnten.

Mehr noch, Memristoren können unseres Erachtens dem Transistor auch auf seinem ureigensten Feld Konkurrenz machen: der Logik-Schaltung. Der Vorteil läge in der Kombination von Arbeitsspeicher und eigentlicher Recheneinheit, die normalerweise in den Computerprozessoren räumlich voneinander getrennt sind. Allein die notwendige Kommunikation zwischen diesen beiden Komponenten verbraucht enorm viel elektrische Energie und Rechenzeit. Schon seit mehreren Jahren wird unter Experten wie der Gruppe um Williams und auch der Gruppe des Physikers Konstantin Likharev von der Stony Brooks University im US-Bundesstaat New York die Idee diskutiert, die Logiktablette, die zum Beispiel die Funktion eines Addierers beschreibt, durch ON- beziehungsweise OFF-Setzen memristiver Schalter nachzubilden. Eine große Zahl solcher Arrays könnte dann sowohl Informationen speichern als auch diese lokal verarbeiten. Mit einer solchen Rechnerarchitektur ließen sich zudem verschiedene, voneinander unabhängige informationsverarbeitende Schritte gleichzeitig abarbeiten (parallelisieren) und so der Gesamtprozess beschleunigen. Darüber hinaus sind defekttolerante Architekturen denkbar: Fiele ein Array aus, würde sich der Prozessor neu konfigurieren und es künftig übergehen.

### Neuronale Netze aus Memristoren

Bislang blieben alle Konzepte der Grundidee digitaler Datenverarbeitung verhaftet, ausschließlich mit den Zuständen »0« und »1« zu arbeiten. Mit memristiven Zellen ließen sich aber auch Zwischenzustände des Widerstands nutzen, etwa für künstliche neuronale Netze. Wie beim natürlichen Vorbild erfolgt das Lernen von Zusammenhängen in diesen Architekturen über die Stärkung oder Schwächung von synaptischen Verbindungen, den so genannten Gewichten. Um dieses »Gedächtnis« neuronaler Netze technisch mit herkömmlicher Halbleitertechnologie zu realisieren, ist ein hoher Aufwand erforderlich. Mit Memristorzellen aber könnte man synaptische Verbindungen direkt aufbauen; angeordnet in Arrays ließen sich bis zu  $10^4$  synaptische Kontakte eines lebenden Neurons nachbilden. Aktive Bauelemente wie Transistoren wären freilich weiterhin in der Peripherie erforderlich.

Noch sind viele Details der Memristoren unverstanden. Welches Übergangsmetalloxid und welcher Kristalldefekt werden sich als ideal herausstellen? Wie soll man Metallkontakte zu den Bauelementen ausführen, deren Strukturen kleiner als zehn Nanometer sind? Wie wird man solche Prozessoren programmieren? Inzwischen arbeiten weltweit gut 25 Forschungsgruppen an der Beantwortung dieser Fragen.

Nur durch interdisziplinäre Kooperation von Chemikern, Physikern, Ingenieuren und Informatikern werden sie sich klären lassen. Zwar wurden inzwischen noch andere Möglichkeiten entwickelt, ein hysteretisches Widerstandsschalten zu realisieren. Beispielsweise basieren so genannte Spin-Torque-Transfer-Speicher auf dem Magnetischen Tunnelwiderstand. Das ist ein quantenmechanischer Effekt, der einen Elektronenfluss zwischen zwei eigentlich gegeneinander isolierten Ferromagneten ermöglicht. Doch die auf Redoxprozessen in Übergangsmetalloxiden basierenden memristiven Schalter sind nicht leicht zu übertrumpfen: Bei einem Flächenbedarf von nur ein bis zwei Nanometer Durchmesser eröffnen sie der Elektronik Möglichkeiten, von denen wir heute nur träumen können. ∞

### DIE AUTOREN



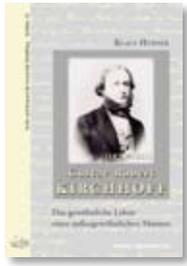
**Rainer Waser** (links) ist Professor an der RWTH Aachen und Direktor am Peter-Grünberg-Institut des Forschungszentrums Jülich. Der Mitbegründer der Sektion Fundamentals of Future Information Technology der Jülich Aachen Research Alliance (JARA) forscht zu Fragen der Physik und Chemie elektronischer Materialien auf der Nanoskala. Die Koautoren sind Mitglieder seiner Arbeitsgruppe. **Eike Linn**, Doktorand der RWTH Aachen, hatte die Idee zum CRS-Konzept. **Regina Dittmann** vom Forschungszentrum Jülich ist Expertin für heteroepitaktische Oxide und redoxbasiertes Schalten oxidischer Schichten. Ihr Kollege **Kristof Szot** (rechts), der an der Universität Katowitz in Polen Physik lehrt, ist Experte für Oberflächenphysik und ausgedehnte Kristalldefekte in Oxiden. Er hat erstmals das redoxbasierte, memristive Schalten an Ausgängen von Versetzungen nachgewiesen.

