



ERDE 3.0

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

GLOBALER
KOLLAPS DURCH
HUNGERSNÖTE?

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC AMERICAN

Spektrum
DER WISSENSCHAFT
10/09
OKTOBER 2009

BIOTECHNOLOGIE

Vom Gen zum Protein –
aber mit System

FINANZKRISE

Instinktiv in
die Katastrophe

MEDIZIN

Volkskrankheit Migräne:
das verkannte Leiden

Exotische Exoplaneten

Astronomen entdecken
Trabanten an Orten, wo sie
niemand vermutet hätte

7,40 € (D/A) · 8,- € (L) · 14,- sFr.
D6179E



www.spektrum.de



Reinhard Breuer
Chefredakteur



Mehr als nur Kopfschmerz

»Migräne« ist aus dem Griechischen abgeleitet und bedeutet »halber Schädel« (*hemikranion*). Die quälenden, anfallsartigen Kopfschmerzen treten meist einseitig auf und verbinden sich mit Übelkeit, Erbrechen, Überempfindlichkeit gegen Licht und Lärm. Die oft falsch diagnostizierte und mangelhaft therapierte Migräne ist jedoch eine wahre Volksseuche. Allein in Deutschland sind rund acht Millionen Menschen davon betroffen – Frauen dreimal so häufig wie Männer. Der volkswirtschaftliche Schaden wird jährlich auf Milliarden Euro geschätzt.

In vielem unklar sind auch nach Jahrzehnten intensiver Forschung Ursachen, Auslöser, Therapie sowie Möglichkeiten zur Prophylaxe. Lange vermuteten Forscher einen gestörten Blutfluss als Quelle des Übels. Aktuelle Studien deuten jedoch auf Fehlfunktionen im Stammhirn als Migräneauslöser hin. Zwei amerikanische Mediziner berichten ab S. 50, über aktuelle Studien, die eine andere Erklärung nahelegen – mit neuen Chancen für die Therapie!

Die weltweite Finanz- und Wirtschaftskrise

ist noch keineswegs ausgestanden – auch wenn manche schon ihr Ende ausrufen. Deshalb begleitet sie uns in »Spektrum der Wissenschaft« durch diesen Herbst. In der vorliegenden Ausgabe befassen wir uns mit der Rolle der Psychologie bei ökonomischen Handlungen – ob nun Aktien-spekulationen oder Immobilienkäufe.

Psychologie? Wo doch jeder weiß, dass sich an der Börse und in den Banken lauter Profis tummeln, die ununterbrochen rationale Entscheidungen treffen? Das ist natürlich ein Witz – und es braucht nicht die aktuelle Finanzkrise oder die davor, um dies zu belegen. Die Spatzen pfeifen es von den Dächern, dass der notorische *Homo oeconomicus*, der sich stets zwingend rational

verhält, ein Hirngespinnst von Wirtschaftsmathematikern ist – zwar bequem zu modellieren, aber realitätsfern. Immerhin wenden sich jetzt auch Hirnforscher, Sozialwissenschaftler und Evolutionsbiologen dem Thema zu. Sie wollen dem *Homo realisticius* auf die Spur kommen – vor allem, wenn er in komplexen Situationen und unter großem Zeitdruck agiert – kurz vor der Krise eben.

Gerne wird jetzt die Gier angeführt, wenn Banker mit spekulativen Derivaten handeln, wechselweise Hybris oder Vermessenheit. Aber das greift zu kurz, denn es geht immer auch um Bluff und Vertrauen. Und so könnte es sein, dass übergroße Selbstsicherheit nicht nur das Machtinstrument übler Schurken (die gibt es natürlich auch), sondern vor allem ein sozialadaptierter Wesenszug des Menschen ist. In bestimmten Situationen sind leider genau diejenigen erfolgreicher, die vorher mit haltlosen Übertreibungen aufgewartet haben. Daher »favorisiert die Selektion diese Form von Vermessenheit«, wie der Harvard-Anthropologe Richard Wrangham kürzlich im »New Yorker« zitiert wurde.

Nun hat aber genau dieses Verhalten 2008 die gesamte Finanzwelt fast in den Abgrund gerissen. Warum also wurden solche gefährlichen Unarten nicht längst ausgemerzt? Zwei Dinge stehen dem entgegen: Einmal gibt es eben, so sagen Psychologen, Probleme, in die man zwar durch Selbstüberschätzung geraten ist, sie aber nur überwinden kann, indem man sogar noch dreister auftritt. Zum zweiten kann ein Einzelner meist kaum entscheiden, wann übertriebener Optimismus angebracht ist und wann nicht. Es hilft nichts: Jeder muss sich selbst entscheiden – und zugleich prüfen, ob er noch einen kühlen Kopf hat (S. 66).

Herzlich Ihr

Reinhard Breuer



Vor Kurzem erschienen:
unser neues Dossier
»Gehirn und Bewusstsein«

Ihr Wunsch – unsere Titelgeschichte

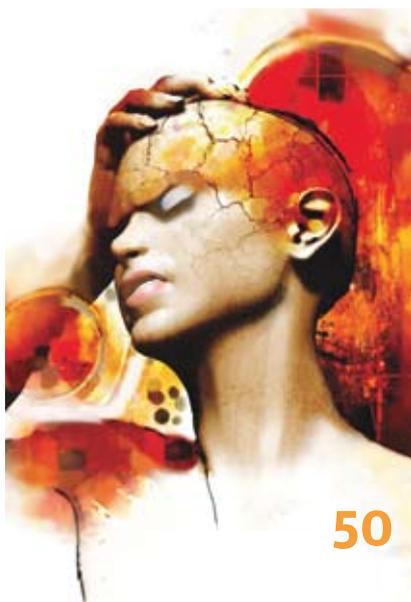
In der 12. Runde unserer Wunschartikel-Angebote hatten Sie sich mehrheitlich für folgendes Thema entschieden: die merkwürdigen Exoplaneten. Auch wir fanden das Thema so spannend, dass wir es zur Titelgeschichte dieser Ausgabe machten.

INHALT



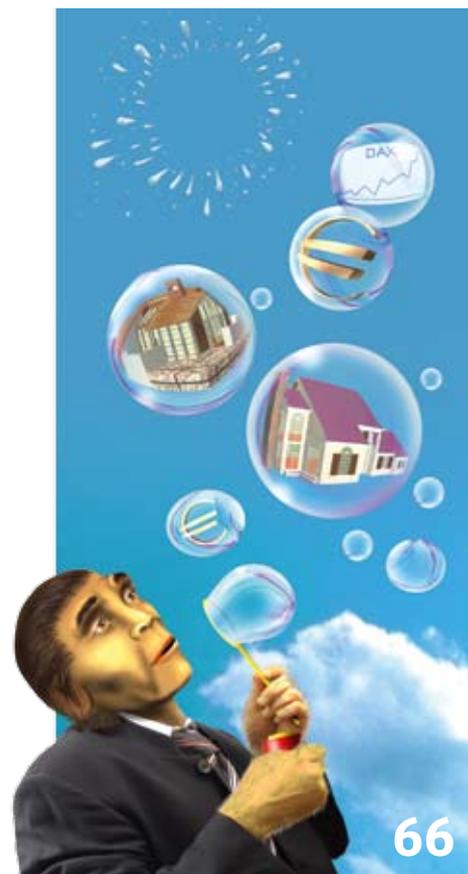
34

MEDIZIN & BIOLOGIE
Vom Gen zum Produkt – mit System!



50

MEDIZIN & BIOLOGIE
Migräne – leider keine
Einbildung



66

MENSCH & GEIST
Instinktiv in die Finanzkrise

AKTUELL

10 Spektrogramm

Abnehmen durch braunes Fett · Neue Quelle für Kometen · Ersatzzahn im Mund gezüchtet · Sehen mit dem blinden Fleck u. a.

13 Bild des Monats

Klobürsten der Tiefsee

14 Supraleiter mit Überraschungseffekt

Abrupter Übergang vom Magnetismus zur Supraleitung verblüfft

16 Vorteilhafte Unreife

Ist der Mensch nur ein Kind geliebener Affe? 

17 Planetensuche in fremden Galaxien

Pixel-Lensing deckt Exoplaneten im Andromedanebel auf 

22 Springers Einwürfe

Der Mensch ist besser als sein Ruf

ASTRONOMIE & PHYSIK

TITEL

24 Exotische Planetensysteme

Selbst dort, wo sie nie damit gerechnet hätten, sind Astronomen mittlerweile auf Exoplaneten gestoßen

SCHLICHTUNG

32 Magnetische Taschenspielertricks

Warum Magnete abgebrannte Streichhölzer anziehen, hingegen von Kirschen als abstoßend empfunden werden

MEDIZIN & BIOLOGIE

34 Vom Gen zum Produkt

Ein neuartiger Ansatz – die Systembiotechnologie – zielt darauf ab, die gentechnische Herstellung von Biopharmaka in all ihren Etappen vorab zu simulieren

42 Ein neues Molekül des Lebens?

Als Zwitter zwischen Eiweißstoff und Erbsubstanz könnten Proteinnukleinsäuren die Konstruktion künstlicher Organismen ermöglichen

50 Wie Migräne wirklich entsteht

Defekte an Nervenzellen im Hirnstamm sind vermutlich der Auslöser für den quälenden Kopfschmerz

Cover: Ein Brauner Zwergstern glüht düster über einem seiner Planeten
Titelillustration: Phil Saunders, Space Channel Ltd.

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit  gekennzeichnet; die mit  markierten Artikel finden Sie auch in einer Audioausgabe dieses Magazins, zu beziehen unter: www.spektrum.de/audio



TITEL

Exotische Exoplaneten

24

MENSCH & GEIST

60 Wie sich das Gehirn in Falten legt

Die wellige Landschaft der Hirnrinde formen Nervenfaserbündel. Bei Krankheiten wie Schizophrenie sehen manche Windungen anders aus

66 Instinktiv in die Katastrophe

Verhaltens- und Neuroökonomien erkunden, wie instinktgetriebenes Verhalten der Anleger Spekulationsblasen hervorbringen und zum Crash führen kann

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

76 Bewegliche Polyeder

Dieter Junker hat das Prinzip des Kaleidozyklus zu neuer Blüte gebracht

ERDE & UMWELT

ERDE 3.0

80 Drohen Hungersnöte?

Plötzlicher Nahrungsmangel, ausgelöst durch Klimakatastrophen, könnte unsere Zivilisation gefährden

ERDE 3.0



ERDE & UMWELT

Hungersnöte wegen Klimawandel? 80



TECHNIK & COMPUTER

Datenfusion ist nicht so einfach 90

TECHNIK & COMPUTER

90 Big Brother mit Sehschwäche

Mit Vorratsdatenspeicherung und ähnlichen Mitteln einen Menschen auszuspionieren ist schwieriger, als man denkt

WISSENSCHAFT IM ALLTAG

96 Bye-bye, Brille!

Fehlsichtigkeit lässt sich durch eine Bearbeitung der Hornhaut mit dem Laser dauerhaft korrigieren

WISSENSCHAFT & KARRIERE

98 »Ich starte gern bei null«

Ein Interview mit Carlos Härtel, Leiter und Mitbegründer des europäischen Forschungszentrums von General Electric (GE) in Garching bei München

WEITERE RUBRIKEN

- 3 Editorial: Mehr als nur Kopfschmerz
- 6 Online-Angebote
- 8 Leserbriefe/Impressum
- 75 Im Rückblick
- 106 Vorschau

- 102 Rezensionen: R. Kessler, M. Harley *Die geheimnisvolle Sexualität der Pflanzen*
Ralf Jaumann, Ulrich Köhler *Der Mond*
Mark Buchanan *Warum die Reichen immer reicher werden und Ihr Nachbar so aussieht wie Sie*

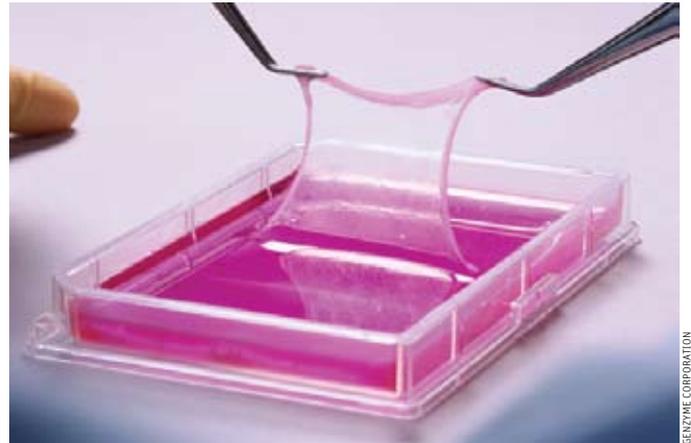
ONLINE

Dies alles und vieles mehr finden Sie in diesem Monat auf www.spektrum.de. Lesen Sie zusätzliche Artikel, diskutieren Sie mit und stöbern Sie im Heftarchiv!

<http://www.spektrum.de/>



ALFRED T. KARAJAN



GENZYME CORPORATION

SPEKTRUM DIREKT **Woher stammt der Mensch?**
www.spektrumdirekt.de/hominiden

INTERAKTIV **Was wollen Sie lesen?**
www.spektrum.de/artikel/1005950

spektrumdirekt.de

Die Wissenschaftszeitung im Internet

Woher stammt der Mensch?

Paläoanthropologen unternehmen unablässige Anstrengungen, den Ursprung des Menschen zu enträtseln – und bringen immer weitere Erkenntnisse ans Licht. **spektrumdirekt** berichtet unter anderem über »Chemiker am Lagerfeuer«, den Pekingmenschen und »Die edlen Wilden«

www.spektrumdirekt.de/hominiden

Ferne (und nahe) Welten

Erdähnliche Planeten um fremde Sterne, planetare Riesen in engsten Orbits und Exoten wie jene, die in unserer Titelgeschichte auf S. 24 beschrieben werden: Die Suche nach Exoplaneten fördert Erstaunliches zu Tage. Aktuelle Nachrichten zum Thema finden Sie kontinuierlich im **spektrumdirekt**-Dossier

www.spektrumdirekt.de/exoplaneten

TIPPS

Nur einen Klick entfernt

Seiner Zeit voraus

Das langsam ausklingende Jahr der Astronomie ist auch das Jahr von Galileo Galilei, der vor 400 Jahren erstmals den Himmel durch ein Fernrohr beobachtete. Heinz Klaus Strick würdigte den großen Mathematiker, Physiker und Astronom, der als bahnbrechender Entdecker in die Geschichte einging, in seinem Monatskalender

www.spektrum.de/artikel/1006306

Pleiten, Pech und Pannen

Die russische Raumfahrt abseits von Sojus und Mir? Darüber wissen viele (West-)Deutsche kaum Bescheid. Dabei waren gerade die Sowjets Pioniere im All. Gerhard Hertenbergers Buch »Aufbruch in den Weltraum« berichtet über dramatische Pannen, geheime Raumfahrtprogramme und russische Kosmonauten. Stefan Taube hat das Buch rezensiert

www.spektrumdirekt.de/artikel/1003931

INTERAKTIV

Machen Sie mit!

Was wollen Sie lesen? Ihre Meinung ist gefragt!

Die Herkunft unserer Katze, elektrische Raketen oder nachgezüchtetes Gewebe aus dem Labor – es ist Ihre Entscheidung. Wählen Sie bei der 13. Wunschartikelrunde Ihren Favoriten unter fünf Themen und gewinnen Sie ein Wochenende in Heidelberg. Übrigens: Den Gewinnerartikel aus Runde 12 finden Sie als Titelgeschichte hier im Heft: »Planeten, wo keine sein dürften« (S. 24)

www.spektrum.de/artikel/1005950



FÜR ABONNENTEN »Nur Kugeln unterschieden nicht zwischen Schwarz und Weiß«
www.spektrum-plus.de

FÜR ABONNENTEN

Ihr monatlicher Plus-Artikel
zum Download

»Nur Kugeln unterschieden nicht zwischen Schwarz und Weiß«

Rund zwei Millionen Afrikaner zogen für ihre Kolonialherren in den Zweiten Weltkrieg. Viele wurden zwangsrekrutiert, von den weißen Soldaten diskriminiert, als Kanonenfutter eingesetzt – und rasch vergessen. Ein erschütterndes Kapitel der Geschichte des 20. Jahrhunderts

DIESER ARTIKEL IST FÜR ABONNENTEN
FREI ZUGÄNGLICH UNTER

www.spektrum-plus.de

FREIGESCHALTET

Ausgewählte Artikel aus **Gehirn&Geist**
und **epoc** kostenlos online lesen

»Das Mädchen mit dem halben Gehirn«

Wie lebt es sich mit nur einer Hirnhälfte? Gar nicht schlecht, sofern der Defekt früh genug in der Entwicklung auftrat. Das zeigt der spektakuläre Fall eines Mädchens, das trotz Fehlens einer kompletten Hemisphäre weitgehend normal wahrnimmt, denkt und sich bewegt. Neurowissenschaftler fanden heraus, warum

DIESEN ARTIKEL FINDEN SIE ALS KOSTENLOSE
LESEPROBE VON **GEHIRN&GEIST** UNTER

www.gehirn-und-geist.de/artikel/1005792

»Selbstbewusste Seherin«

Hildegard von Bingen war eine Gläubige, die sich zu ihren göttlichen Visionen bekannte, ein Kloster gründete und kaum einen Konflikt mit den Kirchenmännern scheute. Zudem war die blaublütige Äbtissin standesbewusst: In ihr Kloster nahm sie nur Betuchte auf

DIESEN ARTIKEL FINDEN SIE AB DEM 2. OKTOBER
ALS KOSTENLOSE LESEPROBE VON **EPOC** UNTER

www.epoc.de/artikel/1006789



FREIGESCHALTET

»Selbstbewusste Seherin«

www.epoc.de/artikel/1006789

Alle Publikationen unseres
Verlags sind im Handel,
im Internet oder direkt über
den Verlag erhältlich

www.spektrum.com
service@spektrum.com
Telefon 06221 9126-743

WISSENSlogs

Die Wissenschaftsblogs

Denkdefekte und philosophische Untiefen

Wissenschaftler sind – natürlich – neutral gegenüber ihrem Untersuchungsobjekt und völlig rational. Oder doch nicht? Eine spannende Frage. Auf dem Spektrum-Blogportal wissenslogs.de fahndet seit Kurzem der Gießener Postdoc Ulrich Frey nach Denkmustern und -fehlern, gar Denkdefekten, die auch vor Wissenschaftlern nicht Halt machen. Damit nicht genug. In »Mind at Work« auf dem Nachbarportal brainlogs.de geht der Philosoph und Mathematiker Elmar Diederichs »philosophischen Untiefen unseres Geistes« nach: Er will unter anderem wissen, welchen Mythen über die psychische Natur der menschlichen Spezies sogar Neurowissenschaftler erliegen

www.wissenslogs.de
www.brainlogs.de

Rezepte von Philosophen

Philosophieren in der Krise
August 2009

Die Unverzichtbarkeit auf Zukunfts- und Technikfolgenforschung in der heutigen Zeit bleibt unbestritten. Dennoch sind Ratschläge von Philosophen keine Backrezepte, die sich eins zu eins in praktische Politik umsetzen lassen.

Naturwissenschaft und Politik durch fundierte Fragestellungen zu führen ist eine Aufgabe mit hohem Anspruch, die in der Tat wesentlich nur die Philosophie zu leisten vermag. Doch kann und darf sie keine Empfehlungen zu Gunsten ungeklärter Verfahrensweisen vorwegnehmen: Die Menge des dauergefährlichen Materials Uran spielt bei der Suche nach geeigneten Nach- und Entsorgungsmöglichkeiten durchaus eine gewichtige Rolle.

Martin Janicijevic, Diepenau

Antwort von Carl Friedrich Gethmann:

Ich möchte für eine Rehabilitation von Rezepten und Rezeptwissen eintreten. Mich wundert, dass politische und ökonomische Akteure gerne das Katheder betreten und zur allgemeinen Begeisterung verkünden, man verfüge über keine Rezepte. Ich würde es dagegen für äußerst wünschenswert halten, wenn man für Probleme auf Rezeptwissen zurückgreifen könnte. Die Alternative wäre ja, situativ und kontextgebunden, sozusagen aus dem hohlen Bauch irgendetwas zu tun gemäß dem bekannten Therapieprinzip: aliquid fiat. Bedauerlicherweise

verfügen wir bei vielen Problemen der Gegenwart über solche Rezepte nicht; wir sollten uns jedoch bemühen, solche zu (er-)finden.