### QUELLEN

**Chua, L., Kang, S.M.:** Memristive Devices and Systems. In: Proceedings of the IEEE 64, S. 209–223, 1976  
**Lee, J. H., Likharev, K.:** CMOL CrossNet as Pattern Classifiers. In: Computational Intelligence and Bioinspired Systems, Lecture Notes in Computer Science. Springer, Berlin, Heidelberg, 2005, S. 446–454  
**Strukov, D.B. et al.:** The Missing Memristor Found. In: Nature 453, S. 80–83, 2008  
**Szot, K. et al.:** Switching the Electrical Resistance of Individual Dislocations in Single-Crystalline SrTiO<sub>3</sub>. In: Nature Materials 5, S. 312–320, 2006  
**Waser, R. (Hg.):** Nanoelectronics and Information Technology. Wiley-VCH, 2. Auflage, Weinheim 2005

### WEBLINKS

<http://webcast.berkeley.edu/>  
 Am 21.11.2008 fand an der University of California, Berkeley, ein Symposium zum Thema »Memristoren und memristive Systeme« statt. Unter »Events« finden Sie spannende Videomitschnitte von Vorträgen.  
[www.emrl.de/pu\\_crs.html](http://www.emrl.de/pu_crs.html)  
 Website des Electronic Materials Research Laboratory der Autoren mit weiteren Informationen zu komplementären resistiven Schaltern (CRS)



Klaus Hübner  
**Gustav Robert Kirchhoff**  
*Das gewöhnliche Leben  
 eines außergewöhnlichen Mannes*  
 regionalkultur, Ubstadt-Weiher 2010.  
 312 S., € 24,80

WISSENSCHAFTSGESCHICHTE

## Gewöhnlich und außergewöhnlich

Gustav Robert Kirchhoff, der Physikpionier des 19. Jahrhunderts, erhält endlich eine tiefgründige Biografie.

Wer das Foyer des Kirchhoff-Instituts der Heidelberger Universität betritt, kann das Wandrelief mit dem Bild des Namensgebers kaum verfehlen. Auch in Heidelbergs Hauptstraße weist eine Tafel am Haus Nr. 52 auf den Begründer der Spektralanalyse hin. Physikstudenten begegnen dem Namen Gustav Robert Kirchhoff spätestens bei den nach ihm benannten Gesetzen, mit denen sich Ströme, Spannungen und Widerstände in elektrischen Schaltungen ausrechnen lassen – eine angenehme, da einfache und schlüssige Einführung in die Elektrizitätslehre.

Selbst unter Physikern ist schon fast vergessen, dass Kirchhoff (1824–1887) zusammen mit seinem Kollegen Robert Bunsen (1811–1899) aus der Chemie die Elemente Zäsium und Rubidium ent-

deckt hat – mit Hilfe der Spektralanalyse. Diese Untersuchungen halfen, die rätselhaften Fraunhoferlinien im Licht zum Beispiel der Sterne zu verstehen, und lieferten damit das zentrale Arbeitsmittel der modernen Astronomie.

Das Strahlungsgesetz, das Kirchhoff 1859 in Heidelberg aufstellte, beschreibt die Absorption und Emission elektromagnetischer Wellen durch alle Körper. Von dort war es nicht mehr weit zum Konzept des »Schwarzen Körpers«. Die Arbeit an diesem idealisierten Objekt, das alle Strahlung verschluckt, aber nichts von sich gibt, führte letztlich Max Planck (1856–1947) am Ende des Jahrhunderts zur Quantentheorie. Die moderne Physik war eröffnet.

Dass über solch einen Giganten der Physik des 19. Jahrhunderts erst jetzt eine ordentliche Biografie vorgelegt

wird, ist erstaunlich. Klaus Hübner, selbst emeritiertes Mitglied des Kirchhoff-Instituts, fand für sein Werk »außerordentlich günstige Umstände« vor. Im Geheimen Preußischen Staatsarchiv wurden nämlich die Akten über Kirchhoffs Zeiten in Berlin, Königsberg und Breslau akribisch gesammelt und sind durch alle Zeitwirren hindurch weitgehend erhalten geblieben.

Äußerst kundig und stellenweise unterhaltsam geschrieben, wirft Hübners Werk einen Blick auf Herkunft, Familie und Persönlichkeit seines Helden, auf den Studenten, Briefeschreiber, Hochschullehrer, Redner. Hübner spricht vom »gewöhnlichen Leben eines außergewöhnlichen Mannes«: Es gab wissenschaftlich wie privat die zeitüblichen Höhen und Tiefen, aber Kirchhoffs Leben enthält keine Sensationen – abgesehen davon, dass er einer der größten Physiker seiner Zeit war.

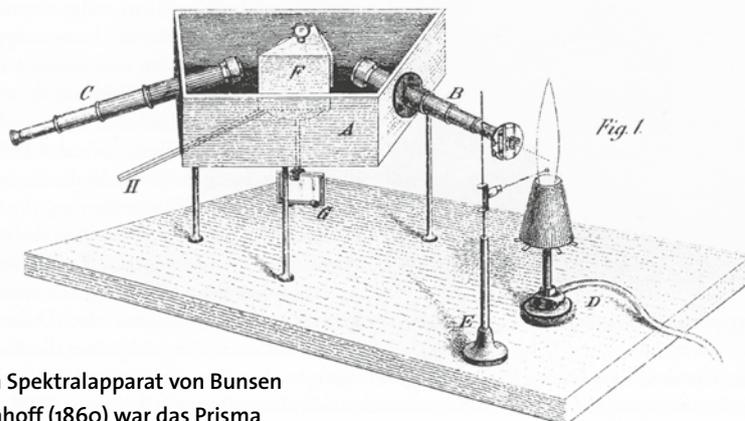
Kirchhoff hat in seinem Leben rund 60 Publikationen vorgelegt, die Hälfte davon über rein mathematische Untersuchungen, die anderen über seine Experimente. Für heutige Verhältnisse ist das eine eher magere Liste. Aber welcher Zeitgenosse könnte sich rühmen, mit so wenig Papier eine derartige Nachwirkung erzielt zu haben!