Leider wird in Deutschland die Debatte über die nukleare Entsorgung auf die Endlagerung in Salzstöcken konzentriert. Angesichts der Verwendung nuklearen Materials in der Medizin, aber auch in der Materialbearbeitung wird es immer ein Entsorgungsproblem geben. Zu diskutieren ist, ob man sich nicht auf eine mehr oder weniger lange Zwischenlagerung zurückzieht, zumal nuklearer »Müll« auch einmal eine Energiequelle sein könnte. Über grundsätzliche Alternativen wird kaum nachgedacht: Warum nicht den Müll mit Schlicht-Raketen in bersticheren Behältern in die Sonne transportieren?

Lesen Sie viele weitere Leserbriefe jeweils mit einer Antwort von Carl Friedrich Gethmann unter www.spektrum.de/artikel/999554

Krabbelkinder brauchen eine feste Bezugsperson

Menschwerdung mit Kind und Kegel
Springers Einwürfe, August 2009

Herr Springer findet sein Vorurteil bezüglich der Betreuung von Menschenkindern, wie er selbst eingesteht, durch eine Anthropologin, die über Affen arbeitet, bestätigt. Doch was soll ein Menschenbaby im ersten Lebensjahr, in einer Hirnentwicklungsphase, die ein Schimpansenbaby noch im Mutterleib mitmacht, in einer »Krabbelgruppe«? Das Krabbelkind braucht, wie ausgiebig und

unwiderleglich nachgewiesen, einen festen körperlich-emotionalen Bezugspunkt, um seine Umwelt mutig krabbelnd zu erkunden. Zu diesem Hort kehrt es immer wieder zurück zum »emotionalen Auftanken«, wie M. Mahler et al. es nennen.

Erst ab etwa drei Jahren ist das Kind so weit, von Beziehungen in einer Gruppe zu profitieren. Das sind Fakten, die sich nur ideologisch wegdiskutieren lassen.

Prof. Dr. Gerhard Krebs, Quickborn

Dezentrale Stromversorgung schneller realisierbar

Strom aus der Wüste
September 2009

Stromkonzerne verweisen auf angeblich völlig unzureichende Potenziale erneuerbarer Energien im »sonnenarmen« Deutschland. Die Daten des Statistischen Bundesamtes führen jedoch zu einer anderen Einschätzung: Danach stieg die Menge des in dezentralen Anlagen mit erneuerbaren Energien erzeugten Stroms von 1997 bis 2007 um mehr als das Dreieinhalbfache, Tendenz steigend. Im Jahr 2007 entsprach der Zuwachs aus neu errichteten Anlagen schon etwa der Stromproduktion von zwei Grundlastkraftwerken. In einem Jahr hätte man aber nicht zwei Kraftwerke fertig stellen können. Hermann Scheer hat also Recht, wenn er sagt, dass keine Energietechnik schneller zu realisieren ist als der Bau von Anlagen zur dezentralen Nutzung erneuerbarer Energien.

Kurt Kress, Frankfurt/Main

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefler (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Thilo Körkel (Online Koordinator), Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Marc Grove, Anke Heinzlmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer
Redaktionsassistent: Eva Kahlmann
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 338114
Verlagsleiter: Dr. Carsten Könneker, Richard Zinken (Online)
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
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Hermann Englert, Dr. Markus Fischer, Dr. Gabriele Herbst, Dr. Rainer Kayser, Dr. Andreas Nestke, Claus-Peter Sesin.
Leser- und Bestellservice: Tel. 06221 9126-743, E-Mail: 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, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn
Bezugspreise: Einzelheft € 7,40/5Fr. 14,00; im Abonnement € 79,20 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 66,60. Die Preise beinhalten € 7,20 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 7,20 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 SdW zum Vorzugspreis.
Anzeigen: iq media marketing gmbh, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Marianne Dölz; Anzeigenleitung: Jürgen Ochs, Tel. 0211 6188-358, Fax 0211 6188-400; verantwortlich für Anzeigen: Ute Wellmann, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2481, Fax 0211 887-2686
Anzeigenvertretung: Berlin: Michael Seidel, Friedrichstraße 150, 10117 Berlin, Tel. 030 61686-144, Fax 030 61696-145; Hamburg: Matthias Meißner, Brandstwiete 1 / 6, OG, 20457 Hamburg, Tel. 040 30183-210, Fax 040 30183-283; Düsseldorf: Hans-Joachim Beier, 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; Stuttgart: Andreas Vester, Werastraße 23, 70182 Stuttgart, Tel. 0711 22475-21, Fax 0711 22475-49; München: Jörg Bönsch, Nymphenburger Straße 14, 80335 München, Tel. 089 545907-18, Fax 089 545907-24
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. 30 vom 01.01.2009.
Gesamtherstellung: Vogel Druck- und Medienservice GmbH & Co. KG, 97204 Höchberg

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: © 2009 (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 Rechteinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandene Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN

75 Varick Street, New York, NY 10013-1917
Acting Editor in Chief: Mariette DiChristina, President: Steven Inchcoombe, 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 Brandon



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



Schutz durch Ansteckung?

Die Macht der Viren, August 2009

Wäre es nicht wünschenswert, sich jetzt mit der relativ harmlosen Form des Schweinegrippe-Virus zu infizieren, um Antikörper gegen die schwere Variante zu entwickeln? Wäre man dann nicht ebenso gut geschützt wie nach einer Impfung?

Walter Keller, Ratingen

Antwort des Autors Hans-Georg Kräusslich:

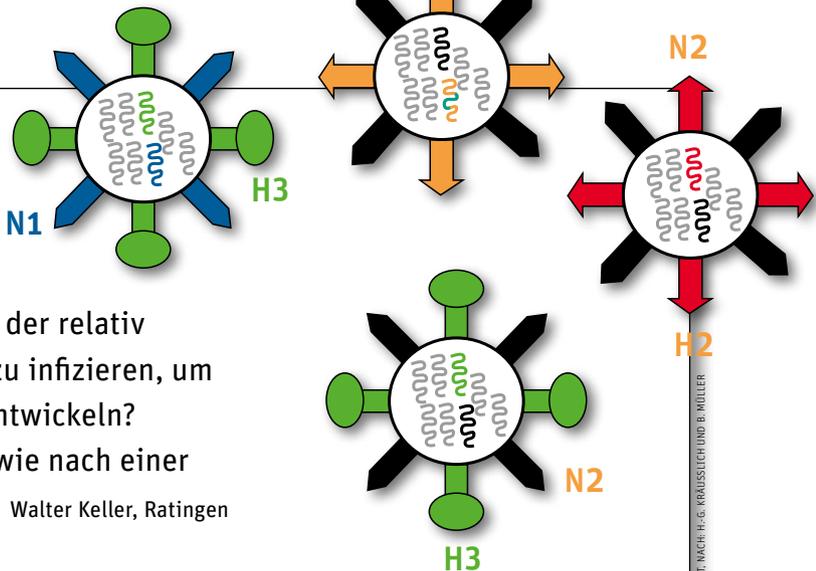
Nein! Diese gegenwärtig immer wieder diskutierte Idee ist nicht nur nicht sinnvoll, sondern sogar gefährlich: Im Gegensatz zum Grippeimpfstoff, der aus abgetöteten Viren besteht, führt die Infektion mit dem echten H1N1-Erreger zu einer Erkrankung, die schwer verlaufen und, wenn auch selten, sogar zum Tod führen kann. Und selbst wenn der »natürlich Immunierte« die Infektion unbeschadet übersteht, gefährdet er in dem Wunsch,

sich selbst zu schützen, wissentlich seine Umgebung. Ein Erkrankter scheidet – im Gegensatz zu einem Geimpften – Viren aus, die andere Menschen mit möglicherweise größerem Risiko für Komplikationen infizieren können.

Zudem ist jeder erkrankte Organismus ein Reservoir für das Virus, das darin Gelegenheit zu Mutationen und Rekombinationen erhält. Mit der Zahl der Infizierten steigt also unmittelbar das Risiko, dass ein Erreger mit höherer Pathogenität entsteht.

In Deutschland, wo viele Menschen von pharmazeutisch hergestellten Wirkstoffen absolute Sicherheit einfordern, herrscht eine erstaunliche Toleranz gegenüber Gefahren und Komplikationen, die mit als »natürlich« wahrgenommenen Substanzen einhergehen.

So setzen manche Eltern aus Angst vor Impfkomplicationen ihre Kinder auf Masernpartys gezielt einem Erreger mit viel größerem Gefährdungspotenzial als dem des Impfstoffs aus. Sie gefährden dadurch ihre Kinder.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, MACH: H.-G. KRÄUSSLICH UND B. MÜLLER

57-Zell visualisiert

Das Elfzell, August 2009

Der Schlusssatz des Artikels ist zu korrigieren. Ich habe auch das 57-Zell bearbeitet – und es war viel schwerer!

Carlo Séquin, University of California, Berkeley, USA



Das Bild zeigt alle 57 Zellen, auf konzentrische Kugelschalen mit 1, 6, 30 und 20 Elementen verteilt. Nur für die beiden innersten Schichten sind auch die Verbindungen zu den Nachbarzellen eingezeichnet.

Birgt die Radonbehandlung Gefahren?

Gefährlicher Irrtum, Wissenschaft im Rückblick, September 2009

Therapie mindert Risiken

Warum trägt die Notiz in Ihrer hochgeachteten Zeitschrift die Überschrift »Gefährlicher Irrtum«? Die nachhaltige Wirkung der Radontherapie wurde durch wissenschaftliche Studien nachgewiesen. Dabei ist zu bedenken, dass die Radontherapie mit ihrer geringen Strahlendosis selbst unter Zugrundelegung der linearen Extrapolation vom bekannten Risiko hoher Strahlendosen ein wesentlich geringeres Risiko darstellt als die regelmäßige Einnahme entzündungshemmender Medikamente.

Prof. Dr. rer. nat. Ernst Feldtkeller, München

Heilsam nur für bestimmte Krankheiten

Bei bestimmten Erkrankungen des rheumatischen Formenkreises wie Morbus Bechterew überwiegt der Nutzen das Ri-

siko der Radontherapie. Dagegen gibt es für Gesunde keine nützliche Radondosis. Radon gelangt aus dem Boden in die Wohnhäuser und ist zweitwichtigstes Umweltkarzinogen nach dem Tabakrauch. Die Grenzwerte zum Schutz der Allgemeinbevölkerung sind aus umwelt- und arbeitsmedizinischen Studien zum Lungenkrebs abgeleitet, und die Gefährlichkeit ist keine Ideologie, sondern Realität.

Prof. Dr. med. Manfred Neuberger, Wien

Briefe an die Redaktion ...

... sind willkommen! Schreiben Sie uns auf www.spektrum.de/leserbriefe oder direkt am Artikel: Klicken Sie bei www.spektrum.de auf das aktuelle Heft oder auf »Magazin«, »Magazinarchiv«, das Heft und dann auf den Artikel.

Oder schreiben Sie mit kompletter Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Redaktion Leserbriefe
Postfach 104840
69038 Heidelberg
E-Mail: leserbriefe@spektrum.com

PLANETOLOGIE

Alternative Quelle für Kometen

■ Vor etwa 65 Millionen Jahren wurde die Herrschaft der Dinosaurier durch den Einschlag eines Himmelskörpers jäh beendet. Droht uns ein ähnliches Schicksal? Diese Frage wollten Nathan Kaib und Thomas Quinn von der University of Washington in Seattle beantworten. Dabei entdeckten sie, dass viele Kometen offenbar einen anderen Ursprung haben als bisher angenommen.

Unser Sonnensystem ist umgeben von einer Ansammlung aus Eis- und Gesteinsbrocken, die bei seiner Entstehung übrig geblieben sind: der Oortschen Wolke. Gelegentlich kann ein dort umlaufendes Objekt etwa durch einen vorbeiziehenden Stern aus seiner Bahn geworfen und Richtung Erde geschleudert werden. Doch halten die Riesenplaneten Jupiter und Saturn durch ihre Gravitationswirkung Brocken aus dem inneren Bereich dieser Wolke von uns fern. Nur Kometen aus den äußeren Regionen könnten uns deshalb, so die bisherige Ansicht, gefährlich werden.

Bei Computersimulationen entdeckten die beiden Astronomen nun aber, dass das nicht stimmt. Kometen können demnach von der inneren in die äußere Oortsche Wolke gelangen, indem sie eine sehr viel exzentrischere Bahn annehmen, und von dort dann Richtung Erde katapultiert werden. Viele der langperiodischen Kometen haben nach Ansicht der beiden Forscher einen solchen Ursprung. Die Computersimulationen ergaben zugleich jedoch, dass in den vergangenen 500 Millionen Jahren höchstens drei solche kosmischen Bomben die Erde getroffen haben – weit aus weniger, als es Massensterben auf unserem Planeten gab. Die Gefahr für die Menschheit ist deshalb vernachlässigbar.

Science, Online-Vorabveröffentlichung

HIRNFORSCHUNG

Sehen mit dem blinden Fleck

■ Armamputierte spüren oft eine Berührung an ihrem fehlenden Körperteil, wenn man ihnen über das Gesicht streicht. Bisher führten Wissenschaftler solche »übertragenen Empfindungen« auf neu geschaffene feste Verdrahtungen im Gehirn zurück. Wie ein Forscherteam um Nancy Kanwisher vom Massachusetts Institute of Technology in Cambridge nun gezeigt hat, vollzieht sich die Anpassung dafür jedoch zu schnell. Offenbar bestehen die neu genutzten Verbindungen von Anfang an, sind allerdings ausgeschaltet und werden erst aktiviert, wenn eine Hirnregion keinen regulären Input mehr erhält.

Die Forscher machten ihre Entdeckung in der Sehrinde. Dazu nutzten sie den blinden Fleck, den es in jedem Auge gibt. Er liegt dort, wo der Sehnerv auf der Netzhaut endet. Bei dem Experiment mussten die Probanden ein Auge zukneifen. Dann präsentierten ihnen die Forscher ein Quadrat so, dass sein Bild auf der Netzhaut knapp neben den blinden Fleck fiel. Schon nach zwei Sekunden nahmen die Probanden die Figur als Rechteck wahr, das sich in den Bereich des blinden Flecks erstreckte – ein Zeichen dafür, dass von eigenem Input abgeschnittene Neurone auf Signale aus der angrenzenden Hirnregion ansprachen.

The Journal of Neuroscience, Bd. 29, S. 8960

Aufnahme des langperiodischen Kometen 2001 RX14 mit dem Sloan Digital Sky Survey Telescope in New Mexico von 2002



MIKE SOLONTOLO, UNIVERSITY OF WASHINGTON

STAMMZELLFORSCHUNG

Neue Zähne im Mund gezüchtet

■ Früher trugen Oma und Opa ein künstliches Gebiss. Heute lässt, wer es sich leisten kann, die Zahnlücken mit Implantaten schließen. Schon die nächste Generation von Senioren hat es vielleicht noch komfortabler: Sie kann für die ausgefallenen Zähne einfach neue wachsen lassen. Bei Mäusen ist japanischen Wissenschaftlern das Kunststück bereits gelungen.

In Zellkultur ließen sich auch bisher schon neue Zähne züchten. Sie nachträglich im Kiefer einzupflanzen böte gegenüber Implantaten jedoch keinen Vorteil. Forscher um Etsuko Ikeda von der Universität Tokio und Ritsuko Morita von der Firma Organ Technologies wählten deshalb den direkteren Weg: Sie entwickelten mittels Bio-

engineering Zahnkeime – Gewebe mit den nötigen Zellen und aktiviertem genetischem Programm zur Bildung eines Zahns – und transplantierten sie in die Kieferknochen erwachsener Mäuse. Dort bildeten sich daraus innerhalb von sieben Wochen Ersatzzähne, die nicht nur die nötige Härte zum Kauen hatten, sondern auch über einen Nerv verfügten, der auf Schmerzreize und mechanische Belastung ansprach. Außerdem zeigten die Forscher durch Markierung des Keims mit dem grün fluoreszierenden Protein, dass während seines Wachstums die gleichen Gene wie im natürlichen Fall in Aktion traten. Nun gilt es, die Methode auf den Menschen zu übertragen.

PNAS, Online-Vorabveröffentlichung



TAKASHI TSUBI, TOKYO UNIVERSITY OF SCIENCE, ORGAN TECHNOLOGIES INC.

Der im Mund der Maus gezüchtete neue Zahn wurde mit einem Fluoreszenzfarbstoff markiert und leuchtet deshalb grün.

Wie eine Echse im Sand schwimmt

■ Wittert er Gefahr, wühlt sich der etwa zehn Zentimeter lange Apothekerskink blitzschnell in den heißen Wüstensand, um seinen Feinden unterirdisch zu entkommen. Daher trägt er auch den Beinamen »Sandfisch«. Ob er sich in dem granulären, fließfähigen Medium tatsächlich wie ein Fisch bewegt, haben nun Wissenschaftler um Daniel Goldman vom Georgia Institute of Technology in Atlanta untersucht. Mit kleinen Glasperlen in einem Container simulierten sie den Wüstensand. Durch feine Löcher im Boden des Behälters konnten sie Luft hineinblasen und so die Dichte des körnigen Materials gezielt verändern. Außerdem variierten sie die Kugelgröße. Die Bewegung des Reptils unter der Oberfläche verfolgten sie mit einer Hochgeschwindigkeits-Röntgenkamera.

Die Auswertung ergab, dass sich der Skink nach dem Abtauchen unabhängig von Beschaffenheit und Dichte des Mediums stets gleich bewegt – aber nicht wie ein Fisch, sondern wie eine Schlange. Statt seine Gliedmaßen zu benutzen, legt er sie eng an den Körper an und schlängelt sich vorwärts. Die Bewegung gleiche dabei einer Welle, die sich vom Kopf zur Schwanzspitze fortpflanzt, erklären die Wissenschaftler.

Das schnelle Vorankommen unter dem Boden hilft den Tieren auch bei der Jagd. Im Sand eingegraben lauern sie dann auf Insekten. Sobald sich ein potenzielles Opfer durch Erschütterungen ankündigt, schnellen sie mit mehr als 50 Kilometer pro Stunde aus dem Hinterhalt hervor und schnappen zu.

Science, Bd. 325, S. 314



RYAN D. MALADEN UND YANG DING, GEORGIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY

Ein Apothekerskink taucht aus dem Sand auf.

GENETIK

Abnehmen durch braunes Fett

■ Wird ein Traum von Schwergewichtigen wahr? Forscher haben eine Möglichkeit gefunden, Hautzellen in braune Fettzellen umzuwandeln, die im Gegensatz zu ihren weißen Verwandten Kalorien nicht speichern, sondern verbrennen, um Wärme zu gewinnen. So schützen sie Tiere während des Winterschlafs vor dem Erfrieren. In kleineren Konzentrationen kommen sie auch im menschlichen Körper vor.

Braunes Fettgewebe entwickelt sich normalerweise unter besonderen Bedingungen aus Vorläufern der Muskelzellen, den so genannten Myoblasten. Aus früheren Untersuchungen wussten Bruce Spiegelman vom Dana Farber Cancer Institute in Boston (Massachusetts) und seine Kollegen, dass das Protein PRDM16 mit

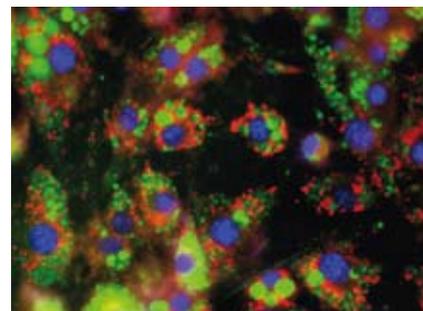
darüber entscheidet, ob das geschieht. Wie sie jetzt entdeckten, fällt diese Entscheidung stets dann zu Gunsten der Kalorienverbrenner aus, wenn zusätzlich ein weiteres Protein namens C/EPB- β vorhanden ist.

Das brachte die Wissenschaftler auf die Idee, zu prüfen, ob der Komplex aus den beiden Eiweißstoffen auch andere Zellen in braunes Fett verwandeln kann. Dazu schleusten sie ihn mit Hilfe von Viren in Hautzellen von Mäusen und Menschen ein. Auf die Versuchstiere übertragen, began-

In dieser Mikroskopaufnahme von braunem Fettgewebe sind Öltröpfchen im Innern der Zelle grün eingefärbt. Die Zellkerne erscheinen blau.

nen die so modifizierten Zellen tatsächlich braunes Fettgewebe zu produzieren. Der Anwendung des Verfahrens auf den Menschen steht allerdings entgegen, dass es eine riskante und ethisch bedenkliche Genmanipulation erfordert.

Nature, Bd. 460, S. 1154



SHINGO KATSUBA, DANA-FARBER CANCER INSTITUTE

ÖKOLOGIE

Vogelsterben durch Vitaminmangel

■ Regelmäßige Bestandsaufnahmen der Vogelpopulationen in Europa ergaben bei vielen Arten einen Rückgang seit den späten 1970er Jahren. Als Grund gelten Lebensraumvernichtung und Klimawandel. Nun haben schwedische Forscher noch einen möglichen Schuldigen ausgemacht: Mangel an Vitamin B1 oder Thiamin, das für ein funktionierendes Nervensystem dringend benötigt wird. Gegenmaßnahmen sind jedoch schwierig, weil die Ursache des Thiaminmangels bisher rätselhaft ist.

Lennart Balk von der Universität Stockholm und andere Beobachter hatten schon länger festgestellt, dass Vögel im Ostseeraum in zunehmender Zahl an einer eigenartigen Lähmung zu Grunde gehen. Von ihr waren etwa in Südschweden 451 von 837 sterbend aufgefundenen Tieren befallen. Der Leidensweg der Vögel verläuft schrittweise. Zuerst haben sie Schwierigkeiten, die Flügel anzulegen, dann können sie nicht mehr fliegen und verlieren den Appetit. Danach fällt es ihnen schwer zu atmen, und sie verlieren jegliche Kraft in den Beinen. Zuletzt können sie nur noch mühsam kriechen, bevor sie verenden.



Silbermöwe mit ersten Anzeichen eines Vitamin-B1-Mangels: Sie hat Schwierigkeiten, die Flügel anzulegen, und zeigt eine Verfärbung der Iris.

Bei Analysen der an der Lähmung gestorbenen Vögel entdeckten Balk und seine Kollegen einen Mangel an dem Nervenvitamin B1. Damit lassen sich die Symptome zwanglos erklären. Betroffen waren Vögel wie Silbermöwe, Star und Eiderente, die sich in Ernährungsweise, Lebensraum und Zugverhalten stark unterscheiden. Zum Beweis ihrer Diagnose injizierten die Forscher erkrankten Tieren Thiamin. Fast alle erholten sich daraufhin, während die Kontrollgruppe mit einem Placebo keine Verbesserung zeigte.

PNAS, Bd. 10, S. 12001

MEDIZIN

Warum Frauen schneller Aids entwickeln

■ Erstaunlicherweise bricht bei Frauen, die mit dem Human-Immunschwäche-Virus (HIV) infiziert sind, Aids oft früher aus als bei Männern. Forscher um Marcus Altfeld vom Ragon Institute des Massachusetts General Hospital in Boston haben nun den Grund dafür herausgefunden. Demnach reagiert ein Protein auf der Oberfläche bestimmter Immunzellen bei beiden Geschlechtern unterschiedlich auf das Virus.

Es handelt sich um den Toll-like-Rezeptor 7 (TLR7), mit dessen Hilfe dendritische Zellen HIV erkennen und daraufhin das immunstimulierende Signalmolekül Interferon-Alpha produzieren. Dieses wiederum veranlasst T-Lymphozyten, vom Erreger befallene Zellen gezielt zu beseitigen.

Im Laborversuch reagierten bei Frauen die dendritischen Zellen weitaus stärker auf das Virus als bei Männern. Außerdem enthielt das Blut weiblicher Patienten bei

gleicher Virusmenge mehr aktivierte T-Lymphozyten (Killerzellen) als das ihrer männlichen Pendant. Zwar ist eine starke Immunreaktion normalerweise gut zur Abwehr einer Erkrankung. Im Fall von HIV fördert sie jedoch den Ausbruch von Aids, weil sich das Virus in den T-Lymphozyten versteckt, die dadurch von Killerzellen abgetötet werden. So schädigt das Immunsystem sich selbst.

Hauptverantwortlich für den Geschlechtsunterschied bei der HIV-Abwehr dürften Sexualhormone sein. Tatsächlich zeigten Frauen nach der Menopause eine ähnlich schwache Immunreaktionen wie Männer. Die Forscher wollen nun klären, wie die Sexualhormone die Immunantwort auf HIV beeinflussen. TLR7-Hemmer könnten eines Tages die gesteigerte Aktivität der Immunzellen bei Frauen unterbinden.

Nature Medicine, Bd. 15, S. 955

BOTANIK

Orchidee gaukelt Hornisse Beute vor

■ Orchideen sind nicht nur schön anzusehen, sondern auch sehr raffiniert, wenn es darum geht, sich fortzupflanzen. Viele von ihnen verfügen nicht über Nektar und sind daher für potenzielle Bestäuber uninteressant. Deshalb verlegen sie sich aufs Täuschen. So ahmen manche die Form von Insektenweibchen nach und nutzen die Paarungsversuche liebeshungriger Männchen zum Übertragen der Pollen. Andere verströmen den Geruch von nektarreichen Blumen und locken so Insekten an. Auf einen besonderen Trick ist nach jüngsten Untersuchungen eine asiatische Orchideenart verfallen: Sie produziert das Alarmpheromon von Bienen, um sich von Hornissen bestäuben zu lassen.



Nicht Nektar ist es, der die Hornisse *Vespa bicolor* in den Blütenkelch der Orchidee lockt, sondern die Aussicht, eine Biene zu erbeuten.

Auf der chinesischen Insel Hainan jagen Großwespen der Art *Vespa bicolor* Honigbienen als Futter für ihre Larven. Das nutzt die Orchidee *Dendrobium sinense* schamlos aus. Wie Forscher von der Universität Ulm um Jennifer Brodmann nun durch Analysen herausfanden, verströmt sie das Pheromon (11Z)-Eicosen-1-ol, das Bienen normalerweise einsetzen, um sich gegenseitig vor Gefahren zu warnen. Dadurch ködert sie Hornissen mit einer vermeintlichen Beute. Diese stürzen sich deshalb regelrecht auf das rote Innere des Kelchs und nehmen dabei Pollen auf. Später bestäuben sie damit andere Orchideen, die den gleichen Trick anwenden.

Current Biology, Bd. 19, S. 1368

Klobürsten der Tiefsee

In 2000 bis 4000 Meter Wassertiefe haben Forscher um Karen J. Osborn von der Scripps Institution of Oceanography in La Jolla (Kalifornien) sieben neue Ringelwurmartentdeckt. Erkundungen mit einem ferngesteuerten Tauchboot vor den Philippinen führten auf die Spur der seltsamen Tiere, die dank den fächerartig angeordneten Borsten, mit denen sie paddelnd umherschwimmen, stark an Klobürsten erinnern. Auf die eigentliche Spezialität der Exoten verweist jedoch der Name *Swima bombiviridis*, den das hier abgebildete, vier Zentimeter große Exemplar erhielt: Bei Gefahr werfen die Würmer grün leuchtende »Bomben« ab, um Angreifern in der pechschwarzen Tiefsee falsche Ziele zu bieten. Die Kügelchen sitzen einsatzbereit direkt hinter dem Kopf. Ästhetischen Reiz verleiht den Tieren auch ihr durchsichtiger Körper, der den Blick auf die inneren Organe freigibt.



Supraleiter mit Überraschungseffekt

Anders als die altbekannten Kuprate gehen die neuen Hochtemperatursupraleiter auf Eisenbasis nicht allmählich, sondern schlagartig vom magnetischen in den supraleitenden Zustand über. Das stellt bisherige Erklärungen des Phänomens in Frage.

Von Joachim Eiding

Seit rund 100 Jahren kennt man Werkstoffe, die elektrischen Strom verlustlos leiten können. Einziger Haken: Diese Materialien müssen dafür auf sehr tiefe Temperaturen abgekühlt werden. Bei den anfangs untersuchten Metallen trat Supraleitung nur bei wenigen Grad über dem absoluten Temperaturnullpunkt ($-273,16$ Grad Celsius/ 0 Kelvin) auf. Innerhalb von mehreren Jahrzehnten schraubten Forscher dann durch den Übergang zu Metalllegierungen die so genannte Sprungtemperatur, bei welcher der elektrische Widerstand komplett verschwindet, mühsam auf 23 Kelvin hoch.

Als schon alle Möglichkeiten ausgereizt schienen, gelang Georg Bednorz und Alex Müller vom Forschungszentrum der IBM im Schweizer Rorschlikon 1986 ein sensationeller Durchbruch: Die beiden Wissenschaftler entdeckten völlig überraschend die Klasse der nichtmetallischen Hochtemperatursupraleiter auf Kupfer-

basis (zum Beispiel $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ und $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{x-1}\text{Cu}_x\text{O}_{2x-1}$). Die besten unter ihnen können den Strom bis zu 138 Kelvin widerstandslos transportieren.

Der Grund dafür war zunächst rätselhaft und ist bis heute umstritten. Beflügelt von der Hoffnung, einen Supraleiter bei Zimmertemperatur zu finden, suchten viele Forscher fieberhaft nach einer anderen Stoffklasse, die denselben Effekt zeigt. Von ihr versprachen sie sich zugleich genaueren Aufschluss über den Mechanismus der Hochtemperatursupraleitung. Doch mehr als 20 Jahre lang blieb die Suche erfolglos.

Erst Anfang 2008 entdeckte wiederum völlig überraschend eine japanische Arbeitsgruppe unter Hideo Hosono vom Tokyo Institute of Technology eine neue Klasse von Supraleitern auf Basis von Eisen (Fe) und Arsen (As) (Spektrum der Wissenschaft 7/2008, S. 20). Der zuerst synthetisierte Vertreter enthält gemäß der Summenformel $\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$ zudem Lanthan (La), Sauerstoff (O) und Fluor (F). Zwar liegt seine maximale Sprungtemperatur mit 26 Kelvin wesentlich niedriger als bei den Kupraten. Doch spannend war vor allem auch die Frage, ob die neue Stoffklasse zugleich ein neues Licht auf den Mechanismus der Hochtemperatursupraleitung wirft.

Dazu haben nun Wissenschaftler um Hans-Henning Klauß von der Technischen Universität Dresden und Hubertus Luetkens vom Paul Scherrer Institut in Villigen (Schweiz) interessante Befunde geliefert. Demnach genügen mini-

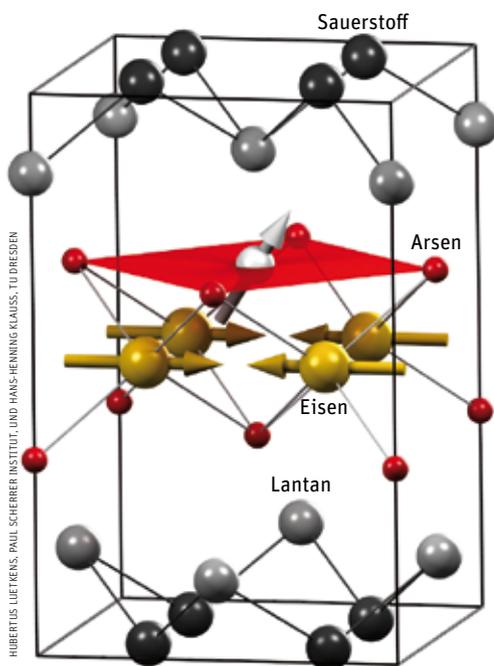
male Änderungen im Fluorgehalt von $\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$, um das Material schlagartig von einem Magneten in einen Supraleiter mit einer Sprungtemperatur von immerhin 20 Kelvin zu verwandeln. Ein so schroffer Übergang zwischen Magnetismus und Supraleitung – zwei Eigenschaften, die sich partout nicht vertragen – war sonst bisher nicht beobachtet worden.

Verzerrung fördert Magnetismus

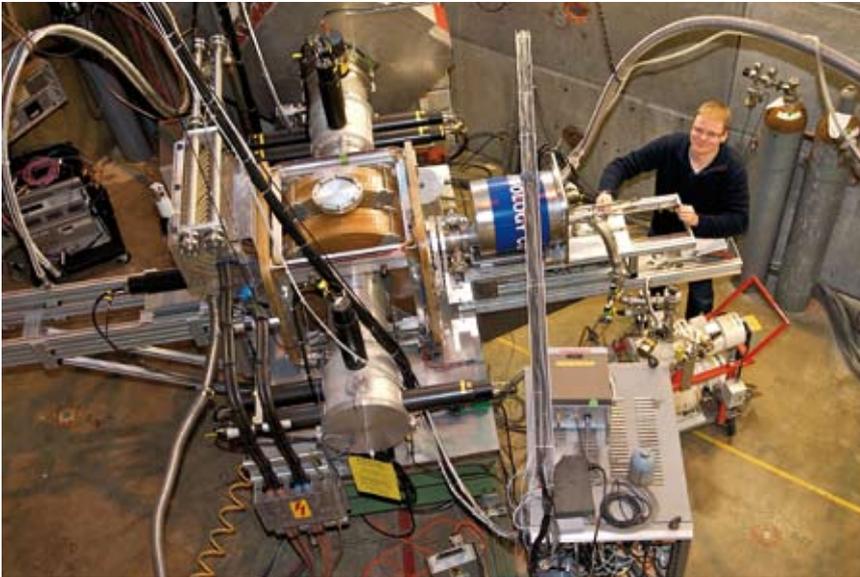
Die theoretische Grundlage für die metallischen Tieftemperatursupraleiter lieferte 1957 die nach ihren Begründern John Bardeen, Leon N. Cooper und John R. Schrieffer benannte BCS-Theorie. Demnach koppeln Gitterschwingungen (Phononen) im Festkörper die Leitungselektronen zu Paaren, die dann wechselwirkungsfrei durch das Material huschen können. Bei hohen Temperaturen reißt die thermische Energie diese Paare aber wieder auseinander. Deshalb scheint es fraglich, ob sie auch für die Supraleitung der von Müller und Bednorz entdeckten Kuprate verantwortlich sind. Viele Forscher bevorzugen eine Alternative: Statt durch Phononen könnten die Elektronen auch durch Spin-Spin-Wechselwirkungen paarweise aneinander gebunden werden. Tatsächlich verfügen sowohl Kupfer als auch Eisen über Elektronen in den dazu nötigen Bindungszuständen.

Zunächst sind die Spins dieser Elektronen allerdings in einem starren Gitter angeordnet, was den betreffenden Feststoff erst einmal zum Magneten macht. Um bewegliche Ladungsträger zu erzeugen, muss man dieses Gitter stören. Das lässt sich durch Dotieren mit Fremdatomen erreichen. Sie entziehen in den Kupraten zum Beispiel den Kupferoxid-ebenen Elektronen, wodurch im magnetischen Schachbrett Leerstellen entstehen, die als Ladungsträger fungieren, sich verpaaren und dann in ihrer Ebene frei bewegen können.

In dem neuartigen Supraleiter der Zusammensetzung $\text{LaO}_{1-x}\text{F}_x\text{FeAs}$ wechseln sich gewellte Schichten aus Lanthanoxid und Eisenarsenid ab. Im fluorfreien, undotierten Zustand sind die Spins der Eisenatome geordnet. Das resultierende Spin-Gitter haben Forscher mit Myonen (weißer Pfeil) untersucht.



HUBERTUS LUETKENS, PAUL SCHERRER INSTITUT, UND HANS-HENNING KLAUß, TU DRESDEN



MARKUS FISCHER, PAUL SCHERRER INSTITUT

In dieser Apparatur untersucht Hubertus Luetkens vom Paul Scherrer Institut in Villigen (Schweiz) den neuen Eisenarsenid-Supraleiter mit Myonen.

wodurch ihr Spin gedreht wird. Nach kurzer Zeit zerfallen sie in Positronen (Antiteilchen der Elektronen). Aus der Richtung, in der diese aus der Probe herausfliegen, lässt sich die Drehung des Myonenspins und damit die magnetische Ordnung im Innern des Festkörpers rekonstruieren. Auf ähnliche Weise kann man mit der Myonenbestrahlung auch feststellen, ob Supraleitung vorliegt und ob sie das gesamte Material erfasst oder nur einzelne Regionen.

Wie die Messungen ergaben, bilden bei der undotierten Eisenarsenid-Verbindung die beweglichen äußeren Elektronen eine Spindichtewelle. Darin sind die als Elementarmagnete wirkenden Spins so angeordnet, dass der Magnetfeldvektor in einer Raumrichtung sinusförmig variiert. In den mit mehr als fünf Prozent Fluor dotierten Proben war diese Spindichtewelle dagegen zusammengebrochen. Stattdessen erwies sich bei Temperaturen unter 20 Kelvin der gesamte Festkörper als supraleitend.

Daraus schließen die Forscher, dass der magnetische Zustand im undotierten Material die Supraleitung unterdrückt und diese sofort auftritt, sobald er zerstört wird. Die Hauptrolle spielt dabei offenbar nicht die geringfügige Ladungsände-

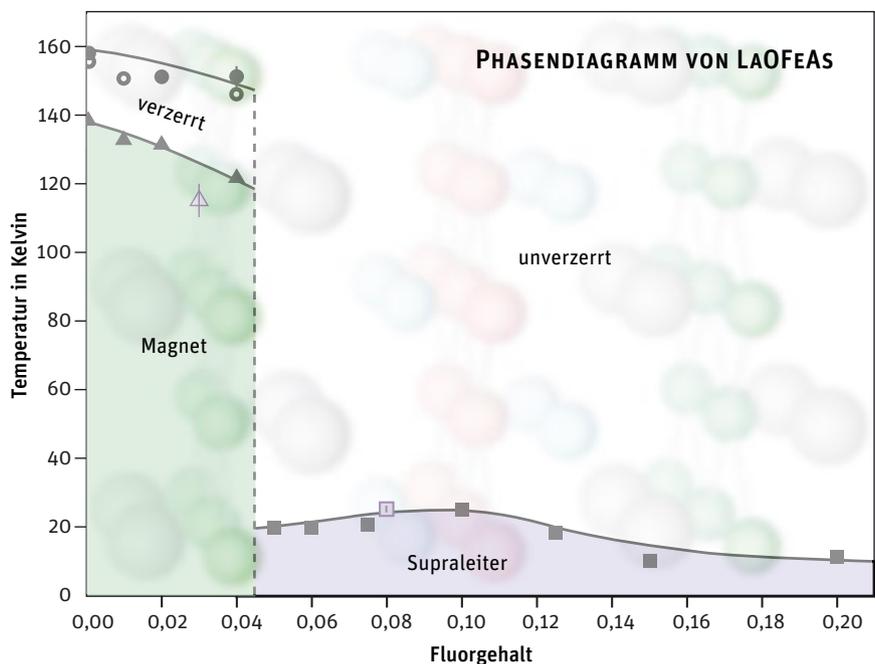
Der Übergang zum Supraleiter vollzieht sich dabei allerdings allmählich: Zunächst nimmt der Magnetismus stetig ab und verschwindet schließlich völlig; erst danach beginnt das Material bei extrem tiefen Temperaturen den elektrischen Widerstand zu verlieren; mit zunehmender Dotierung steigt die Sprungtemperatur dann kontinuierlich an, bis sie bei einem bestimmten Fremdatomgehalt ihr Maximum erreicht. Physiker nennen das einen Phasenübergang höherer Ordnung.

Der Eisenarsenid-Supraleiter verhält sich völlig anders. Als die Dresdner Forscher den Sauerstoff schrittweise durch Fluor ersetzen, ging die Temperatur, unterhalb derer Magnetismus auftritt, zwar leicht zurück. Doch betrug sie bei einer Dotierung von knapp fünf Prozent immer noch rund 120 Kelvin. Sobald die Forscher aber ein Quäntchen mehr Fluor zusetzten, fiel sie schlagartig auf null. Dafür war die Substanz plötzlich ein Supraleiter mit einer Sprungtemperatur von immerhin etwa 20 Kelvin. Die Umwandlung erfolgte somit als Phasenübergang erster Ordnung.

Die Verbindung LaOFeAs weist unterhalb einer bestimmten Temperatur eine magnetische Ordnung und eine Verzerrung des Kristallgitters auf. Bei Dotierung mit fünf Prozent Fluor verschwindet beides schlagartig, und dafür tritt Supraleitung auf. Die Sprungtemperatur beträgt zunächst 20 Kelvin und erreicht bei elf Prozent Fluor einen Maximalwert von 26 Kelvin.

Parallel dazu beobachteten die Forscher anhand von Röntgenstrukturanalysen eine Änderung des Kristallgitters: Eine vorher vorhandene Verzerrung verschwand. Es lag nahe, einen Zusammenhang mit dem Auftreten der Supraleitung zu vermuten.