Was in Hübners Biografie deutlich hervortritt, ist der Mensch Kirchhoff: freundlich und bescheiden. So schreibt der Physiker 1878 im schönsten Sütterlin an eine Autogrammjägerin (ja, das gab es schon damals): »Verehrtes Fräulein, Sie wünschten einige Zeilen von meiner Hand zu erhalten ...« Zugleich war er visionär in fast allem, was er anpackte. Die Auswirkungen von Kirchhoffs Arbeiten spüren wir bis heute.

Nicht nur Physikstudenten und angehende Wissenschaftshistoriker sollten dieses eindrucksvolle Werk lesen, sondern auch jeder, der verstehen will, auf welchen Fundamenten die Physik des 20. Jahrhunderts aufbaut.

**Reinhard Breuer**

Der Rezensent ist habilitierter Physiker und entwickelt nach dem Ende seiner Tätigkeit als Chefredakteur neue Produkte für »Spektrum der Wissenschaft«.



Im ersten Spektralapparat von Bunsen und Kirchhoff (1860) war das Prisma hohl und mit Schwefelkohlenstoff gefüllt.



Bruno P. Kremer  
**Essbare & giftige Wildpflanzen**  
Über 200 Kräuter, Beeren und Nüsse  
Eugen Ulmer, Stuttgart 2010. 192 S., € 9,90

BOTANIK

## Hebt die grünen Bodenschätze!

Ein Bestimmungs- und Kochbuch ebnet den Weg zurück zur Natur – zumindest wenn es ums Essen geht.

Täglich Salat essen ist gesund; aber ist das auf Dauer nicht ein wenig eintönig? Nicht notwendig, sagt Bruno P. Kremer, Professor für Biologiedidaktik in Köln. Wie wäre es zur Abwechslung mal mit einem »jungen Wilden« in der Schüssel? Wiesenkerbel, Wegwarte und Wegerich bereichern den häuslichen Speiseplan ungemein – nur sind sie im lokalen Supermarkt nicht zu finden. Auch zahlreiche andere Schätze aus der Speisekammer der Natur warten darauf, entdeckt zu werden.

Kremer bringt dem Naturgourmet nicht nur die »über 200 Kräuter, Beeren und Nüsse« aus dem Untertitel nahe, sondern schreckt auch vor Algen nicht zurück. Jede der ausgewählten Arten stellt er in einem kleinen Textporträt nebst Foto vor. Zusätzlich finden Sammler eine Legende, die kurz und bündig über genießbarkeit, Zubereitungsart und Erntezeit informiert. Neben einer knappen botanischen Merkmalsbeschreibung und Hinweisen zum Standort gibt der Autor an passenden Stellen zusätzliche Detailinformationen: wie man aus den Samen des Ackersenfs (*Sinapis arvensis*) Senf herstellt, dass die schwarze Johannisbeere (*Ribes nigrum*) bereits seit dem 16. Jahrhundert kultiviert wird, wie der Frost die Gerbstoffe der Schlehe neutralisiert und mit welchen giftigen Doppelgängern man gewisse Pflänzchen verwechseln kann. Basisrezepte für Kräuteröle oder Konfitüren, eine Anleitung zum naturverträglichen Sammelverhalten

und die Nummer des Giftnotrufs finden sich bereits auf den ersten Seiten.

»Gaumenfreude oder Giftbeere« heißt es auf dem Buchdeckel. Doch gerade weil es so viele gefährliche Verwechslungsmöglichkeiten gibt, wäre eine zusammenfassende Übersicht hilfreich gewesen. Die Abgrenzung der Einstufungen »ungenießbar«, »giftig« und »schwach giftig« bleibt bis zum Ende ein wenig diffus. Und was sagt mir die Auskunft »giftverdächtig«, wenn ich ge-

rade meinem Kind die letzte der gegaschten Beeren aus dem Mund geklaubt habe?

Trotz dieser Kritik: Der Naturführer im Taschenbuchformat besticht nicht nur durch handliche Größe und geringes Gewicht, sondern auch durch seine Übersichtlichkeit. Dazu trägt der Farbkode bei, nach dem alle Frucht- und Blütenfarben – ob gut oder giftig – sortiert sind. Die informativen Einschlagseiten der Klappbroschüre enthalten in Kurzform die unentbehrlichen Begriffs- und Zeichenerklärungen. Eine Top-Ten-Liste der genießbaren Wildkräuter und -früchte und der nach dem Jahreslauf sortierte Sammelkalender ausgewählter Arten runden das Buch ab.