Um mehr Klarheit zu gewinnen, schickten die Dresdner Festkörperforscher ihre Proben zum Paul Scherrer Institut. Dort beschloss Hubertus Luetkens und seine Gruppe das Material mit Myonen. Das sind instabile Teilchen mit gleicher Ladung und Spin wie das Elektron, nur rund 200-mal schwerer. Im Festkörper wechselwirken sie mit einem dort vorhandenen magnetischen Feld,



HUBERTUS LUETKENS, PAUL SCHERRER INSTITUT, UND HANS-HENNING KLAUS, TU DRESDEN

nung, die der Austausch weniger Sauerstoff- gegen Fluoratomme mit sich bringt. Entscheidend ist vielmehr, dass die Verzerrung der Struktur aufgehoben wird, die mit der magnetischen Ordnung einhergeht. Das widerspricht der bisherigen Vorstellung, wonach die Dotierung von Kupraten in steigendem Maß Spinfluktuationen auslöst, die Elektronen paarweise koppeln und so zu einem allmählichen Verschwinden des elektrischen Widerstands führen. Wodurch die Paarung zu Stande kommt, ist damit wieder offen.

Die neuen Erkenntnisse haben aber auch praktische Bedeutung. Da die Ver-

zerrung des Kristallgitters die Supraleitung unterdrückt, kann man über Wege nachdenken, sie von Anfang an zu verhindern. Dann ließe sich die Sprungtemperatur vielleicht deutlich steigern.

Generell besteht zum Beispiel die Möglichkeit, Lanthan durch andere Seltenmetalle zu ersetzen. Das ist teilweise schon geschehen und ließ die Sprungtemperatur inzwischen bis auf 56 Kelvin klettern. Desgleichen kann man das Arsen gegen Antimon oder Wismut austauschen.

Klauß sieht gute Chancen, mit diesen Methoden eine Sprungtemperatur ober-

halb von 77 Kelvin zu erreichen. Das ist für technische Anwendungen wichtig, weil dann die Kühlung mit preiswertem flüssigem Stickstoff ausreicht.

Generell haben die Eisenarsenid-Verbindungen Vorteile gegenüber den Kupraten. So sind sie weniger spröde und brüchig und lassen sich deshalb leichter verarbeiten. Außerdem tolerieren sie starke Magnetfelder wesentlich besser. Sie bleiben also heiße Kandidaten für technisch interessante »heiße« Supraleiter.

Joachim Eiding ist promovierter Chemiker und freier Wissenschaftsjournalist in München.

EVOLUTION  Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Vorteilhafte Unreife

Bei heranwachsenden Menschen werden laut einer neuen Untersuchung viele Gene im Gehirn erst später angeschaltet als bei Affenkindern.

Birgt eine verzögerte Hirnentwicklung das Geheimnis der Menschwerdung?

Von Charles Q. Choi

Schon vor Jahrzehnten fiel Wissenschaftlern auf, dass erwachsene Menschen im Aussehen jungen Schimpansen ähneln. Beide haben ein schmales Gebiss, ein flaches Gesicht und spärliche Körperbehaarung. Das Beibehalten kindlicher Merkmale – Evolutionsbiologen sprechen von Neotenie – kommt auch bei Haustieren vor: Dank menschlicher Vorlieben zeigen zum Beispiel viele Hundrassen Charakteristika von Welpen wie Schlappohren, kurze Schnauzen und große Au-

gen. Jetzt haben Wissenschaftler genetische Hinweise darauf gefunden, dass Neotenie teilweise erklären könnte, warum sich Schimpansen und Menschen so stark unterscheiden, obwohl sie doch im Erbgut weit gehend übereinstimmen und sich erst vor rund sechs Millionen Jahren auseinanderentwickelt haben – was evolutionsbiologisch ein kurzer Zeitraum ist.

Im Allgemeinen beruht Neotenie auf Verzögerungen in der individuellen Entwicklung. So erreichen Menschen erst rund fünf Jahre später die Geschlechtsreife als Schimpansen und behalten ihre

Milchzähne länger. »Änderungen im Zeitplan der Entwicklung gehören zu den wirksamsten Mechanismen der Evolution zur Umgestaltung von Organismen«, erläutert der Molekularbiologe Philipp Khaitovich vom Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig. »Sie erfordert nur wenige molekulare Ereignisse.«

Auf der Suche nach genetischen Hinweisen darauf, dass Neotenie eine Rolle bei der Evolution des *Homo sapiens* gespielt hat, verglichen der Forscher und Kollegen die Aktivität – genauer Ausprägung oder Expression – von 7958 Genen in den Gehirnen von 39 Menschen, 14 Schimpansen und neun Rhesusaffen. Dazu untersuchten sie Proben vom so genannten dorsolateralen präfrontalen Kortex; das ist eine Hirnregion, die mit dem Gedächtnis zusammenhängt und sich im Primatenhirn leicht lokalisieren lässt. Die Gewebe stammten von verstorbenen Individuen in verschiedenen Lebensstadien – vom Säuglingsalter bis zu den mittleren Jahren. So konnten die Forscher ermitteln, wie sich die Genaktivität bei den drei Spezies mit der Zeit ändert.

Im Einzelnen bestimmten Khaitovich und seine Kollegen die Boten-RNA-Moleküle in den Gewebeproben. Das sind Abschriften von Genen, die von den Ribosomen, den zellulären Eiweißfabriken,



GETTY IMAGES, STEVE WINTER

Erwachsene Menschen haben einige Gemeinsamkeiten mit jungen Schimpansen wie ein kleines Gebiss und ein flaches Gesicht. Vielleicht erklärt die Bewahrung kindlicher Merkmale, dass wir uns trotz eines weit gehend identischen Erbguts so stark von den Affen unterscheiden.

in Proteine übersetzt werden. Die Leipziger Wissenschaftler untersuchten nur frische Gewebe von plötzlich Verstorbenen, in denen die Boten-RNA noch kaum zerfallen war und den normalen, gesunden Zustand direkt vor dem Tod widerspiegelte.

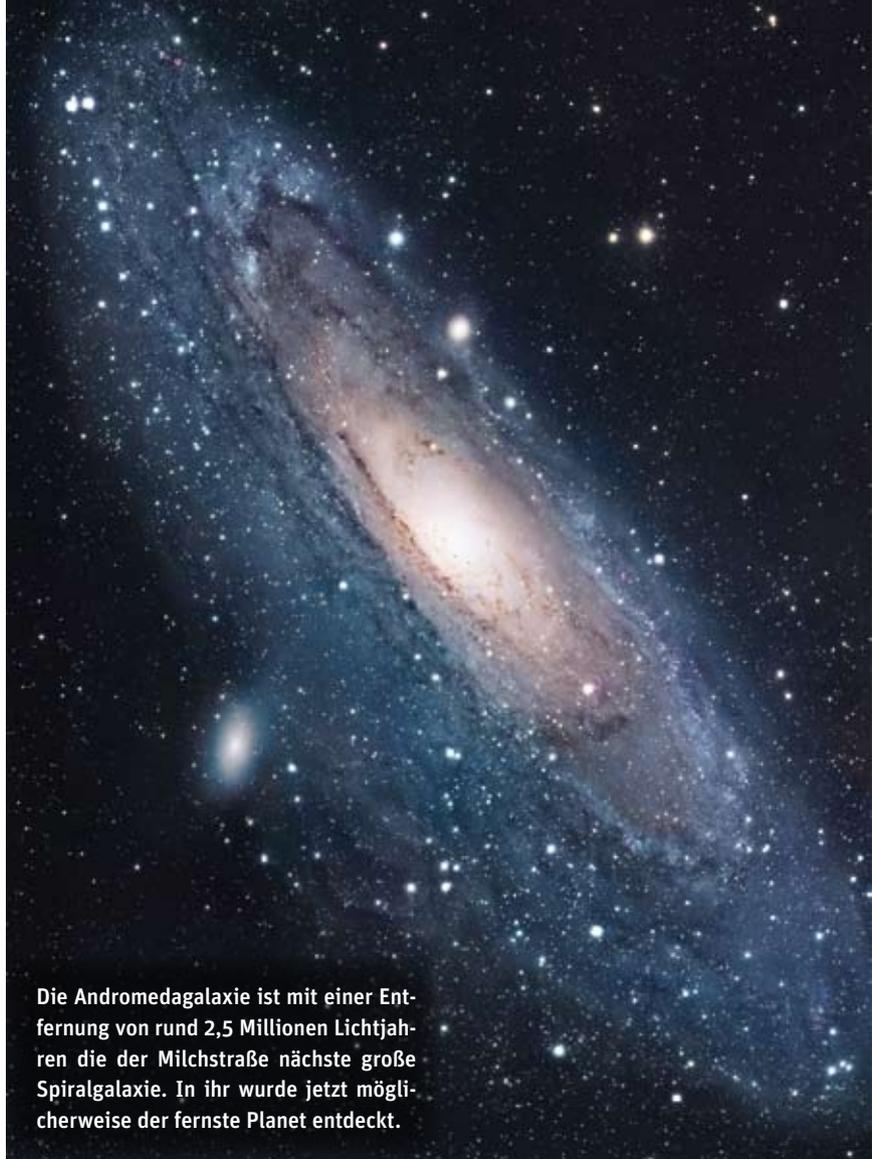
Wie sich erwies, ändert sich beim Menschen und Schimpansen die Aktivität von ungefähr gleich vielen Genen während des Heranwachsendens. Doch in rund der Hälfte der Fälle geschieht das zu einem anderen Zeitpunkt. So ergab die Analyse von 299 Genen, die bei allen drei Spezies erst irgendwann nach der Geburt in Aktion treten, dass 40 Prozent davon beim Menschen später im Leben exprimiert werden als bei Affen – manche erst in der Pubertät.

Obwohl die genaue Funktion von vielen dieser neotenen Gene unklar bleibt, fällt nach Aussage der Leipziger Forscher auf, dass sie besonders in der grauen Hirnsubstanz ihre Wirkung entfalten, in der die Verarbeitung von Nervensignalen hauptsächlich stattfindet. Khaitovich und sein Team wollen nun weitere Hirnregionen bei Menschen, Schimpansen und Makaken auf Anzeichen für Neotenie untersuchen.

Wirklich zu beweisen, dass die verzögerte Entwicklung zur Evolution des Menschen und seines großen Gehirns beitrug, ist schwierig. Khaitovich schlägt die Untersuchung der Genaktivität bei Menschen mit krankhaft beschleunigtem Wachstum vor. »Dieses kann, wie frühere Forschungen bereits gezeigt haben, zu einer Beeinträchtigung der geistigen Fähigkeiten führen«, sagt der Biologe.

Auch andere Experten halten eine Rolle der Neotenie bei der Menschwerdung für plausibel. Die Lernfähigkeit des Gehirns ist allem Anschein nach vor dem Eintritt ins Erwachsenenalter am größten. »Da Neotenie eine verlängerte Kindheit bedeutet, gibt sie dem Gehirn mehr Gelegenheit, sich zu entwickeln«, sagt der Molekularphylogenetiker Morris Goodman von der Wayne State University in Detroit (Michigan), der nicht an der Untersuchung von Khaitovich und Kollegen mitgewirkt hat. Anders gesagt: Vielleicht waren es die Möglichkeiten, die im unausgegorenen Brodeln der Jugend stecken, welche die Evolution des Menschen vorantrieben.

Charles Q. Choi ist freier Wissenschaftsjournalist in New York.



Die Andromedagalaxie ist mit einer Entfernung von rund 2,5 Millionen Lichtjahren die der Milchstraße nächste große Spiralgalaxie. In ihr wurde jetzt möglicherweise der fernste Planet entdeckt.

ROBERT GÖNDLER

ASTROPHYSIK  Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Planetensuche in fremden Galaxien

Dank Gravitationslinseneffekt sollte es gelingen, mit mittelgroßen heutigen Teleskopen sogar Planeten außerhalb der Milchstraße aufzuspüren. Das ist das überraschende Ergebnis von Computersimulationen.

Von Jan Hattenbach

Es klingt kaum glaublich, was Philippe Jetzer vom Institut für theoretische Physik der Universität Zürich behauptet: »Die Entdeckung von Planeten in der Andromedagalaxie ist mit der heutigen Teleskoptechnik möglich. Und vielleicht haben wir das sogar schon geschafft.« Die Andromedagalaxie ist ein mehr als zwei Millionen Lichtjahre ent-

fernter Nachbar des Milchstraßensystems. Auf diese enorme Distanz ist es schon schwierig, einzelne Sterne zu beobachten. Wie soll das mit den noch wesentlich kleineren, nicht selbst leuchtenden Planeten gelingen?

Der Trick, den Jetzer und seine Mitarbeiter anwenden, ist eine Verfeinerung der so genannten Mikrogravitationslinsenmethode. Schon lange weiß man, dass riesige Masseansammlungen im Weltall –

WÄHLEN SIE AUS UNSEREN VORTEILSABOS:



JAHRESABO:

- 12 Ausgaben zum Preis von nur € 6,60 (statt € 7,40) pro Ausgabe; Schüler, Studenten und Azubis zahlen sogar nur € 5,55.
- 1 Begrüßungspräsent zur Wahl

EIN ABO – VIELE VORTEILE

- 1 Nutzen Sie Ihren Sparvorteil gegenüber dem Einzelkauf.
- 2 Sie verpassen keine Ausgabe und bekommen das Heft sicher verpackt und pünktlich nach Hause geschickt.
- 3 Profitieren Sie vom kostenlosen Onlinezugang auf alle Spektrum-Ausgaben seit 1993.
- 4 Jeden Monat finden Sie im Internet einen nicht im Heft publizierten Zusatzartikel.
- 5 Sie können ausgewählte Sonderhefte gratis downloaden.
- 6 Mit Ihrem persönlichen Mitgliedsausweis (zum Download) kommen Sie in den Genuss zahlreicher Vergünstigungen.
- 7 Als Abonnent können Sie unser Produkt des Monats günstiger bestellen.

Ihr Zugang zu den Onlinevorteilen:

www.spektrum.de/plus



Weitere
Präsente unter
[spektrum.de/
oktober](http://spektrum.de/oktober)

Das Buch »Unser Fenster zum Weltraum« präsentiert astronomische Entdeckungen aus 400 Jahren. Die beiliegende DVD bietet zudem reiches Zusatzmaterial wie Animationen, Computersimulationen und Experteninterviews.



Das historische Galilei-Teleskop – das Fernrohr, mit dem die moderne Astronomie begann. Bau-satz aus gestanzten Kartonbögen, 4-Farb-Druck, mit Glaslinsen und Halterung, Länge: 78 cm

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

Wissenschaft aus erster Hand

MEHR WISSEN, WENIGER ZAHLEN, NICHTS VERPASSEN!

MINIABO:

- 3 aktuelle Ausgaben mit 35 % Preisvorteil:
Sie zahlen pro Heft nur € 4,83.
- 1 Präsent zur Wahl

Ob für Schule, Uni oder
als Kometiknecessaire:
Das rote Multicase von
Reisethel ist mit seinen
praktischen Innenfächern
vielseitig anwendbar;
ca. 21 x 10 cm.



Das T-Shirt »Pioneer« (100 %
Baumwolle, XL) mit der berühm-
ten Grußbotschaft der Mensch-
heit von der Raumsonde
Pioneer; diese geht auf eine Idee
des Wissenschaftlers Carl Sagan
zurück.

35%
PREIS
VORTEIL

SPEKTRUM VERSCHENKEN

VERSCHENKEN SIE EIN JAHR
LESEVERGNÜGEN

Das erste Heft des Abonnements
versenden wir – zu dem von
Ihnen gewünschten Termin – zu-
sammen mit einer Grußkarte in
Ihrem Namen an den Beschenkten.
Das Präsent schicken wir
an Ihre Adresse.

www.spektrum.de/oktober

LESER WERBEN LESER

SIE MÖCHTEN UNS EINEN
NEUEN ABONNENTEN VER-
MITTELN?

Dann haben Sie sich eine
Dankesprämie verdient und
können zwischen mehreren
Präsenten wählen:

www.spektrum.de/oktober

PRODUKT DES MONATS

Nie wieder zu harte oder weiche
Frühstückseier:

Das Piep-Ei Gold misst die
Wassertemperatur und berech-
net über eine Differenzialgleichung
daraus die Innentempe-
ratur im Ei. Erreicht die
Temperatur im Eigelb 62°C,
so wird eine Melodie gestartet.
Daher kann man mit Piep-Ei
Eier genauer kochen und den
Kochvorgang auch mit kaltem
Wasser starten. Preis für
Abonnenten: € 19,- inkl.
Versand Inland (statt €
22,90)

www.spektrum.de/plus

SO KÖNNEN SIE BESTELLEN:



MIT DER BESTELLKARTE



TELEFON: 06221 9126-743



FAX: 06221 9126-751

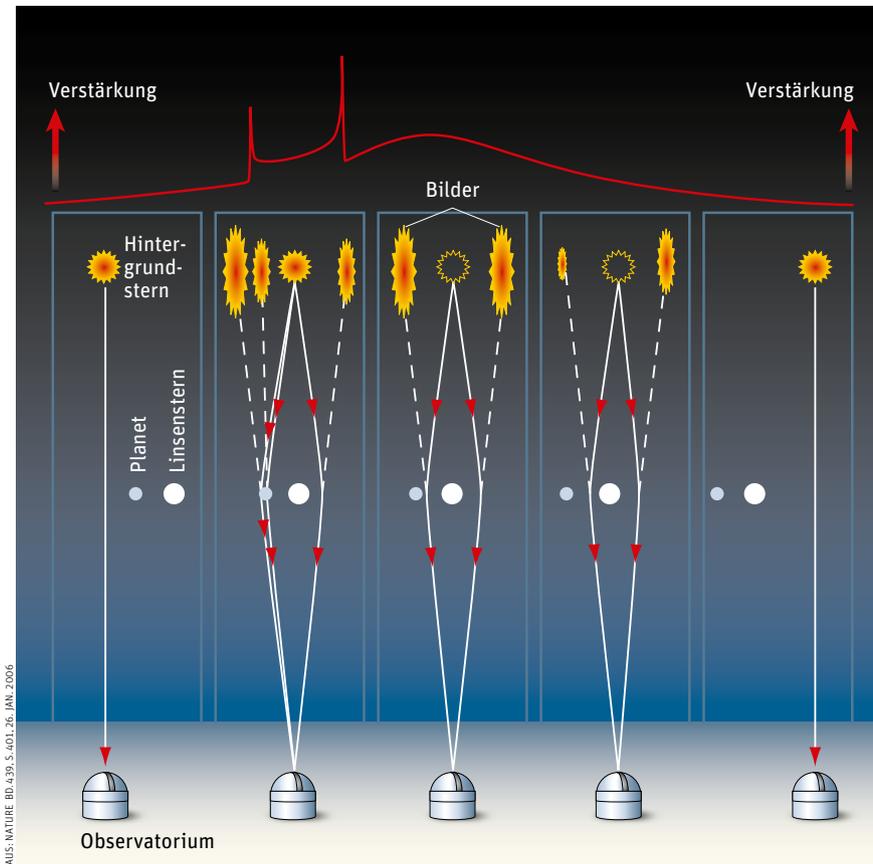


E-MAIL: service@spektrum.com

www.spektrum.de/oktober

17%
PREIS
VORTEIL





etwa Galaxien oder Galaxienhaufen – wie eine Linse wirken: Sie können das Licht von weiter entfernt liegenden Objekten bündeln und damit verstärken. Dieser Effekt ergibt sich aus der allgemeinen Relativitätstheorie. Demnach verbiegen große Massen den Raum derart, dass sich Lichtstrahlen in ihrer Nähe nicht geradlinig, sondern gekrümmt ausbreiten. Auf diese Weise erzeugen Gravitationslinsen in der Helligkeit verstärkte Abbilder von leuchtenden astronomischen Objekten (meist weiteren Galaxien), die sich, von der Erde aus gesehen, hinter ihnen befinden.

Im Prinzip kann auch ein einzelner Stern als Gravitationslinse wirken, wenn er aus irdischem Blickwinkel vor einem anderen vorbeizieht. Nur ist der Effekt sehr viel schwächer. Dennoch lässt sich, wie man seit mehr als zehn Jahren weiß, selbst eine solche »Mikrolinse« astronomisch nachweisen: Für einen kurzen Moment steigt die Helligkeit des entfernten Quellensterns durch das Vorbeiziehen des näheren Linsensterns deutlich an.

Der Helligkeitsverlauf ist dabei sehr gleichförmig und ähnelt einer gaußschen Glockenkurve. Allerdings gilt das nur, wenn der Linsenstern allein ist. Hat er einen Begleiter – etwa einen Planeten –, so bewirkt dieser eine Störung, die sich

in scharfen Zacken auf der glatten Glockenkurve äußert (Bild oben). Selbst relativ kleine Planeten machen sich so bereits bemerkbar. Ihre Masse und Entfernung lassen sich dann durch Vergleich des gemessenen Helligkeitsprofils mit theoretischen Rechnungen ermitteln.