Tipps und Rezepte für ausgefallene Kreationen wie Likör aus Buchenblättern oder Maronenhonig regen die Kreativität an und bescheren sicher den ein oder anderen ungewöhnlichen Genuss.

**Nicole Wedemeyer**

Die Rezensentin hat Biologie und Landwirtschaft studiert und arbeitet als freie Wissenschaftsjournalistin in Malente-Malkwitz (Ostholstein).



Die Vogel-Kirsche *Prunus avium* ist so bekömmlich wie die Süßkirsche, ...



... aber die Alpen-Heckenkirsche *Lonicera alpigena* ist giftig: Verwechslungsgefahr!



### Geo-Engineering

Notwendiger Plan B gegen den Klimawandel?

politische ökologie, Band 120

oekom, München 2010. 72 S., € 14,90

#### GLOBALE ERWÄRMUNG

## Kritik der Klimatechnik

Großtechnische Ideen wie ein Sonnenschirm für die ganze Erde und das Wegschließen des Kohlendioxids bergen Chancen, Risiken – und reichlich Futter für politischen Streit.

Die Klimaverhandlungen auf UNO-Ebene stecken fest. Ein neues globales Abkommen zur Verringerung des Treibhausgasausstoßes ist derzeit nicht in Sicht, während die Emissionen weiter wachsen. Darum werden immer häufiger Alternativen zu einer globalen politischen Einigung erwogen. Dazu zählt vor allem die forcierte Nutzung erneuerbarer Energiequellen, aber auch das »Geo-Engineering«.

So nennt man technische Maßnahmen, die der globalen Erwärmung entgegenwirken, ohne die Emissionen zu senken. Am bekanntesten ist die Idee, schwefelhaltige Partikel in der Stratosphäre zu versprühen, um das auf den Erdboden einfallende Sonnenlicht abzuschwächen. In die Kategorie Geo-Engineering gehört auch die Speicherung von Kohlendioxid im Meer oder im Untergrund (*carbon capture and storage*, CCS, siehe Spektrum der Wissenschaft Spezial 1/2007 »Energie und Klima«, S. 14 sowie den Artikel »Große Wäsche für das Klima« in diesem Heft ab S. 70).

Solchen Methoden zur Klimamanipulation hat das fünfmal im Jahr erscheinende Magazin »politische ökologie« im Juli 2010 einen Themenschwerpunkt gewidmet. 13 Autoren, vorwiegend Wissenschaftler, dokumentieren darin die Machbarkeit der Methoden, beschreiben Folgen für Umwelt und Wirtschaft und berichten

über ethische und politische Implikationen.

Einen sachlichen Überblick über die zahlreichen Vorschläge liefern Andreas Oschlies vom Leibniz-Institut für Meereswissenschaften an der Universität Kiel und Ulrike Lohmann von der ETH Zürich. Oschlies berichtet über Pläne, das Klimagas Kohlendioxid im Boden oder im Ozean zu speichern oder durch Aufforstung oder mit Hilfe künstlicher Gasfilter aus der Atmosphäre zu schaffen. Lohmann stellt Methoden vor, das Reflexionsvermögen der Erde zu erhöhen, von besagtem Schwefelschirm über die künstliche Erzeugung von Wolken und das Weißen von Hausdächern bis zur Installation von Sonnenlicht-Reflektoren im All.

### Vorsicht: Nebenwirkungen

Alle Methoden des Geo-Engineerings haben Nebenwirkungen. Eine unbedachte Aufforstung kann Oschlies zufolge Wassermangel und ökologische Störungen verursachen. Schwefelsäure in der Stratosphäre greift die Ozonschicht an. Die CO<sub>2</sub>-Speicherung im Untergrund, die im Heft unerklärlicherweise zu kurz kommt, ist auch nicht frei von Risiken, bietet aber zwei große Vorteile: Das CO<sub>2</sub> im Boden kommt nicht mehr ins Meerwasser und kann daher dessen Alkalinität nicht vermindern; und wenn man die Speicherung unterbricht, hat das keine unmittelbaren Fol-

gen. Dagegen würde ein plötzliches Aussetzen des Schwefelschirms bei immer noch erhöhter Kohlendioxidkonzentration zu einer rasanten Erwärmung führen – mit ungewissen Folgen, schreibt Lohmann.

Vorsicht und Transparenz sind also angesagt. Im Oktober 2010 beschlossen die Vertreter von mehr als 190 Nationen auf der UN-Konferenz zur Biodiversität in Nagoya, Geo-Engineering solle so lange untersagt werden, bis es eine angemessene wissenschaftliche Basis für eine Risikoabschätzung gibt. Weil schon die Erkundung des Geo-Engineerings heikel ist, haben Wissenschaftler im Frühling 2010 auf einer Konferenz in Asilomar (Kalifornien) Regeln dafür vereinbart. Davon berichtet Ulrike Potzel, die Generalsekretärin einer internationalen Expertengruppe zum Erhalt des Erdsystems (IESP) in München. Die Fachleute wollen eng mit der Öffentlichkeit kooperieren, Experimente unabhängig prüfen lassen und die Ergebnisse rasch publizieren.

Völlig unklar ist derzeit, wie ein rechtlicher Rahmen für die Anwendung der Maßnahmen zur Klimamanipulation aussehen könnte. Ralph Bodle und Andreas Kraemer vom Ecologic Institut, einem privaten »Think Tank« in Berlin, empfehlen, die internationale Konvention zur Umweltmodifikation (ENMOD) von 1977, die militärische oder sonstige feindliche Veränderungen von Umweltbedingungen verhindern soll, auf das Geo-Engineering auszuweiten. Regierungen könnten dann künftig beim UN-Sicherheitsrat Protest einlegen, wenn ein riskanter Eingriff des Geo-Engineerings gegen die erweiterte ENMOD verstößt. Noch ist so ein Regelwerk allerdings Zukunftsmusik.

Neben vielen konstruktiven Beiträgen sind einzelne Artikel des Hefts etwas propagandistisch geraten. So werden in den ersten beiden Texten die bisherigen Folgen der globalen Erwärmung kräftig überzeichnet und der dänische Politologe und Buchautor Bjørn Lomborg unfair aufs Korn genommen. Anders als im Magazin behauptet, hat er sich nie an Diffamierungskampagnen gegen Klimaforscher beteiligt.

# Viel Asche

Auch die konkrete Forschung im Bereich Geo-Engineering wird einseitig dargestellt. Das zeigt sich an dem Experiment Lohafex: Im Jahr 2009 testete ein deutsch-indisches Forscherteam, ob Algen auf eine Eisendüngung mit erhöhter CO<sub>2</sub>-Aufnahme reagieren und ob das zur Speicherung des Gases im Meer führt. Kaum war der Versuch im Südatlantik gestartet, brach die kanadische Umweltorganisation ETC Group auf Grund ökologischer Bedenken eine Kampagne dagegen vom Zaun. So weit ist das auch im Heft zu lesen.

Aus einem Interview mit dem ETC-Geschäftsführer Pat Mooney geht außerdem hervor, dass dieser das Geo-Engineering und seine Erforschung vehement bekämpft. Verschwiegen wird aber, wie überzogen die ETC-Kampagne war. Die Eisenkonzentrationen im Meer lagen bei Lohafex unterhalb natürlich vorkommender Werte. Außerdem ging es den Wissenschaftlern nicht in erster Linie um das Geo-Engineering, sondern um den Kohlenstoffkreislauf: Den wollten sie genauer untersuchen, um das Klima der Vergangenheit zu enträtseln.

Gelingt es, diese tendenziösen Passagen zu ignorieren, dann kann die Artikelsammlung in »Politische Ökologie« als annehmbare, wenn auch lückenhafte Einführung in das heikle Thema Geo-Engineering gelten. Die meisten Autoren des Themenschwerpunkts ziehen das Fazit, Geo-Engineering sei zwar hochriskant und umstritten, solle aber durchaus erforscht werden – und sei es nur, um für den schlimmsten Fall einen Klima-Notnagel parat zu haben. Man dürfe sich dadurch allerdings nicht vom Ziel der Verringerung der Treibhausgasemissionen ablenken lassen.

## Sven Titz

Der Rezensent ist promovierter Meteorologe und freier Journalist in Berlin.

Alle rezensierten Bücher können Sie in unserem Science-Shop bestellen

direkt bei: [www.science-shop.de](http://www.science-shop.de)  
per E-Mail: [shop@wissenschaft-online.de](mailto:shop@wissenschaft-online.de)  
telefonisch: 06221 9126-841  
per Fax: 06221 9126-869



# Wenig Asche



## Das Jahr in Bildern und Geschichten.

- Vulkan in Island sorgt wochenlang für Chaos im Flugverkehr.
- Griechenland am Rande des Staatsbankrotts.

Für 6,80 Euro im Handel.

Jetzt im Handel oder direkt bestellen:  
Telefon 040 3007-4888 oder  
[www.spiegel.de/shop](http://www.spiegel.de/shop)



Thomas de Padova

**Schlau nach acht**

Wissen für den Feierabend

Piper, München 2010. 192 S., € 8,95

Warum schnurren Katzen, zerfällt Bierschaum, bildet Öl einen Teppich? Rund 100 überwiegend alltagsnahe Fragen wie diese versucht Thomas de Padova in dem Buch zu beantworten, das auf Texten seiner Kolumne »Aha« im »Tagesspiegel« basiert. Das Problem: Die meisten Fragen ließen sich gut in ein, zwei Sätzen erledigen; stattdessen serviert de Padova auf jeweils ein, zwei Seiten mehr oder weniger interessante Zusatzinformationen zum Thema, in denen zuweilen die eigentliche Antwort untergeht. Und bei manchen Fragen – etwa jener, wie ein Ohrwurm entsteht – redet der Autor auch um den heißen Brei herum. Trotzdem ist es unterhaltsam, in dem Buch zu blättern und nebenbei vielleicht diese oder jene Lücke in der eigenen Allgemeinbildung zu schließen. Zum gezielten Nachschlagen ist es weniger geeignet, schon weil ein Stichwortverzeichnis fehlt. HARTWIG HANSER



Mick O'Hare (Hg.)

**Wie lange eine Kokosnuss braucht, um aus der Karibik nach Europa zu schwimmen**  
und 101 neue Erkenntnisse aus der wunderbaren Welt der Wissenschaft

Aus dem Englischen von Birgit Brandau.