Unter den rund 350 bislang entdeckten Exoplaneten wurden erst sieben mit Hilfe der noch relativ jungen Mikrolinsenmethode gefunden (Spektrum der Wissenschaft 4/2006, S. 14). Es handelt sich um die am weitesten entfernten Exemplare, und drei von ihnen sind nur wenig massereicher als die Erde. Trotzdem befinden sich alle innerhalb unserer eigenen Galaxie, der Milchstraße, in einem Abstand von maximal 21 000 Lichtjahren – ein Hundertstel der Distanz zur Andromedagalaxie.

Trotzdem meinen Jetzer und Kollegen, die Mikrolinsenmethode eigne sich auch für die Planetensuche in anderen Sternsystemen. Schon seit zehn Jahren nehmen sie die Andromedagalaxie, auch M31 genannt, ins Visier. Ursprünglich ging es ihnen allerdings nicht um das Aufspüren von Exoplaneten. Sie erhofften sich vielmehr Aufschlüsse über die Verteilung der Dunklen Materie im Umfeld von Galaxien. Diese konzentriert sich nach Ver-

Ein Stern, der vor einem leuchtenden Hintergrundobjekt vorbeizieht, fokussiert dessen Lichtstrahlen und bewirkt so einen vorübergehenden Anstieg der Helligkeit. Hat er einen Planeten, können in der normalerweise symmetrischen Lichtkurve Zacken auftreten.

mutungen von Astrophysikern in so genannten MACHOs. Solche massereichen kompakten Haloobjekte sollten demnach sowohl M31 als auch die Milchstraße als unsichtbare Materiekumpen umgeben. In diesem Fall könnten sie ebenfalls als Gravitationslinsen das Licht ferner Sterne verstärken. Tatsächlich hat man in Richtung der Andromedagalaxie bereits ein Dutzend Beispiele dafür beobachtet.

Im Verlauf dieser Beobachtungen stießen die Forscher auch auf stellare Mikrolinsen. Und bei einer davon namens PA-99-N2 traten völlig überraschend die erwähnten Zacken in der glockenförmigen Standardhelligkeitskurve auf. »Damals waren wir noch vorsichtig«, meint Jetzer. »Wir gaben unserer Publikation über dieses Objekt den neutralen Titel ›Die Anomalie im Mikrolinsen kandidat PA-99-N2‹.« Doch schon zu jener Zeit wählte der Schweizer Astrophysiker als Ursache einen Begleiter, entweder einen zweiten Stern oder einen großen Planeten.

Neues Kapitel der Planetenforschung

Fünf Jahre später ist Jetzer mutiger: »Unseren neuen Modellen zufolge handelt es sich wahrscheinlich um einen Planeten, der etwa sechs- bis siebenmal so massereich wie Jupiter ist.« Etwa ab 70 bis 80 Jupitermassen zündet im Zentrum eines Himmelskörpers die Fusion von Wasserstoff zu Helium. Dann spricht man von einem Stern. Zwischen 75 und etwa 13 Jupitermassen bezeichnet man das Objekt dagegen als Braunen Zwerg, ein Mittelding zwischen Planet und Stern, in dem zwar Kernverschmelzungen Energie liefern, aber nicht Wasserstoff zu Helium fusioniert. Der in PA-99-N2 gefundene zweite Körper liegt nach Jetzers Abschätzung klar unterhalb dieser Grenze.

Wie aber kommen der Züricher Astronom und seine Kollegen zu diesem Schluss? Nach der Entdeckung von PA-99-N2 dämmerte ihnen, dass es mit der Mikrolinsenmethode gelingen könnte, auch Planeten in Nachbargalaxien aufzuspüren. Also simulierten sie am Computer die Störungen der Helligkeitskurven,



■ H2GO Hybrid RC Control

Das Brennstoffzellenauto mit Fernsteuerung im Colani-Design

Mit solarbetriebener Wasserstoff-tankstelle, Netzteil, HORIZON.

Bestell-Nr. 2858.

€ 149,95 (D), € 149,95 (A)

Hier treffen sich Spielspaß, Design und zukunftsweisende Technik!

Der H2GO-Racer im schnittigen Design bezieht seine Energie aus Wasserstoff. Diesen können Sie mit der Solarstation umweltfreundlich aus Sonnenenergie gewinnen. Per Funkfernsteuerung können Sie dann ihren neuen Sportwagen vorführen. Dabei wird selbst die Funkfernsteuerung ökologisch mit der Solarstation aufgeladen. Es sind also keine Batterien nötig, dennoch ist für ungeduldige Rennfahrer - und falls Sie für Regentage zu wenig Wasserstoff gespeichert haben - ein Netzteil im Lieferumfang enthalten. Die Bedienungsanleitung ist unter anderem auch in deutscher Sprache. Für den Betrieb wird destilliertes Wasser empfohlen, das sie zum Beispiel in jedem Baumarkt erhalten.



■ Casio EX-word elektronisches Wörterbuch EW-G5500V, Übersetzungs-computer

Multi-Translator für 5 Sprachen. Enth. PONS Business-Wörterbuch Englisch und Spanisch; PONS Handwörterbuch

Französisch; Multilingual Word and Phrasebank; Oxford Advanced Learner's Dictionary; Oxford Thes, Hueber.

Zubehör: USB-Kabel; 2 AAA-Batterien, Ohrhörer. Hochauflösendes LC-Display (Diagonale 12,7 cm) mit Hintergrundbeleuchtung

Bestell-Nr. 2852. Früher € 299,-,

jetzt nur € 249,90 (D), € 249,90 (A)



■ 36 Cube - Spiel für 1 Person

2009, 36 Teile, Thinkfun.

Bestell-Nr. 2848.

€ 22,95 (D),

€ 22,95 (A)

In diesem kniffligen Spiel für eine Person müssen

Sie den Würfel so zusammensetzen, dass jede Farbe in jeder Reihe nur einmal vorkommt. Die Türme müssen zusammengesetzt die Form eines Würfels ergeben. Das hört sich einfacher an, als es ist! Inhalt: je 6 rote, gelbe, orange, grüne, blaue und lila Türme, Grundplatte, Anleitung. Alle Teile sind aus Kunststoff.

Für 1 Spieler ab 8 Jahren (mit guten Nerven).

Besuchen Sie uns im Internet unter:
www.science-shop.de



■ Celestron FirstScope

Offizielles Teleskop des Internationalen Jahres der Astronomie 2009

Hauptspiegel: 76 mm Durchmesser, Brennweite: 500 mm, Celestron.

Bestell-Nr. 2867.

€ 59,- (D),

€ 59,- (A)

Mit dem Celestron FirstScope erhalten

Sie ein hochwertiges Newton-Teleskop mit justierbarem Fangspiegel und azimutaler Dobson-Montierung. Der Tubus dieses kompakten Instruments ist gerade mal 27 Zentimeter lang und bringt zusammen mit der Montierung circa zwei Kilogramm auf die Waage. Damit ist dieses transportable Teleskop mehr als nur ein schönes Instrument für Einsteiger: Es ist Ihr Dobson für unterwegs. Zum Lieferumfang gehören zwei Okulare (20 mm und 4 mm Brennweite), eine ausführliche deutschsprachige Anleitung und die Planetariumssoftware Redshift 7 »Starter Edition«.

Portofreie Lieferung in D & A ab einem Bestellwert von € 20,-*



■ Hand-Digital-Mikroskop 1,3 MP

mit USB-Anschluss, 1,3 Mega-Pixel Auflösung, Vergrößerung 20-fach, bzw. 200-fach, USB-Anschlusskabel, 8 LEDs, Farbe: silber/schwarz, Bresser.

Bestell-Nr. 2860.

€ 49,90 (D), € 49,90 (A)

Schon mal die eigene Haut 200-fach vergrößert gesehen? Nein? Na dann aber ran an den Computer! Hochfahren, Software starten, USB-Handmikroskop anschließen und los geht's! Ab 8 Jahren.



■ Stirling grün

Stirlingmotor mit variabler Geschwindigkeit

Material: VA, Messing, Glas, Länge: 120 mm, Breite: 110 mm, Höhe: 130 mm, Gewicht: 280 g, Hielscher.

Bestell-Nr. 2857. € 194,- (D), € 194,- (A)

Der »Stirling-Grün« ist eine neue Entwicklung, bei der der Arbeitskolben und der Verdrängerkolben in einer horizontalen Ebene arbeiten. Ein Teelicht erzeugt genug Wärme um das große Schwungrad in Drehrichtung zu versetzen. Mit der höhenverstellbaren Schwinge kann der Abstand vom Teelicht zum Verdrängerzylinder geändert werden. Somit ist die Geschwindigkeit variabel. Laufzeit ca. 3 Stunden.



■ Thermoakustischer Teelicht-Stirlingmotor STO4

Heizzyylinder: Reagenzglas Ø 14,5mm x 150mm, Arbeitskolben: Ø16mm. Hub: 16mm, Schwungrad: Ø65mm x 6mm, Kerzel.

Bestell-Nr. 2855. € 187,- (D), € 187,- (A)

Bei dem Stirlingmotor STO4 handelt es sich um einen thermoakustischen Teelichtstirling, kurz TATS. Ein Regenerator aus Stahlwolle als Zwischenspeicher für die zugeführte Wärmeenergie erhitzt und kühlt das Arbeitsmedium im Wechsel und die entstehende Schallwelle treibt den Arbeitskolben an. Der sonst erforderliche Verdrängerkolben entfällt.



■ Temperatur-Logging System TL-500

Temperatursensoren mit USB-Basisstation und zwei Temperatursensoren, Arexx.

Bestell-Nr. 2859.

€ 79,- (D), € 79,- (A)

Messen Sie die Temperatur an zwei verschiedenen Orten und werten Sie den Verlauf am PC aus. Das Temperaturlogger System TL-500 enthält eine USB Basisstation mit 2MB internem Flash Speicher und zwei Temperatursensoren (TL-3TSN). Die Sensoren und der Empfänger kommunizieren drahtlos. Die Kommunikationsfrequenz für die Datenübertragung beträgt 433MHz. Dieser Frequenzkanal ist für Sendeleistungen unterhalb 10 Milliwatt frei verfügbar. Diese geringe Sendeleistung erlaubt eine drahtlose Kommunikation über einer Distanz von einigen dutzend Metern.



■ CHARLES Design-Nussknacker

Polykarbonat/ Aluminium, mit aussergewöhnlicher Mechanik zum Nüsseknacken, schwarz

Design: Ralf Webermann, Maße: 62 * 70 mm, Gewicht: 145 Gramm, Troika.

Bestell-Nr. 2842. € 28,90 (D), € 28,90 (A)

Lieben Sie Nüsse? Wenn Sie bisher dachten, Nüsse zu knacken wäre eine lästige Angelegenheit, belehrt Sie CHARLES eines Besseren. Ein verblüffendes und dazu noch sauberes Prinzip: Die Nüsse werden mittels Schleuderkraft im Deckel geknackt. Die Nusschalen werden sauber aufgefangen - keine Krümel mehr auf dem Tisch!

Springers Einwürfe

Der Mensch ist besser als sein Ruf

Sogar eingefleischte Egoisten lassen sich zum Gemeinsinn verführen.

Seit der Ökologe Garrett Hardin 1968 in einem berühmten »Science«-Artikel die so genannte Allmende-Tragödie (»The Tragedy of the Commons«) beschrieb, untersuchen Spieltheoretiker und Wirtschaftsforscher, wie sich Menschen verhalten, wenn sie vor die Wahl zwischen Eigensinn und Gemeinsinn gestellt werden. Hardin war zu dem pessimistischen Schluss gekommen, es gebe für das Allmende-Problem keine einfache »technische« Lösung: Der Mensch, von Natur aus Egoist, werde öffentliche Güter immer vernachlässigen – es sei denn, man zwingt ihn mit staatlicher Gewalt, sich sozial und ökologisch zu verhalten.

Moderne Verhaltensexperimente zeichnen zum Glück ein etwas freundlicheres Menschenbild. Im so genannten Ultimatumspiel müsste ein Egoist theoretisch nach dem Motto »Friss, Vogel, oder stirb« dem Spielpartner stets den kleinstmöglichen Betrag zuteilen, also so gut wie gar nichts; und der andere müsste froh sein, überhaupt ein Almosen zu bekommen. Doch in realen Experimenten teilen Ultimatumspieler ziemlich fair mit ihrem Partner.

Aufwändiger sind Öffentliche-Güter-Spiele, bei denen mehrere Teilnehmer an Computern ihr Spielgeld entweder komplett horten oder etwas davon in einen gemeinsamen Topf spenden, wo das Geld dann allen Mitspielern zu gleichen Teilen zuteilkommt. Ein beinharder Egoist wird natürlich alles, was er hat, schön für sich behalten und obendrein vom Gemeinsinn der anderen profitieren, indem er seinen Anteil am von ihnen gefüllten Topf einsteckt.

Derart lupenreine Geizkrägen sind zum Glück nur in der Spieltheorie die Norm, in wirklichen Experimenten eher die Ausnahme. Dennoch wirkt asoziales Verhalten ansteckend und kann mit der Zeit tatsächlich dazu führen, dass der gemeinsame Topf sich leert. Dann ist die klassische Allmende-Tragödie da.

Als Gegenmittel bieten sich individuelle Sanktionen an: Wer mir als Sozialschmarotzer auffällt, den belege ich mit einer Strafgebühr. Freilich kostet das nicht nur den bestraften Egoisten etwas, sondern nach den Spielregeln muss ich quasi die Kosten des von mir angestregten Verfahrens tragen. Wäre ich von purem Eigensinn besessen, würde ich mir das sparen und gar nicht eingreifen. Doch in realen Spielen finden sich genügend viele Teilnehmer, die es den Schmarotzern gern heimzahlen.

Auf einen neuen Dreh ist jetzt eine Gruppe um David G. Rand von der Harvard University gekommen (*Science*, Bd. 325, S. 1272). Sie unterteilten knapp 200 Teilnehmer in Vierergruppen, die jeweils zusammen vor einem Computerschirm um das öffentliche Gut spielten. Das heißt, die Probanden wussten zwar nicht über alle anderen Bescheid, sahen aber wenigstens, was ihre drei Mitspieler trieben. Sie hatten nun die Wahl, das Verhalten in ihrer Kleingruppe zu ignorieren, asoziale Spielzüge ihrer nächsten Mitspieler zu bestrafen – oder deren soziales Verhalten zu belohnen. Diese dritte Möglichkeit erwies sich als die günstigste: Sie sorgt für Pflege des öffentlichen Guts und ist obendrein kostengünstiger für die Gemeinschaft als Strafaktionen; denn Belohnungen schlagen in der Gesamtbilanz positiv zu Buche, während die Strafe nur Geld kostet.

Die Moral von der Geschichte sagt mir zu. Besser, als asoziales Verhalten zu bestrafen, ist es offenbar, Fürsorge zu belohnen. Das setzt allerdings voraus, dass Menschen einander in kleinen überschaubaren Gruppen kennen lernen. Isolation und Anonymität bilden den Nährboden für die Allmende-Tragödie; dort gedeiht der Egoist, wie er im spieltheoretischen Buche steht.



Michael Springer

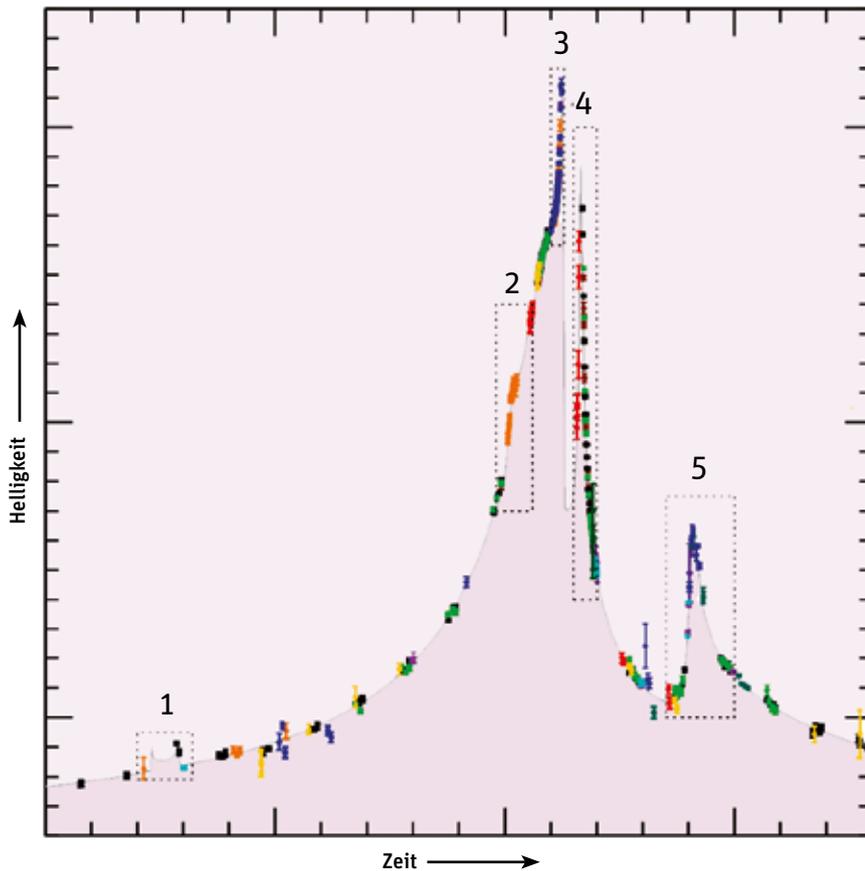
die Exoplaneten in M31 verursachen würden. Dazu nahmen sie vereinfachend an, dass jeder Stern in der Galaxie einen Planeten besitzt, und übernahmen die Verteilung der Massen und Bahnradialen dieser Planeten aus Modellen. Die entscheidende Frage war: Können planeteninduzierte Störungen von Mikrolinsenereignissen in M31 mit heutigen Teleskopen von der Erde aus beobachtet werden? Und wenn ja, wie viele solcher Beobachtungen sind je nach Größe des Teleskops zu erwarten?

Die Antwort lautete: Ja, die Planeten verraten sich tatsächlich durch ihre Störungseinflüsse, und schon ein relativ kleines Teleskop kann sie detektieren (*Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, im Druck). Für Jetzer öffnet sich damit das Tor zu einem neuen Kapitel der Planetenforschung. Statistische Untersuchungen über Planeten und ihre Eigenschaften wären möglich, die sich in unserer eigenen Galaxie nicht durchführen lassen. Denn in der Milchstraße bleiben große Gebiete für die Astronomen hinter Staubwolken verborgen. Mit M31 aber präsentiert sich ein Prachtexemplar von Spiralgalaxie in voller Größe ohne diese Einschränkungen.

Neuartiges Pixel-Lensing

Das Problem ist allerdings die große Entfernung. Deshalb kann man mit kleineren bis mittelgroßen Teleskopen in M31 nicht einmal Sterne einzeln sehen. So wie das bloße Auge unsere Milchstraße am Nachthimmel nur als nebliges Band wahrnimmt, reicht das Auflösungsvermögen etwa eines Zwei-Meter-Spiegels nicht aus, Sterne in M31 getrennt auf einem CCD-Chip abzubilden. Stattdessen sieht jedes Pixel der Kamera das Licht vieler hundert oder tausend strahlender Körper gleichzeitig. Die Astronomen beobachten somit die kumulierte Helligkeit vieler Lichtquellen in einem einzelnen Bildpunkt.

Das wirft zusätzliche Probleme auf. So ändern unter den zahlreichen Sternen, die zur Helligkeit eines Kamerapixels beitragen, einige ihre Leuchtkraft von sich aus – ohne vorbeiziehendes Vordergrundobjekt, das als Mikrolinse wirkt. Das gilt etwa für pulsationsveränderliche Sterne oder Novae. Doch sie lassen sich daran erkennen, dass ihre Schwankungen klein sind gegenüber den Verstärkungseffekten bei einem Mikrolinsenereignis. Und mehr als eine Mikrolinse pro Pixel



tritt praktisch nie auf; dafür sind diese Ereignisse zu selten.

Ein weiteres Problem betrifft die technische Umsetzung. So muss sichergestellt sein, dass bei vergleichenden Beobachtungen ein bestimmtes Pixel immer das Licht der gleichen Sterne abbildet. All diese Schwierigkeiten seien inzwischen gemeistert, versichert Jetzer. Tatsächlich hoffen die Forscher, bald eine systematische Suche nach Planeten in der Andromedagalaxie aufnehmen zu können.

Dazu müssten sie eine Batterie von über den Globus verteilten Teleskopen zu einer gemeinsamen Beobachtungskampagne zusammenfassen und die Andromedagalaxie rund um die Uhr ins Visier nehmen. »Die planetaren Störungen der Helligkeitskurve spielen sich oft in einem Zeitraum von nur wenigen Stunden ab«, erläutert Jetzer. »Um sie aufzulösen, sind Messungen in kurzen Abständen erforderlich.«

Die Beobachtungen müssten zudem einen längeren Zeitraum überspannen. Ein typisches Vier-Meter-Teleskop könnte den Simulationen zufolge durchschnittlich alle neun Monate mit der Entdeckung eines extragalaktischen Planeten aufwarten – je größer der Spiegel, desto häufiger. Vorerst wollen die For-

Diese Mikrolinsen-Lichtkurve stammt von dem Objekt OGLE-2006-BLG-109, einem Stern mit etwa der halben Sonnenmasse, der rund 5000 Lichtjahre von der Erde entfernt ist und von zwei Planeten umkreist wird. Die farbigen Punkte zeigen die Messergebnisse von insgesamt elf unterschiedlichen Observatorien. Die Ziffern 1 bis 5 markieren Bereiche, an denen Abweichungen des Helligkeitsverlaufs von der Lichtkurve eines Einzelsterns zu erkennen sind.

scher ihre Beobachtungen mit kleineren Instrumenten fortsetzen.

Nur die Mikrolinsenmethode erlaubt derzeit die Suche nach Planeten in fernen Galaxien. Dass sie auch massearme, erdähnliche Planeten aufspürt, ist ein weiterer Vorteil. Dafür hat sie allerdings einen entscheidenden Nachteil gegenüber anderen Methoden: Ist der Linsenstern mit seinem Trabanten einmal an dem Quellenstern vorbeigezogen, verschwindet er für immer aus dem Blickfeld. Eine Nachuntersuchung eines einmal entdeckten Exoplaneten ist damit nicht möglich.

Jan Hattenbach ist Physiker, Astronom und freier Wissenschaftsjournalist in Aachen.

wichtige onlineadressen

-  **CONTOO**
Das Konferenzportal zur Organisation, Verwaltung und Präsentation wissenschaftlicher Tagungen
www.contoo.de
-  **Managementwissen**
per Fernlehre kostengünstig
ortsunabhängig erwerben
Qualitätsmanager, Qualitätsbeauftragter
www.cqa.de
-  **Expedition Zukunft**
ScienceExpress – ein Wissenschaftszug
fährt quer durch Deutschland
www.expedition-zukunft.org
-  **Kernmechanik –**
von Kernspin bis Chemie,
von Dunkler Materie und Energie
www.kernmechanik.de
-  **SciLogs**
Die größte deutschsprachige Webseite
mit Wissenschaftsblogs
www.scilogs.de

Hier können Sie den Leserinnen und Lesern von Spektrum der Wissenschaft Ihre WWW-Adresse mitteilen. Für € 98,00 pro Monat (zzgl. MwSt.) erhalten Sie einen maximal fünfzeiligen Eintrag, der zusätzlich auf der Internetseite von Spektrum der Wissenschaft erscheint. Mehr Informationen dazu von

iq media-marketing gmbh
Susanne Förster
Telefon 0211 61 88-563
E-Mail: susanne.foerster@iqm.de



In Kürze

- ▶ Wohl kaum ein Astronom hat mit der enormen Vielfalt von Planeten außerhalb unseres Sonnensystems gerechnet.
- ▶ Die **ungewöhnlichsten Planetensysteme** finden sich rund um Neutronensterne und um Weiße oder Braune Zwerge.
- ▶ Auf der Suche nach Braunen Zwergen in unmittelbarer Nachbarschaft könnten wir bald auch auf **den der Erde nächstgelegenen Exoplaneten** stoßen. Selbst die Existenz von Leben ist dort denkbar – zumindest im Prinzip.

Selbst dort, wo sie nie damit gerechnet hätten, sind Astronomen mittlerweile auf Exoplaneten gestoßen. Die überraschendsten Erkenntnisse gewinnen die Forscher, wenn sie Planetensysteme rund um Braune und Weiße Zwerge sowie um Neutronensterne untersuchen.

Von Michael W. Werner und Michael A. Jura

Weiße Zwerge gehören zu den trostlosesten Anblicken, die der Himmel zu bieten hat. Auch wenn sich ihre Massen mit der unserer Sonne vergleichen lassen, sind sie zu mehr als einem schwachen Leuchten nicht in der Lage. Obendrein nimmt ihre Helligkeit immer weiter ab. Deshalb – weil sie dem üblichen Zusammenhang zwischen Sternmasse und Helligkeit nicht folgen – halten Astronomen sie nicht für Sterne im engeren Sinn, sondern für Sternleichen. Ihnen zufolge war jeder Weiße Zwerg einst ein Stern, der hell wie unsere Sonne leuchtete, bis ihm der Brennstoff ausging. Dann begann ein stürmischer Todeskampf: Er blähte sich auf das 100-Fache seiner ursprünglichen Größe auf, seine Helligkeit steigerte sich so-

gar um das 10000-Fache. Doch schließlich stieß er seine äußeren Schichten ab und schrumpfte zu einem verglimmenden Überrest von der Größe der Erde zusammen, der im Lauf der Jahrtausende endgültig verblasst wird.

Damit aber nicht genug. Gemeinsam mit Kollegen haben wir über ein Dutzend Weiße Zwerge in der Milchstraße entdeckt, die von Asteroiden, Kometen und vielleicht sogar Planeten umkreist werden. Solange die Sterne am Leben waren, gingen sie Tag für Tag am Himmel dieser Welten auf. Als sie aber starben, verdampften sie ihre inneren Planeten oder verschlangen und verbrannten sie. Zurück blieben nur die Himmelskörper in den kühlen äußeren Regionen der Systeme. Und auch etliche dieser Überlebenden zerrissen die Zwerge im Verlauf der folgenden Zeit. Solche dezimierten Systeme, Friedhöfe der Welten, lassen uns das Schicksal errahnen, das auch

PLANETEN wo keine sein dürften

RON MILLER

dem Sonnensystem bevorsteht – in fünf Milliarden Jahren, wenn die Sonne stirbt.

Schon lange hatten Astronomen vermutet, dass auch um andere Sterne Planeten kreisen. Wir stellten uns allerdings vor, dass wir Systeme finden würden, die dem unseren ähneln und über Zentralsterne ähnlich der Sonne verfügen. Als dann aber vor 15 Jahren eine Flut der Entdeckungen extrasolarer Planeten über uns hereinbrach, wurde sofort klar, dass sich deren Systeme erheblich von dem unserem unterscheiden können. Der erste sonnenähnliche Stern, bei dem ein Planet gefunden wurde, war 51 Pegasi. Um ihn kreist ein Himmelskörper, der massereicher als Jupiter ist, sein Zentralgestirn aber auf einer engeren Bahn als Merkur umrundet.

Als die Forscher ihr Instrumentarium verfeinerten, stießen sie auf immer seltsamere Gebilde. Den sonnenähnlichen Stern HD 40307 umrunden drei Planeten auf Bahnen, die weniger als halb so groß sind wie der Orbit Merkurs. Dabei sind sie vier- bis zehnmals so massereich wie die Erde. Der sonnenähnliche Stern 55 Cancri A wiederum besitzt gleich fünf Planeten, die das 10- bis 1000-Fache der Erdmasse aufweisen. Die Durchmesser ihrer Bahnen hingegen liegen zwischen einem

Zehntel des Merkurorbits und dem der Jupiterbahn. Dass wir auch Planetensysteme um Weiße Zwerge gefunden haben, zeigt darüber hinaus, dass die Zentralsterne nicht einmal sonnenähnlich sein müssen. Planeten und ihre Vorläufer können auch Himmelskörper umkreisen, die selbst nicht größer sind als Planeten. Tatsächlich ist die Vielfalt solcher Systeme ebenso groß wie die von Systemen um gewöhnliche Sterne.

Für die Astronomen kam all das höchst unerwartet: Weder hatten sie mit der Allgegenwart von Planetensystemen gerechnet noch mit der offensichtlichen Universalität der Prozesse, die zu ihrer Entstehung führen. Möglicherweise repräsentiert das Sonnensystem also weder die häufigste Form von Planetensystemen noch überhaupt einen Ort im Kosmos, an dem typischerweise Leben entstehen kann.

Schon die ersten extrasolaren Planeten, die je entdeckt wurden, fanden sich bei einem Objekt, das mit der Sonne kaum etwas gemeinsam hat: dem Neutronenstern PSR 1257+12. Auch Neutronensterne sind Sternleichen, allerdings herrschen dort viel extremere physikalische Bedingungen als in Weißen Zwergen. In einem nur 20 Kilometer großen Himmelskörper, vergleichbar den Ausmaßen eines kleinen

Braune Zwerge sind so klein – und einige kaum massereicher als große Planeten –, dass in ihnen das Feuer der Kernfusion nicht dauerhaft brennen kann. Kaum ein Astronom hielt daher bei solchen Kümmerlingen Ausschau nach Planeten. Und doch ist man dort ebenso wie an anderen unerwarteten Orten mittlerweile auf zahlreiche Planetensysteme gestoßen.

EIN GLIMMEN IN DER DUNKELHEIT

Im Allgemeinen gehen Astronomen indirekte Wege, um Planeten zu entdecken: Sie untersuchen deren Einfluss auf die Geschwindigkeit, Position oder Helligkeit ihres Sterns. In den meisten Fällen, die der nebenstehende Artikel beschreibt, konzentrieren sich die Forscher auf ein einziges indirektes Anzeichen: auf die Anwesenheit einer Staubscheibe um den Stern. Solche protoplanetaren Scheiben findet man um neugeborene Sterne, und Forscher halten sie für die Geburtsorte von Planeten. So genannte Trümmerscheiben finden sich dagegen um Sterne, die in der Entwicklung weiter fortgeschritten sind. Sie entstehen vermutlich, weil Asteroiden und Kometen miteinander kollidieren oder verdampfen. Damit scheint an diesem Ort auch die Existenz von Planeten jetzt oder in der Vergangenheit wahrscheinlich.

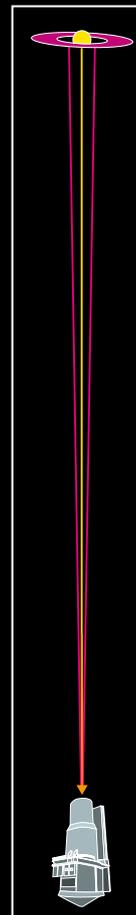
Die Scheibenarten lassen sich unterscheiden, indem man untersucht, wie sie Sternenlicht absorbieren und die absorbierte Energie im infraroten Bereich wieder abstrahlen (siehe Grafiken S. 27). Als sehr geeignet zur Entdeckung der Scheiben hat sich das 2003 gestartete NASA-Weltraumteleskop Spitzer erwiesen. Seine Weitwinkel-Infrarotkameras können mit einer einzigen Aufnahme Hunderte von Sternen erfassen und diejenigen identifizieren, bei denen sich Hinweise auf eine Scheibe zeigen und die deshalb eine genauere Untersuchung rechtfertigen.

Spitzer baut auf den Erfolgen vergangener Infrarot-Teleskope wie dem Infrared Astronomical Satellite (IRAS) in den 1980er Jahren und dem Infrared Space Ob-

servatory (ISO) der ESA Mitte der 1990er auf. Während IRAS den gesamten Himmel durchmusterte, beobachtet Spitzer einzelne Objekte und untersucht sie genauer. Fünf Jahre lang hatte sein Vorrat an flüssigem Helium zur Kühlung der Instrumente ausgereicht, länger als bei allen früheren Missionen. In dieser Zeit nahm Spitzer unterschiedlichste Objekte von extrasolaren Planeten bis zu Galaxien im frühen Universum in den Fokus.

Seit Mai dieses Jahres ist das Kühlmittel zwar verbraucht, und das Teleskop, das zuvor nahe dem absoluten Nullpunkt betrieben wurde, hat sich auf etwa 30 Kelvin erwärmt. Doch auch so kann es voraussichtlich noch bis Mitte 2011 Beobachtungen am kurzwelligen Ende des Infrarot vornehmen. Den gesamten Infrarotbereich decken derweil neuere Projekte ab: das im Mai gestartete europäische Weltraumobservatorium Herschel und ab 2013 auch das geplante James Webb Space Telescope (JWST).

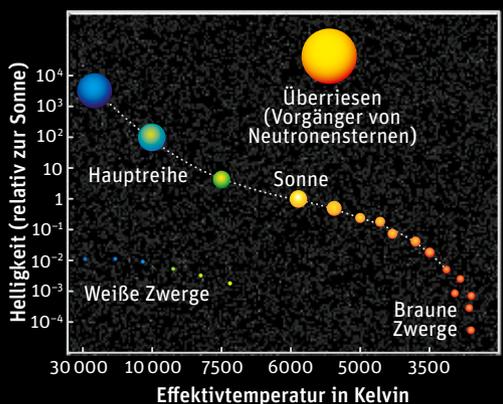
Oft lässt sich das System auf Grund seiner großen Entfernung nicht räumlich auflösen, Scheibe und Stern werden also nicht getrennt sichtbar. Doch an den aufgenommenen Spektren können die Forscher ablesen, dass sich in ihnen zwei unterschiedliche Komponenten überlagern.



Lange Zeit suchten die Astronomen ihr Glück auf der so genannten Hauptreihe. Hier finden sich die »gewöhnlichen« Sterne, deren Helligkeit in einem festen Zusammenhang mit ihrer Temperatur steht, und hier hielten die Forscher auch die Existenz von Planetensystemen ähnlich dem Sonnensystem für besonders wahrscheinlich. Inzwischen haben sie jedoch zahlreiche Planetensysteme um Zentralsterne fernab der Hauptreihe gefunden, beispielsweise um Weiße oder Braune Zwerge.

Asteroiden, ist mehr als die Masse der Sonne zusammengepackt. Solche kompakten Objekte entstehen, wenn ein Stern mit 20-facher Sonnenmasse als Supernova explodiert.

Dass Planeten ein derartiges Ereignis überstehen, ist schwer vorstellbar, die Funde könnten aber aus der Asche der Supernova entstanden sein. Dafür spricht ein weiterer Umstand: Der Radius von PSR 1257+12 betrug vor der Explosion wohl mehr als eine Astronomische Einheit (1 AE ist der Abstand zwischen Erde und Sonne). Also reichte der Stern über die Umlaufbahnen der Planeten hinaus, die wir heute bei ihm beobachten.



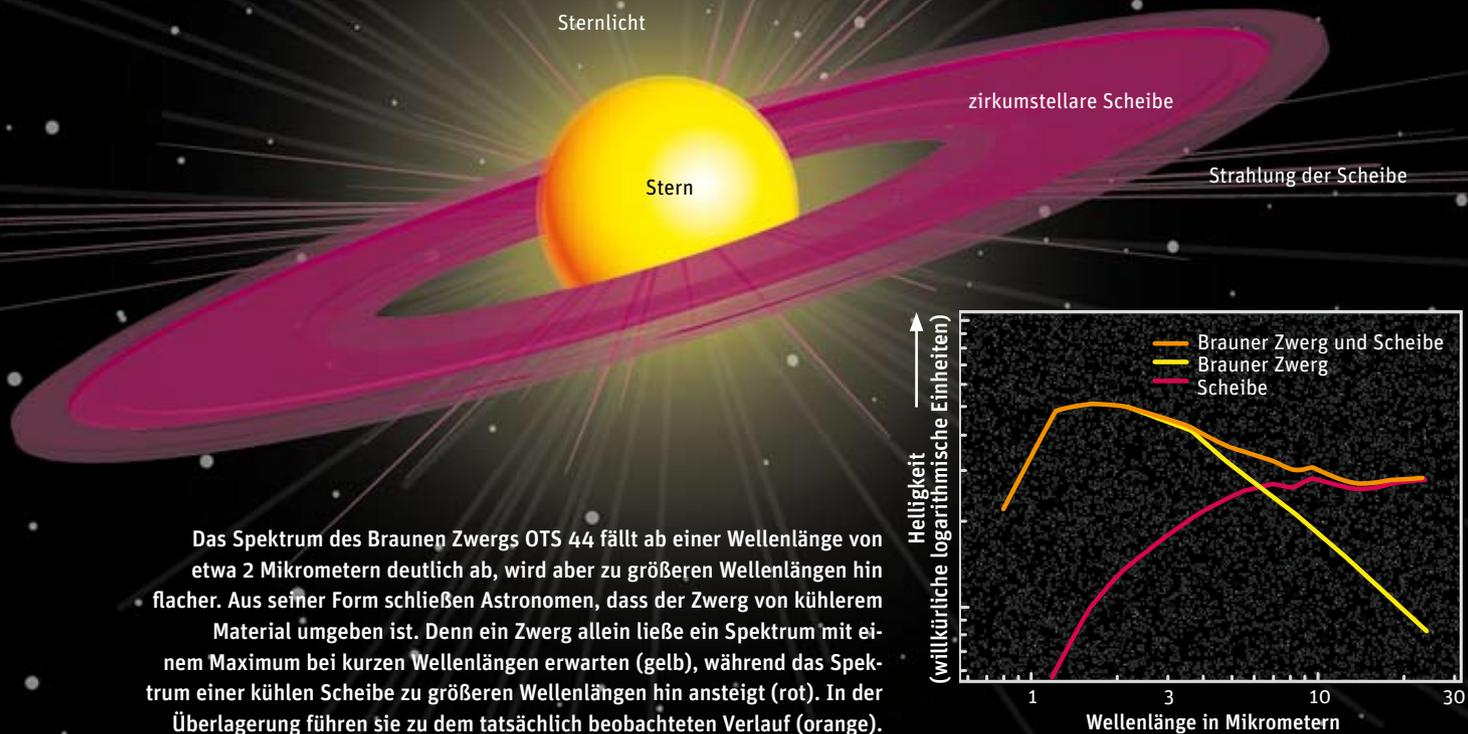
Explodierende Sterne schleudern zwar den Großteil ihrer Materie in den interstellaren Raum hinaus. Doch ein kleiner Teil bleibt gravitativ gebunden und bildet eine wirbelnde Scheibe um den Sternüberrest. Solche Scheiben aber sind die Geburtsorte von Planeten. Auch unser eigenes Sonnensystem ist wohl aus einer amorphen interstellaren Wolke aus Gas und Staub entstanden, die schließlich unter ihrem eigenen Gewicht kollabierte. Bei diesem Vorgang verhindert das Gesetz der Drehimpulserhaltung, dass die gesamte Materie in den neugeborenen Stern hineinfällt. Stattdessen sammelt sich ein Teil in einer pfannkuchenförmigen Gas- und Staubstruktur an, aus der dann Planeten entstehen können (siehe »Die chaotische Geburt der Planeten«, SdW 6/2008, S. 24).

Entdeckt hatten die Astronomen das System um PSR 1257+12, weil die Radiopulse des Neutronensterns periodische Schwankungen aufweisen. Denn die Schwerkraft der Planeten zerrt leicht an ihm, verschiebt seine Position nach regelmäßigen Mustern und verändert damit auch die Entfernung, die die Pulse zur Erde zurücklegen müssen. Nach vergleichbaren Systemen fahnden die Forscher bislang erfolglos. Zwar besitzt auch ein anderer Pulsar, PSR B1620-26, mindestens einen Planeten. Doch

SO VERRATEN SICH DIE GEBURTSORTE DER PLANETEN

Eine den Stern umgebende Scheibe aus Gas und Staub – ganz ähnlich jener, aus der auch die Planeten unseres Sonnensystems entstanden – absorbiert Licht dieses Sterns und sendet selbst infra-

rote Strahlung aus. Astronomen beobachten also eine Überlagerung aus dem direkt abgestrahlten Licht des Sterns und der Emission der Scheibe.



weil ihn dieser in einem auffallend großen Orbit umkreist, vermuten die Forscher, dass der Planet wohl von einem anderen Stern stammt, also gravitativ eingefangen wurde und eben nicht aus den Trümmern der Supernova entstand.

Im Jahr 2006 stieß das Spitzer-Weltraumteleskop der NASA immerhin auf unerwartete Infrarotemissionen des Neutronensterns 4U 0142+61. Die Strahlung könnte aus der Magnetosphäre des Sterns stammen – oder aber aus einer ihn umgebenden Gas- und Staubscheibe. 4U 0142+61 ist der Überrest einer Supernova, die vor 100 000 Jahren explodierte. Typischerweise dauert es rund eine Million Jahre, bis sich in einer solchen Scheibe Planeten bilden. Dort könnte also tatsächlich ein ähnliches System wie um PSR 1257+12 entstehen.