Fischer Taschenbuch, Frankfurt am Main 2010. 256 S., € 8,95

Angenommen, Sie sind Auftragskiller und müssen damit rechnen, am Tatort eigene Blutspuren zu hinterlassen. Sollten Sie vorher eine vollständige Bluttransfusion an sich durchführen lassen, um die Ermittler beim DNA-Test in die Irre zu führen? Vergebliche Liebesmüh! Bei einem solchen Austausch werden nämlich nur rote Blutkörperchen übertragen, und die enthalten keine Erbsubstanz. – Kann ich mit dem Triebwerk eines Spaceshuttles die Erdrotation auf null abbremsen? Im Prinzip ja, aber es würde ungefähr 840 Milliarden Jahre dauern. Das amüsante Büchlein präsentiert eine Auswahl der oftmals skurrilen Fragen, die von Lesern des englischen Magazins »New Scientist« allwöchentlich gestellt und von anderen Lesern ernst genommen und wissenschaftlich beantwortet werden. »Falls ich gezwungen würde, mich von meinem eigenen Körper zu ernähren, was sollte ich essen?« gehört ebenso dazu wie die Frage, ob sich Eisbären mit ihrem Einzelgängerdasein nicht gelegentlich einsam fühlen oder warum es eigentlich so schlimm ist, wenn die Flüsse Indiens infolge der Klimaerwärmung nicht mehr durch abschmelzende Gletscher, sondern nur noch durch Regenwasser gespeist würden. Insgesamt: lehrreich und ein großer Spaß. KLAUS-DIETER LINSMEIER



Harald Lesch

**Der Außerirdische ist auch nur ein Mensch**

Unerhört wissenschaftliche Erklärungen

Knaus, München 2010. 224 S., € 19,95

Wie bringt man die Wissenschaft unters Volk? Richtig, mit Humor. Na dann mal los. Kennen Sie den schon: »Treffen sich zwei Planeten ...«? Wussten Sie, dass Goethe es »ja irgendwie mit dem Mond« hatte? Dass »Zack! Und auf sie mit Gebrüll« eine beliebte Strategie menschlicher Immunsysteme ist? Dass Sex mit Außerirdischen problematisch sein könnte, zumal man schließlich auch gar nicht weiß, wie es um deren Libido bestellt ist? In seinem jüngsten Bändchen will der ansonsten zu Recht geschätzte TV-Wissenschaftsmoderator Harald Lesch dem Humor den ihm »gebührenden Platz bei der Verbreitung wissenschaftlicher Erkenntnisse« verschaffen, kommt aber über freies Schwadronieren kaum hinaus. Einen Notausgang bietet das Kapitel über Entropie: »Denken Sie jetzt nicht weiter darüber nach, trinken Sie lieber Ihr Bier leer. Prost.« THILO KÖRKEL



Bernhard Weingartner  
**Physik macht Urlaub**  
Rätselhafte Phänomene  
und spannende Experimente auf Reisen  
Carl Ueberreuter, Wien 2010. 207 S., € 19,95

PHYSIK

## Stau im Ameisenhügel und Kunst in der Bratpfanne

Ein Ingenieur und Straßenkünstler erzählt Spannendes  
und Überraschendes aus der Welt der Physik.

**B**ernhard Weingartner organisiert neben seiner Forschungstätigkeit als Ingenieur an der TU Wien Shows auf der Straße: mit einem umgebauten Lastenfahrzeug namens »Physikmobil«. Wer sein Buch liest, könnte Lust bekommen, das auch einmal zu versuchen – oder zumindest seine Kinder zu Hause oder im Urlaub mit Experimenten zu unterhalten. Dieses Buch nimmt die Leser mit auf eine Reise der besonderen Art. Es lädt sie dazu ein, genau hinzuschauen und dabei allerorts spannende physikalische Phänomene zu entdecken.

Der Schreibstil ist flüssig und gut verständlich; die Erklärungen kommen größtenteils ohne Fachbegriffe aus und sind mit humorvollen Beispielen und Anwendungen gespickt. Wir erfahren, wie eine alte Socke und eine Flasche Wasser einen Kühlschrank ersetzen können: Stecken Sie die zu kühlenden Lebensmittel in die Socke. Stechen Sie je ein kleines Loch in den Deckel und den Boden einer wassergefüllten Plastikflasche und hängen Sie diese kopfüber über die Öffnung der Socke, so dass alle paar Sekunden ein Wassertropfen hineinfällt. Wind und Verdunstungskühlung tun dann das Übrige – das Bier bleibt schön kühl.

Die Erklärungen werden durch liebevoll gezeichnete Comics aufgelockert. Experimente laden zum Ausprobieren ein. Sie sind nicht so zahlreich, wie es der Umschlagtext verspricht, dafür

meist ungewöhnlich und dennoch leicht nachzumachen. Nur der »Feuertornado«, mit dem man einen meterhohen Wirbel aus brennendem Benzin erzeugt, ist etwas mühsamer herzustellen (und absolut nicht für Kinder geeignet), aber dafür umso eindrucksvoller.