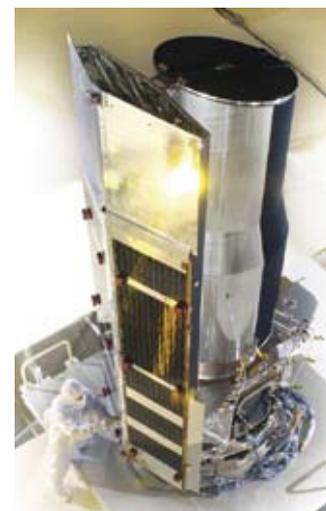
Kürzlich einen Asteroiden zerfetzt

Von Scheiben sind auch viele Weiße Zwerge umgeben. Dieser Typ von Scheiben allerdings ist nicht nur ein Hinweis darauf, dass sich dort Objekte in einem Orbit befinden, vielmehr zeigt er ihre tatsächliche Existenz an. Wie bei 4U 0142+61 liefert Infrarotstrahlung den entscheidenden Hinweis. 1987 stieß die auf dem hawaiianischen Mauna Kea gelegene Infrared Telescope Facility der NASA bei dem

Weißen Zwerg G29-38 auf überraschend intensive infrarote Emissionen. Dem Spektrum zufolge stammt dieser so genannte Infrarotexzess von einem Körper mit einer Temperatur von 1200 Kelvin – das ist viel kühler als die 12 000 Kelvin heiße Oberfläche des Sterns. Zunächst dachten die Astronomen, der Zwerg werde von einem zweiten Stern umkreist. Doch Beobachtungen im Jahr 1990 zeigten, dass die Infrarotemission im Gleichschritt mit der Helligkeit des Weißen Zwergs variiert – es muss sich also letztlich um Sternlicht handeln, das reflektiert oder durch andere physikalische Prozesse verändert wurde. Als plausibelste Erklärung bietet sich eine zirkumstellare Scheibe an, die von dem Zwergstern aufgeheizt wird.

Der Zwerg besitzt noch eine weitere seltsame Eigenschaft: Seine Außenschichten enthalten Elemente wie Kalzium und Eisen. Doch die Schwerkraft an der Oberfläche eines Weißen Zwergs ist so groß, dass diese schweren Elemente eigentlich in sein Inneres hinabsinken sollten. Im Jahr 2003 schlug einer von uns, Michael A. Jura, ein einfaches Modell vor, das sowohl die Anwesenheit von schweren Elementen als auch den Infrarotexzess erklärte: Offenbar hat der Weiße Zwerg kürzlich einen Asteroiden zerfetzt, als dieser in sein starkes

Das Weltraumteleskop Spitzer (im Bild noch im Bau) entdeckte bereits viele Gas- und Staubscheiben. Erst jüngst stieß es auch auf Spuren der gewaltigen Kollision eines mond- und eines merkurgroßen Himmelskörpers um den jungen Stern HD 172555. In dessen Gas- und Staubscheibe ist die Planetenentstehung noch in vollem Gang.



Gravitationsfeld eindrang. In einer Serie von Kollisionen wurden die Trümmer des Asteroiden dann weiter zerkleinert und bildeten schließlich eine rotierende Staubscheibe, aus der nun Materie auf den Stern herabregnet.

Inzwischen haben Beobachtungen dieses Szenario bestätigt. Mit Hilfe von bodengebundenen Teleskopen sowie dem Spitzer-Teleskop spürten Astronomen insgesamt 15 Weiße Zwerge mit ähnlichen Infrarotexzessen und Anomalien in der chemischen Zusammensetzung auf. Bei G29-38 und sieben weiteren Sternen identifizierte Spitzer sogar die Infrarotemission von Silikaten in den Scheiben. (Diese Stoffgruppe macht auch den Hauptbestandteil von Erdkruste und Erdmantel aus.) Sie ähneln jenen, die in Staubteilchen in unserem eigenen Sonnensystem gefunden wurden, unterscheiden sich aber von interstellaren Silikaten (siehe Kasten rechte Seite).

Darüber hinaus enthalten die Außenschichten der Sterne zwar schwere Elemente, diese sind aber in sehr unterschiedlichen Anteilen zu finden. Flüchtige Elemente wie Kohlenstoff und Natrium sind seltener; häufig sind dagegen solche, die eher in fester Form vorlie-

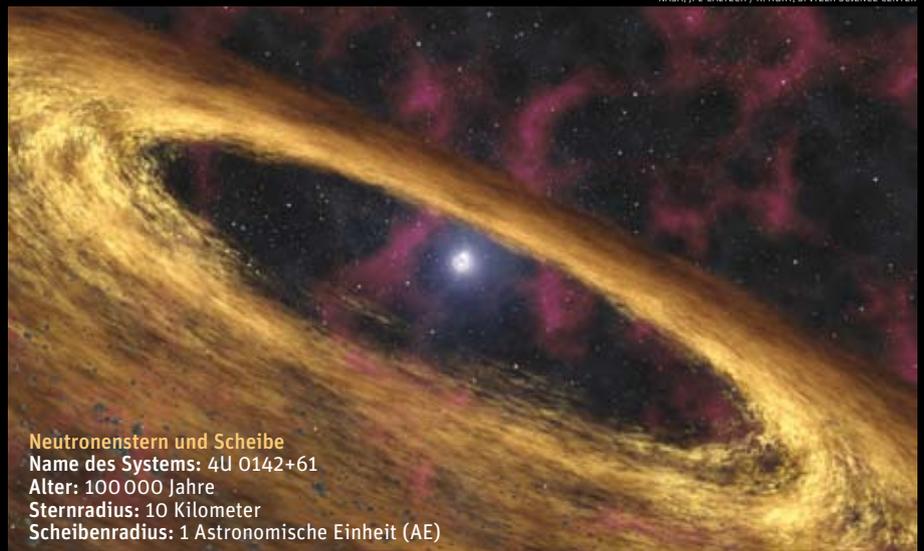
gen, wie Silizium, Eisen und Magnesium. Ein ähnliches Muster findet sich auch bei Asteroiden und felsigen Planeten im Sonnensystem. Beide Beobachtungen unterstützen also die Vermutung, dass die untersuchten Scheiben aus zermahlenden Asteroiden bestehen.

Die Messung von Infrarotemissionen erlaubt auch die Abschätzung, dass die Scheiben Weißer Zwerge höchstens ein Hundertstel einer Astronomischen Einheit von ihrem Zentralgestirn entfernt sind. Ihre Masse dürfte derjenigen eines Asteroiden mit 30 Kilometer Durchmesser entsprechen. Auch das ist konsistent mit der Vorstellung, dass die Scheibe durch den Zerfall eines solchen Himmelskörpers entstanden ist. Diese Art von Scheiben sollten wir daher als Hinweis betrachten, dass ein Teil des früheren planetaren Materials den Niedergang des Sterns überlebt hat.

Theoretische Berechnungen deuten darauf hin, dass Asteroiden und erdähnliche Planeten der Zerstörung dann entkommen können, wenn sie weiter als eine Astronomische Einheit von ihrem Stern entfernt sind. Stirbt die Sonne, könnte der Mars also das Ereignis überstehen. Bei der Erde ist das nicht so sicher.

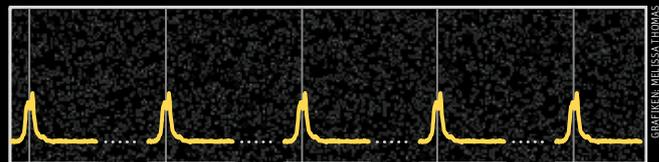
RINGS UM DIE NEUTRONENSONNE

Damit hatten wohl die wenigsten Astronomen gerechnet: Sie entdeckten, dass Neutronensterne die Zentralobjekte von Planetensystemen sein können. 4U 0142+61 ist der Überrest eines Sterns, der vor 100 000 Jahren als Supernova explodierte. Er ist eingebettet in eine Scheibe aus Materie, den Trümmern der Sternexplosion (siehe Illustration rechts). Aus ihnen können sich (erneut) Vorläufer von Planeten bilden.



Der Neutronenstern PSR 1257+12 sendet kontinuierlich Radiopulse aus, die sich auf der Erde messen lassen. Solche Signale treffen normalerweise in exakt gleichmäßigen Abständen ein (oben), nicht aber in diesem Fall. Aus den leichten zeitlichen Schwankungen schließen die Forscher, dass die Anziehungskräfte dreier sich bewegender Begleiter an dem Stern zerran (unten).

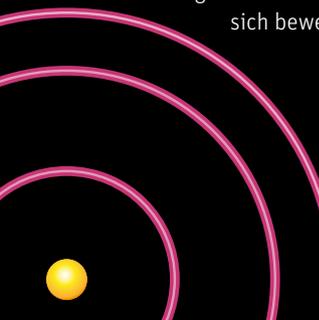
gleichmäßige Pulse (keine Planeten)



variierende Pulsabstände (Planeten)



Neutronenstern und Planeten
 Name des Systems: PSR 1257+12
 Alter: 800 Millionen Jahre
 Sternradius: 10 Kilometer
 Radien der Planetenbahnen: 0,19, 0,36 und 0,46 AE
 Planetenmassen: 0,02, 4,3 und 3,9 Erdmassen



Um herauszufinden, welches Schicksal die verschiedenen Bestandteile eines Planetensystems beim Tod ihres Sterns erleiden, richteten Astronomen die Instrumente von Spitzer vor rund drei Jahren auf den Weißen Zwerg WD 2226-210 aus. Er ist so jung, dass die Außen-schichten des ursprünglich sonnenähnlichen Sterns noch immer als beeindruckender Planetarischer Nebel sichtbar sind und auf den Namen »Helixnebel« getauft wurden (siehe »Der ungewöhnliche Tod gewöhnlicher Sterne«, SdW 9/2004, S. 26).

Stellare Kümmerlinge als Planetenheimat

WD 2226-210 stellt also das Bindeglied zwischen sonnenähnlichen Sternen und älteren Weißen Zwergen wie G29-38 dar. Der junge Zwerg ist in einem Abstand von rund 100 AE von einer staubigen Scheibe umgeben; in den Zwischenraum würde unser gesamtes Sonnensystem hineinpassen. Die Scheibe erstreckt sich damit weiter als bei anderen weißen Zwergen – zu weit auch, als dass sie aus den Trümmern von Asteroiden entstanden sein könnte, die von der Schwerkraft des Zwergsterns zer-

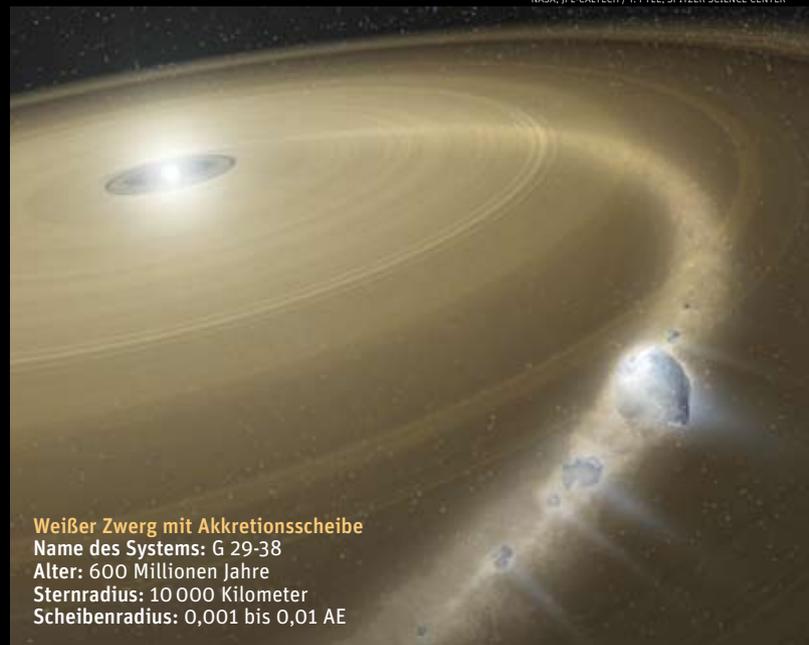
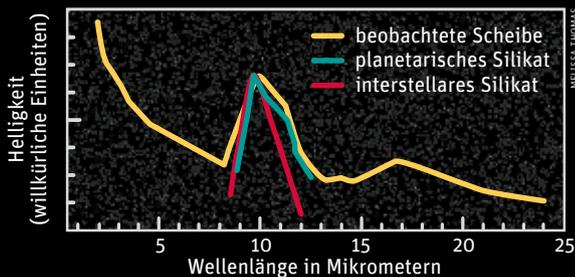
rissen wurden. Stattdessen muss die Scheibe aus Staub bestehen, der beim Zusammenstoß von Asteroiden und Kometen freigesetzt wurde. Ähnliche Trümmerscheiben findet man bei der Sonne und bei sonnenähnlichen Sternen (siehe »Suche nach der Nadel in stellaren Staubhaufen«, SdW 10/2004, S. 30).

Wenn Asteroiden und Kometen auf weiten Bahnen den Tod ihres Sterns überstehen können, wie diese Untersuchungen bestätigt haben, ist von den viel stabileren Planeten dasselbe zu erwarten.

Eine dritte Art von Zentralgestirnen, die nur wenig Ähnlichkeit mit der Sonne aufweisen, sind Braune Zwerge. Anders als ihre »weißen« Pendanten, die »Sternleichen«, sind sie vielmehr stellare Kümmerlinge. Ihr Wachstum begann wie bei einem gewöhnlichen Stern, doch es endete früher, nämlich spätestens dann, wenn ihre Masse knapp acht Prozent der Sonnenmasse betrug. Oberhalb dieser Grenze wären die stellaren Kerne heiß und dicht genug geworden, so dass eine dauerhafte Kernfusion hätte zünden können. Braune Zwerge hingegen senden gerade einmal ein schwaches infrarotes Glimmen aus. Auf diese

SYSTEME UM WEISSE ZWERGE

Viele Weiße Zwerge sind von kleinen Scheiben umgeben, wahrscheinlich den Überresten eines Asteroiden (Illustration rechts). In einigen Scheiben wiesen die Forscher die spektrale Signatur von Silikat nach (gelbe Kurve im Diagramm). Sie gleicht derjenigen von planetarem (türkise Kurve), aber nicht dem von interstellarem Silikat (rote Kurve). Auch weitere Indizien deuten darauf hin, dass Begleiter des ursprünglichen Sterns, vielleicht sogar Planeten, seine Explosion und die Entstehung des Weißen Zwergs überstanden haben und in Außenbereichen des Systems noch immer ihre Bahnen ziehen.



Der rote Punkt in der Mitte dieser Infrarotaufnahme des Helixnebels mit seinem Zentralstern WD 2226-210 deutet auf einen zweiten Typ von Trümmerscheibe hin, wie sie sich um einen Weißen Zwerg bilden kann. (Der Zwerg selbst zeigt sich als kaum sichtbarer weißer Punkt in der Mitte des Bildes; abgestoßene Gasschichten sind bläulich grün dargestellt.) Wahrscheinlich ist diese Scheibe äquivalent zu dem aus Kometen bestehenden Kuipergürtel, der sich um unser eigenes Sonnensystem zieht. Sichtbar ist die Scheibe allerdings nur, weil WD 2226-210 noch sehr jung ist und daher noch ausreichend Licht abstrahlt, um sie zu beleuchten.

PAUSE BEI DER PLANETENJAGD?

Die Astronomen stehen kurz davor, erdähnliche Planeten zu finden. Aber sie sind noch weit davon entfernt, Leben auf ihnen nachzuweisen.

Von Donald Goldsmith

Am 7. März dieses Jahres ging das NASA-Weltraumteleskop Kepler auf eine vierjährige Reise, um nach erdähnlichen Planeten in der Milchstraße zu suchen. Wie sein Vorgänger, das im Dezember 2006 gestartete französisch-europäische Teleskop Corot, überwacht Kepler eine Auswahl von Sternen, um vorübergehende Verringerungen ihrer Helligkeit nachzuweisen. Eine vereinzelte Abschwächung kann dabei alles Mögliche bedeuten; vielleicht hat sich einfach kurzfristig die Energieproduktion des Sterns verändert. Auch eine zweite Abschwächung einige Zeit später ist noch nicht aussagekräftig. Aber wenn nach wiederum derselben Zeitspanne eine dritte Abschwächung eintritt, dann gilt das schon als sehr deutlicher Hinweis darauf, dass der Stern von einem Planeten umkreist wird. Und bei der vierten Abschwächung sind sich die Forscher ihrer Sache nahezu sicher.

Die Erklärung des Phänomens ist einfach: Exoplaneten, die auf ihrer Bahn unsere Sichtlinie zu dem Stern queren, verdecken bei jedem dieser Transits einen kleinen Teil des Sternlichts, das in unsere Teleskope fällt. So kann ein erdgroßer Planet die Intensität des Lichts um etwa ein Zehntausendstel verringern (siehe »Die Suche nach erdähnlichen Planeten«, SdW 1/2001, S. 42).

In diesem Jahr stieß Corot beispielsweise auf einen Planeten mit etwa doppeltem Erddurchmesser, der seinen Stern alle 20 Stunden auf einer extrem engen Bahn umkreist. Kepler indessen, ausgestattet mit einem dreieinhalbmal größeren Spiegel, sollte Dutzende oder gar Hunderte von Erden finden – auch solche, die sich in weiteren Abständen um ihre Sterne bewegen, also noch weniger Licht abdecken.

Die meisten gegenwärtigen Suchprogramme verfolgen hingegen eine andere Strategie. Sie halten Ausschau nach Sternen, die sich durch die Anziehungskraft von Planeten ein klein wenig aus ihrer Position verrücken lassen. Die relativ kleinen Welten, die Corot und Kepler mit der Transitmethode zu entdecken hoffen, können sie mit diesem Verfahren aber nicht nachweisen.

Allerdings funktioniert auch die Transitmethode nur, wenn ein Planet aus Sicht irdischer Astronomen tatsächlich vor seinem Stern vorüberzieht, was statistisch nur bei etwa jedem hundertsten System der Fall ist. Trotzdem sollte Kepler in der Lage sein, eine ausreichend große Stichprobe der galaktischen Cousins der Erde zu liefern.

Doch selbst dann fehlen den Astronomen noch immer die wichtigsten Informationen: Welche Bedingungen herrschen auf diesen Planeten? Und kann es dort Leben geben? Zieht etwa ein

Gasriese vor seinem Stern vorüber, können die Forscher anhand seines Spektrums, also der unterschiedlich starken Lichtabsorption bei verschiedenen Wellenlängen, seine Atmosphäre analysieren. Bei den kleinen erdähnlichen Planeten versagt diese Methode jedoch. Kepler und Corot werden also weder die charakteristischen Farben von Chlorophyll oder dessen extraterrestrischen Pendanten (siehe »Fotosynthese unter fremden Sternen«, SdW 10/2008, S. 30) noch andere Parameter messen, die für Leben sprechen könnten. Selbst die Space Interferometry Mission SIM Lite, deren Start 2015 erfolgen könnte, wird uns über die Erden, die sie entdeckt, kaum mehr verraten.

Die Bewohnbarkeit von Exoplaneten lässt sich nur mit extrem teuren Instrumenten untersuchen. Nicht zuletzt darum stecken der Terrestrial Planet Finder (TPF) der NASA und die Darwin-Mission der ESA, die spektroskopische Messungen von Planetenatmosphären und -oberflächen durchführen könnten, noch in der Entwurfsphase. Selbst wenn sich die Weltraumorganisationen zusammenschließen: Eine solche Mission würde gut zwei Milliarden Euro kosten, und man müsste eine Bauzeit von zehn Jahren veranschlagen.

Ihre Hoffnungen, wenigstens einige genauere Informationen über extrasolare Planeten zu erhalten, können die Astronomen

vorerst nur auf das James Webb Space Telescope (JWST) setzen. Es soll 2013 starten und könnte unter günstigen Umständen Informationen über Biomarker wie Ozon oder Methan liefern. Auch die nächste Generation von irdischen Großteleskopen (siehe »Riesenteleskope der Zukunft«, SdW 8/2006, S. 28) wird sich als nützlich erweisen, obgleich diese nicht ausdrücklich für die Untersuchung von extra-

solaren Planeten entworfen werden. Denn wie auch das JWST wird man sie mit Koronografen ausstatten. Diese Instrumente blenden das Licht von Sternen aus und machen so den schwachen Schein kleinerer Körper in ihrer Umgebung sichtbar, die von ihrem Stern sonst überstrahlt werden. Sie könnten immerhin Bilder junger Gasriesen um nahe Sterne liefern – wenn es dort denn welche gibt – und spektroskopische Informationen über Objekte auf engen Bahnen sammeln.

Sobald die Missionen von Kepler und Corot enden, wird also erst einmal eine eher unbefriedigende Zeit anbrechen, in der wir nur hoffen können, dass die Erfolge der jetzigen Unternehmungen bald zum Bau der nächsten Generation von Weltraumteleskopen führen. Bis wir wirklich wissen, welche Stellung unser Planet im Kosmos einnimmt, liegt noch ein langer Weg vor uns.