Fünf Reiseziele – Strand, Wüste, schneebedeckte Berge, unberührte Natur und Städte – dienen dem Autor als Aufhänger für verschiedene Physikspiele. So erklärt er im Kapitel »Städte-trip«, warum es unter Ameisen keine Staus gibt. Im Gegensatz zu Menschen überholen sich diese Insekten nicht gegenseitig, und sie gleichen ihre Geschwindigkeit dem Vordermann an. Abgesehen davon ziehen Ameisenzusammenstöße keine besonders gravierenden Folgen nach sich.

Im Kapitel »Trekkingtour« geht es um allerlei Naturphänomene, wie Gewitter und die Schwarmintelligenz von Glühwürmchen. Außerdem gibt es eine Anleitung zum Bau eines speziellen Bumerangs. Das Ergebnis (Spektrum der Wissenschaft 8/2001, S. 96) sieht zwar nicht wie ein herkömmlicher Bumerang aus, funktioniert aber gut.

Interessierte werden einige Standardfragen wiedererkennen, wie »Warum ist der Himmel blau?«. In einzelnen Fällen wie diesem fällt die physikalische Genauigkeit der Anschaulichkeit zum Opfer. »Rot ist ein langwelliges

Licht. Wie ein Riesentorläufer schlängelt es sich zwischen den Staubteilchen durch« vermittelt ein einprägsames, aber nicht ganz richtiges Bild.

Einige Begriffe ziehen sich durch alle Kapitel. So begegnet uns die Selbstorganisation in den unterschiedlichsten Zusammenhängen: Sanddünen, Schneeflocken, Strömungsmuster, Glühwürmchen ... (Spektrum der Wissenschaft 2/1994, S. 74). Immer wieder schlägt der Autor thematische Haken zu Experimenten in der Schwerelosigkeit.

Das Buch dringt in ungewöhnliche Bereiche vor, gibt Einblicke in die Arbeit von Forschern und zeigt auch Grenzen des heutigen Wissens auf. Wer hätte gedacht, dass man noch nicht genau weiß, wie Schier über Schnee gleiten, oder dass es sich bei der Herstellung und Funktionsweise von Schiwachs um eine Art Geheimwissenschaft handelt? Bei diesen und anderen Themen würde man sich Quellenangaben zum Weiterlesen wünschen, doch die fehlen leider.

Kurzum: Das Buch eignet sich für Interessierte mit oder ohne Vorkenntnisse, seien es neugierige Jugendliche, Lehrer oder Eltern, die ihren Kindern spannende Phänomene nahebringen wollen.

**Manuela Kuhar**

Die Rezensentin ist Physikerin und freie Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg.





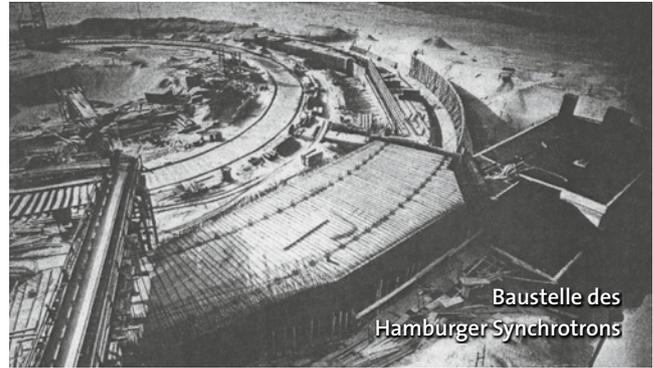
### Alte Maßeinheiten neu definiert

»Auf der 11. Generalkonferenz der internationalen Konvention für Maße und Gewichte erhielt das Meter, als der vierzigmillionste Teil des Erdumfangs, eine neue Definition.

Als neues Grundmaß wurde der Wert von 1650 763,73 Wellenlängen der orangefarbenen Strahlung des Edelgases Krypton 86 festgelegt. Auf der gleichen Konferenz wurde der Begriff der Sekunde neu definiert. Bisher war die Sekunde der 86400. Teil eines durchschnittlichen Sonnentages. Jetzt wurde sie als der 31556 925,974. Teil des Sonnenjahres 1900 festgelegt.« *Naturwissenschaftliche Rundschau*, Januar 1961, S. 32

### Geburt einer Disziplin: Bionik

»In Dayton im amerikanischen Staat Ohio fand kürzlich der erste Kongreß für Bionik statt. Die neue Wissenschaft setzt sich, wie schon der Name erraten läßt, aus den Wissensgebieten der BIOlogie und der ElektroNIK zusammen. Ihr Ziel ist die Schaffung biologischer Maschinen und Systeme von Menschenhand, aber nach dem Vorbild der lebenden Natur. Eines der Hauptprobleme ist der Versuch, das Neuron nachzubauen, das zu den wesentlichsten Zellen des Nervensystems gehört.« *Elektronik*, Januar 1961, S. 2



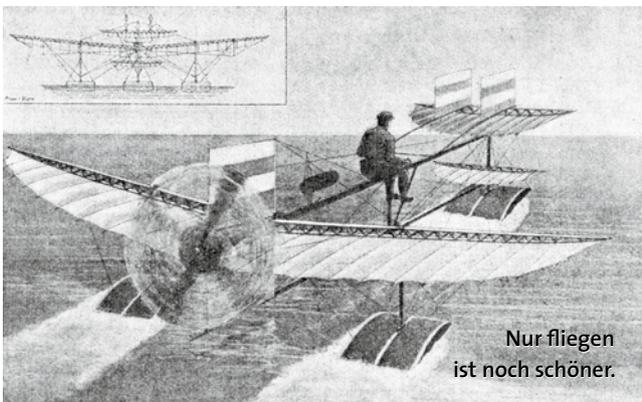
Baustelle des Hamburger Synchrotrons

### CERNs Großvater

»Noch fast im Stadtgebiet Hamburgs wächst Europas größter Elektronenbeschleuniger heran. Ein Gerät vergleichbaren Ausmaßes ist nur noch in Cambridge in den USA im Bau und wird auch kaum viel früher fertiggestellt sein als das Hamburger Synchrotron, das bis 1963 in Betrieb genommen werden soll. Das Synchrotron soll Elektronen auf eine Energie von 6 GeV (6 Giga-Elektronenvolt = 6 Milliarden Elektronenvolt) beschleunigen und später sogar auf 7½ GeV ausbaufähig sein. Dieser Wert erscheint zwar bescheiden im Vergleich mit den 28 GeV, welche die Protonen des Genfer Riesensynchrotrons erreichen. Man muß indessen bedenken, daß es viel schwieriger ist, Elektronen auf so hohe Energie zu bringen als Protonen.« *Kosmos* 1, Januar 1961, S. 39

### Das Meer als Flugplatz

»Der Hydro-Aeroplan von Fabre ist mit Schwimmkielen ausgerüstet, die so konstruiert sind, daß der Apparat sich von dem Wasserspiegel erheben und sich wieder auf denselben herunterlassen kann. Da jede Schwimmfläche aus einer ununterbrochenen Fläche hergestellt ist, besitzt sie eine Form, welche der Luft nur geringen Widerstand bietet. Die Form der Schwimmfläche, welche unten eben und oben zylindrisch ist, hat den Vorteil, wie eine Hydroplanfläche zu wirken, selbst wenn die Schwimmfläche vollständig eingetaucht ist.« *Zeitschrift für praktischen Maschinenbau*, 4. Januar 1911, S. 26–27



### Brille statt Monokel

»Erst in unsern Tagen hat sich allmählich die Überzeugung Bahn gebrochen, daß das Gläsertragen eine Notwendigkeit ist. Die bei vielen Bemonokelten bemerkbare, krampfartige Gesichtsverzerrung, der gläserne, durch die scharfe Krümmung des Monokels und das Aufreißen der Lider hervorgerufene Blick, vor allem die Kasten-



beschränkung des Monokels auf gewisse höhere Kreise und die Tatsache, daß mancher es nur aus Geckenhaftigkeit trägt, haben das Einglas bei dem ernsteren Teil des Publikums in Mißkredit gebracht.« *Die Umschau*, Januar 1911, S. 8–9

### Atomkraftwerk vorgedacht

»Es wäre natürlich von höchstem Interesse, zu erfahren, auf welche Weise man den in der Natur langsam vor sich gehenden Prozeß des Atomzerfalls beschleunigen könnte. Denn es ist klar, daß das scheinbar tote Atom einen ungeheuren Energievorrat darstellt. Am besten veranschaulicht die Bedeutung dieses Problems eine Berechnung, nach der der Zerfall der Kupfermenge eines Pfennigstückes gegen 13,6 Milliarden Pferdekräfte liefern würde!« *Kosmos*, Januar 1911, S. 20





DARREN BRAUN

## Hirnsteuerung per Licht

Mit Hilfe der Optogenetik können Wissenschaftler Funktionen des Nervensystems in bislang ungeahnter Detailgenauigkeit untersuchen. Die neuen Forschungsergebnisse dürften Psychiatern helfen, seelische Erkrankungen künftig gezielter zu therapieren

### Mikrochips – anno 2030

Mit einer ganzen Palette verschiedenster Ansätze wollen Entwickler den rasanten Fortschritt der letzten 40 Jahre im gleichen Tempo weitertreiben. Dazu müssen sie physikalische Grenzen der Miniaturisierung umgehen

### Steinschlag der Megaklasse

Am Oberlauf des Indus stürzen immer wieder Millionen Kubikmeter Gestein zu Tal. Doch die gigantischen Abgänge vernichten nicht nur – in der Vergangenheit ermöglichten sie oft erst die Besiedlung der engen Hochtäler



NASA/ESA UND DAS HUBBLE HERITAGE TEAM (STSCI/AURA)

### Die schwere Geburt der Sterne

Bis heute umgeben viele Rätsel die Entstehung leuchtender Himmelskörper. Am Anfang stehen Gaswolken, die immer dichter und dabei heißer werden. Aber woher kommen sie? Und was genau löst ihren Kollaps aus?



PUBLIC DOMAIN

### Nachrichten aus der Steinzeit

Mysteriöse Zeichen in alten Höhlenmalereien verraten: Schon vor mehr als 30 000 Jahren benutzten unsere Vorfahren Symbolsysteme, um Wissen zu verbreiten

#### NEWSLETTER

Möchten Sie regelmäßig über die Themen und Autoren des neuen Hefts informiert sein?

Wir halten Sie gern auf dem Laufenden: per E-Mail – und natürlich kostenlos.

Registrierung unter:

[www.spektrum.com/newsletter](http://www.spektrum.com/newsletter)