Donald Goldsmith ist Autor einer Reihe astronomischer Bücher (zuletzt erschien »400 Years of the Telescope«, Interstellar Media Productions, 2009) und war Wissenschaftsredakteur sowie Koautor amerikanischer Fernsehproduktionen.



Exoplaneten verraten sich, wenn sie vor ihrer Sonne vorbeiziehen und deren Licht teilweise abblenden.

FUNDE AUCH UM BRAUNE ZWERGE?

NASA/JPL-CALTECH/T. PYLE, SPITZER SCIENCE CENTER

Brauner Zwerg mit Scheibe
 Name des Systems: OTS 44
 Alter: 2 Millionen Jahre
 Sternradius: 100 000 Kilometer
 Scheibenradius: 0,01 bis 0,1 AE

Weise strahlen sie die während ihrer Entstehungszeit und vielleicht in einer frühen, aber vorübergehenden Phase der Kernfusion entstandene Hitze wieder ab.

Hunderte solcher Objekte haben astronomische Durchmusterungen in den vergangenen 15 Jahren aufgespürt. Der masseärmste unter ihnen ist nur geringfügig schwerer als ein Riesenplanet. Doch selbst die kleinsten Braunen Zwerge können, so belegen Beobachtungen, von Scheiben umgeben sein und folglich auch Planeten besitzen (siehe »Der geheimnisvolle Ursprung der Braunen Zwerge«, SdW 5/2006, S. 42). Die Scheiben um Braune Zwerge durchlaufen nämlich eine ganze Reihe systematischer Veränderungen, wie sich anhand vergleichender Beobachtungen vieler Exemplare zeigen lässt. Dazu gehört eine auffällige Verminderung der Infrarotstrahlung von Silikaten, die sich auf die Verklumpung von Staubteilchen zu größeren Partikeln zurückführen lässt. Solche Veränderungen beobachten die Forscher auch in den Scheiben um größere Sterne und interpretieren sie hier als Zeichen für das Wachsen von Planetenbausteinen.

Zwar sind die Scheiben um Braune Zwerge recht massearm, ausreichend Material für einen Uranus oder einen Neptun besitzen sie jedoch. Schon liegen auch Meldungen mehrerer Astronomen vor, die glauben, Planeten bei Braunen Zwergen entdeckt zu haben. Die endgültige Bestätigung ihrer Funde steht bislang allerdings aus.

In Kürze lässt sich der Stand der Forschung so zusammenfassen: Bei mindestens einem Neutronenstern wurden Planeten gefunden; bei über einem Dutzend Weißer Zwerge entdeckten Forscher Asteroiden und Kometen; und rund um Braune Zwerge zeigen sich Hinweise auf frühe Phasen der Planetenentstehung. Zwei wichtige Zielsetzungen verknüpfen sich mit der Untersuchung dieser und anderer extrasolarer Systeme. Erstens hoffen die Forscher, daraus vieles über die Entwicklung

und großräumige Struktur unseres eigenen Sonnensystems zu lernen. Denn aus unserer räumlich und zeitlich beschränkten Perspektive lassen sich diese Erkenntnisse nur sehr eingeschränkt gewinnen. Dann können wir das Sonnensystem im richtigen Kontext sehen: Handelt es sich um ein typisches Planetensystem oder eher um einen kosmischen Ausnahmefall? Folgt die Entstehung von Planetensystemen trotz ihrer großen Unterschiede einem gemeinsamen Entwicklungspfad? Die Ähnlichkeiten in der Zusammensetzung der Asteroiden im Sonnensystem und jener des Materials, das auf Weiße Zwerge herabgerechnet ist, deuten die Antwort schon an. Das zweite Ziel lautet, herauszufinden, wie häufig Leben im Universum ist. In der galaktischen Nachbarschaft der Erde finden sich fast ebenso viele Braune Zwerge wie Sterne. Unser nächster Nachbar könnte also ein noch unentdeckter Brauner Zwerg sein. Vielleicht kreisen um ihn sogar die uns am nächsten liegenden extrasolaren Planeten.

Noch in diesem Jahr plant die NASA darum den Start des »Wide-field Infrared Survey Explorers«. Der Satellit könnte gleich mehrere Braune Zwerge in unmittelbarer Nachbarschaft aufspüren. Sollte sich herausstellen, dass tatsächlich erdähnliche Planeten um Braune Zwerge entstehen, würde dies nicht nur die Zahl möglicher lebensfreundlicher Welten im Kosmos erhöhen, sondern sogar die faszinierende Möglichkeit eröffnen, dass extraterrestrisches Leben im Licht eines Braunen Zwergs existiert. Zudem können vielleicht nicht nur Planeten, sondern auch Lebewesen das Ende eines sonnenähnlichen Sterns überstehen, zumindest wenn es ihnen gelingen sollte, sich an die dann drastisch veränderten Bedingungen anzupassen. Der Fund von Asteroiden und Kometen um Weiße Zwerge deutet diese Möglichkeit zumindest an – und letztlich wären dann nicht einmal Weiße Zwerge ein so trostloser Anblick, als den wir sie bisher empfinden. ◀

Viele Braune Zwerge besitzen Scheiben, in denen möglicherweise Planeten entstehen. Erste Funde sind allerdings noch unbestätigt. Die Scheibe um OTS 44 enthält immerhin ausreichend Material, um Objekte wie Uranus oder Neptun hervorzubringen. OTS 44 ist rund zwei Millionen Jahre alt – ähnlich alt wie unsere Sonne, als rings um sie herum die Planetenentstehung einsetzte.



Michael W. Werner (links) ist Projektwissenschaftler im Spitzer-Team der NASA und Chefwissenschaftler für Astronomie und Physik am Jet Propulsion Laboratory der NASA im kalifornischen Pasadena. Seit über 35 Jahren widmet er sich der Infrarotastronomie und untersuchte in dieser Zeit die Entstehung von Sternen, das interstellare Medium und die Zentralregion der Milchstraße. **Michael A. Jura** ist Professor für Astronomie an der University of California in Los Angeles. Seine Arbeitsgebiete sind die Astrophysik kühler Regionen niedriger Dichte und extrasolare Planetensysteme.

Jura, M. A. et al.: Externally-Polluted White Dwarfs with Dust Disks. In: *Astrophysical Journal* 663(2), S. 1285–1290, 10. Juli 2007.

Werner, M. W. et al.: First Fruits of the Spitzer Space Telescope: Galactic and Solar System Studies. In: *Annual Reviews of Astronomy and Astrophysics* 44, S. 269–321, 2006.

Zuckerman, B. et al.: The Chemical Composition of an Extrasolar Minor Planet. In: *Astrophysical Journal* 671(1), S. 872–877, 10. Dezember 2007.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/1005448.

🔊 Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Magnetische Taschenspielertricks

Warum Magnete abgebrannte Streichhölzer anziehen, hingegen von Kirschen als abstoßend empfunden werden.

Um in der Lehre vom Magnetismus weiter zu kommen, müßte man Magnete machen, die sich zu gewöhnlichen verhielten, wie Herschels großes Teleskop zu einem Taschen-Perspectiv.

Georg Christoph Lichtenberg (1742–1799)

Zu Beginn des Zeitalters des Elektromagnetismus vermutete Georg Christoph Lichtenberg die Existenz verborgener magnetischer Phänomene, die nur deshalb verborgen blieben, weil die damaligen Magnete zu klein waren. Er behielt Recht, denn große, also vor allem starke Magnete sollten in der Folgezeit wesentlich helfen, das Verständnis der elektromagnetischen Kräfte zu erweitern.

Heute sind »Supermagnete« im Miniaturformat aus Neodym-Eisen-Bor (NeFeB) für jedermann erschwinglich, etwa bei supermagnete.de. Sie lassen uns einen Hauch des Zaubers wiederentdecken, der, wie Lichtenberg schrieb, den Anfängen innewohnte, »da der Magnet selbst (...) nur den Taschenspielern diene«. Jetzt können wir nämlich feststellen, dass ein Streichholz mit einem dunklen Köpfchen, das sich sonst nicht weiter um Magnete schert, plötzlich daran haften bleibt, sobald sein Kopf abgebrannt ist.

Wie kann das sein? Die Angelegenheit erweist sich als raffiniert. Zwar ist Eisenoxid, Fe_2O_3 , von Anfang an im Streichholzkopf vorhanden. Allerdings ist es paramagnetisch, also nur dann magnetisch, wenn ein äußeres Magnetfeld einwirkt. Sein magnetisches Moment ist aber offenbar zu klein, als dass es sich vom Magneten zu einer sichtbaren Reaktion veranlassen ließe. Einer Idee Michael Worbs' zufolge entsteht während der Verbrennung jedoch möglicherweise Magnetit, Fe_3O_4 , denn schließlich ist auch Schwefel mit im Spiel: $6 \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{S} \rightarrow 4 \text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{SO}_2$. Das ferrimagnetische Magnetit – in ihm sind die Elementarmagnete so ausgerichtet, dass sich ihre magnetischen Momente zum Teil aufheben, eine Richtung aber überwiegt – besitzt ein viel größeres resultierendes Moment als Fe_2O_3 und kann die Gewichtskraft des Hölzchens durch seine Anziehungskraft kompensieren.

Diese Idee stützt der Befund, dass ein nicht verbranntes Streichholzköpfchen durchaus reagiert, wenn man es nämlich in winzige Bruchstücke zerkleinert. Hält man über die Teilchen nun einen Supermagneten, so springen sie ihn an wie Flöhe und bleiben haften.



BEIDE FOTOS: H. JOACHIM SCHLICHTING

Woher aber dieser Sinneswandel? Dank der Verkleinerung des Volumens (das mit der dritten Potenz sinkt) nimmt die Gewichtskraft stärker ab als die Fläche (nur mit der zweiten Potenz), die den Magneten berührt. Da die magnetische Anziehungskraft wiederum mit der Fläche, genauer: der Zahl der magnetischen Feldlinien, variiert, nimmt sie weniger stark ab als die Gewichtskraft – das zerbröselte Zündmaterial wird schließlich getragen.

Befestigt man zwei Kirschen an den Enden eines an einem Faden hängenden Stäbchens und bringt dieses sorgfältig ins Gleichgewicht, lässt sich auch mit diesen zaubern. Nähert man einer von ihnen nun einen Supermagneten an, wird sie abgestoßen. Von der anderen Seite kommend kann man die Kirschenschaukel auch wieder abbremsen und sie in die umgekehrte Richtung treiben. Schuld ist allein das in den Früchten reichlich vorhandene diamagnetische Wasser: Denn ein Diamagnet erzeugt unter dem Einfluss eines Magneten ein das Feld schwächendes Gegenmoment. So tut die Kirsche das Klügste, was sie tun kann: Sie wehrt sich gegen das Eindringen der Magnetfeldlinien, indem sie flüchtet. <

Die Kirsche ergreift die Flucht, gleich, von welcher Seite sich der Magnet nähert (Foto links). Und ein Streichholz kann zwar abgebrannt, dafür aber im Besitz eines relativ großen magnetischen Moments sein (rechts).

Literaturhinweis:
Worbs, M.: »Du, Papa, warum sind Streichhölzer magnetisch?«
In: Praxis der Naturwissenschaft 58(4), S. 45–46, 2009.



H. Joachim Schlichting ist Professor und Direktor des Instituts für Didaktik der Physik an der Universität Münster.

VOM GEN ZUM PRODUKT – aber mit System

In Kürze

- ▶ Selbst einfache Zellen, wie Bakterien, sind bereits komplizierte lebende Systeme mit **zahllosen dynamischen Interaktionen** zwischen ihren Komponenten. Das macht ihr Verhalten buchstäblich schwer berechenbar und damit biotechnisch zu einem Problem.
- ▶ Ein moderner Ansatz – die Systembiologie – ermöglicht es, zentrale zelluläre Abläufe **als Ganzes** zu erfassen und in bioinformatischen Modellen zu verarbeiten.
- ▶ Noch weiter wird nun die Systembiotechnologie gehen, indem sie den gesamten angestrebten industriellen Herstellungsprozess mit erfasst und **in die Berechnungen** einbezieht.
- ▶ Ihr Ziel: den Gesamtprozess **virtuell durchzuspielen**, auf diesem Weg zu **optimieren** und somit beschleunigt in die Praxis umzusetzen. Damit wäre ein Biopharmakon umweltverträglich, preiswerter und hocheffizient in den nötigen Mengen herzustellen.

Die Herstellung von biotechnologisch erzeugten Proteinen, darunter vielen Pharmazeutika, wird von einem neuen integrativen Ansatz profitieren: Er ergründet systematisch das biologische Verhalten der Produktionsorganismen, um am Ende alle Schritte bis zur Einsatzweise des gewünschten Produkts mathematisch modellieren und optimieren zu können.

Von Meinhard Schilling, Dietmar Christian Hempel und Dieter Jahn

Das Prinzip klingt so einfach: Man schleuse das richtige Gen in Bakterien oder andere kultivierbare Zellen ein, lasse sie das zugehörige Protein im Bioreaktor erzeugen – und schon hat man in Mengen das gewünschte biopharmazeutische Produkt, etwa einen monoklonalen Antikörper gegen Krebs. Aber selbst einfache Zellen, wie Bakterien, sind bereits komplizierte lebende Systeme mit zahllosen dynamischen Interaktionen zwischen ihren Komponenten. Das macht ihr Verhalten buchstäblich schwer berechenbar, was in der biotechnischen Nutzung ein Problem darstellt.

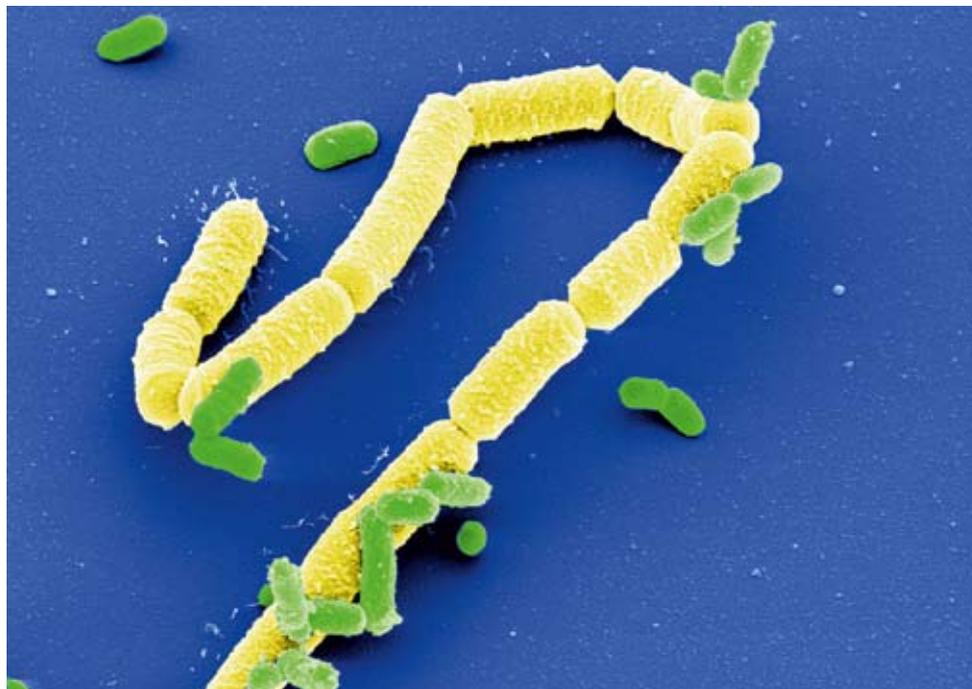
Biotechnologie in ihrer industriellen Anwendung ist ein von den Ingenieurwissenschaften vorangetriebenes Feld. Dank jahrzehntelanger Forschung lassen sich mittlerweile zwar viele Parameter des industriellen Produktionsprozesses kontrollieren. Dazu benutzen Ingenieure mathematische Modelle und daraus abgeleitete Vorhersagen. Doch die biologischen Vorgänge in den produzierenden Lebewesen selbst haben sich bisher der Berechenbarkeit und damit einer Modellierung entzogen. Zu komplex waren die zellulären Vorgänge und zu groß die damit verbundene Zahl an kritischen Parametern.

Hier kommt ein neuer Ansatz – die Systembiologie – ins Spiel, weil sie zentrale zelluläre Abläufe als Ganzes erfasst und in bio-

informatischen Modellen verarbeitet (siehe Randspalte S. 36). Indem sie etwa Steuerbarkeit und Systemverhalten von biologischen Funktionseinheiten beschreiben und verstehen hilft, kann sie innovative Lösungen für viele der immer neuen Fragestellungen auch in biotechnologischen Herstellungsprozessen bieten.

Uns interessiert beispielsweise die gentechnisch erzwungene Produktion komplexer Proteine, wie Antikörper, in Bakterien und Pilzen. Angefangen von der Übersetzung der eingeschleusten genetischen Information in eine Aminosäurekette, deren Export aus der Wirtszelle bis hin zur Faltung in das eigentliche Funktionsmolekül – bereits hier gilt es viele dies beeinflussende Parameter zu verstehen und zu modellieren. Aber Systembiotechnologie, eine neue faszinierende Kombination aus etablierter Biotechnologie und Systembiologie, ist für uns noch mehr. Unsere Strategie lautet daher: den gesamten industriellen Herstellungsprozess – mit der Kultivierung der Zellen im Bioreaktor, der Reinigung der Produkte bis hin zu deren endgültiger Anwendungsform etwa als Medikament – zu erfassen und mit in die Berechnungen einzubeziehen. Nur so gelingt es, ihn als Ganzes virtuell durchzuspielen, darüber zu optimieren und somit ein schnelles Umsetzen in die Praxis zu ermöglichen. Das spart Zeit und Kosten, würde somit beispielsweise solche Biopharmazeutika wie Antikörper erschwinglicher machen.

Wir haben uns zunächst überlegt, was nötig ist, um Systembiotechnologie, wie sie uns



BEIDE ABBILDUNGEN: MANFRED ROHDE, HELMHOLTZ-ZENTRUM FÜR INFektionsFORSCHUNG (HZI) BRAUNSCHWEIG



Als Produktionsorganismus für den systembiotechnologischen Ansatz gewählt wurde einmal das Riesenbakterium *Bacillus megaterium* (gelb koloriert). Es ist viel größer als das biotechnologisch oft genutzte Bakterium *Escherichia coli* (grün) und anders als der Winzling ein exzellenter Proteinexporteur. Als Zweites ausgesucht wurde der schwarze Gießkannenschimmelpilz *Aspergillus niger*. Abgebildet ist ein Nebenfruchtkörper, der einem Weihwasserwedel (Aspergil) ähnelt.

Beeindruckende Zahlen

Bis Ende 2008 waren **19 monoklonale Antikörper** in Deutschland zugelassen. **419 Biopharmazeutika** befinden sich in der klinischen Entwicklung; monoklonale Antikörper bilden dabei mit **162** den Schwerpunkt. In Europa ist Deutschland weiterhin die Nummer eins und weltweit die Nummer zwei bei der gentechnischen Produktion von Biopharmazeutika.

Verband forschender Arzneimittelhersteller

vorschwebt, erfolgreich anzuwenden. Wir, das sind über 60 Ingenieure, Biologen und Chemiker an der Technischen Universität Braunschweig, dem Helmholtz Zentrum für Infektionsforschung in Braunschweig und dem Max-Planck-Institut für Dynamik komplexer technischer Systeme in Magdeburg. Nur in solcher interdisziplinärer Zusammenarbeit ist die uns selbst gestellte Aufgabe zu bewältigen: Sie verlangt immerhin, einen biotechnologischen Prozess in möglichst allen relevanten Aspekten – von der Erzeugung eines fremden Eiweißmoleküls in einem Mikroorganismus über dessen kontrolliertes Wachstum im Bioreaktor bis zur Gewinnung und Anwendungsweise des Produkts – erst einmal experimentell zu messen, dann zu berechnen und am Ende zu modellieren.

Das »große Biest«

Wir wollten unseren Ansatz beispielhaft für Bakterien und für Pilze, zwei der wichtigsten Gruppen biotechnologischer Produzenten, durchexerzieren. Zunächst: Welche Spezies ist dafür geeignet? Unsere Untersuchungsobjekte sollten fähig sein, das gewünschte Produkt in die Kultivierungsbrühe auszuschleiden, denn dann muss es nicht erst aufwändig aus den Zellen selbst gewonnen und von deren Bestandteilen abgetrennt werden. Dies macht die Produktreinigung und damit die gesamte Prozessführung technisch leichter und kostengünstiger.

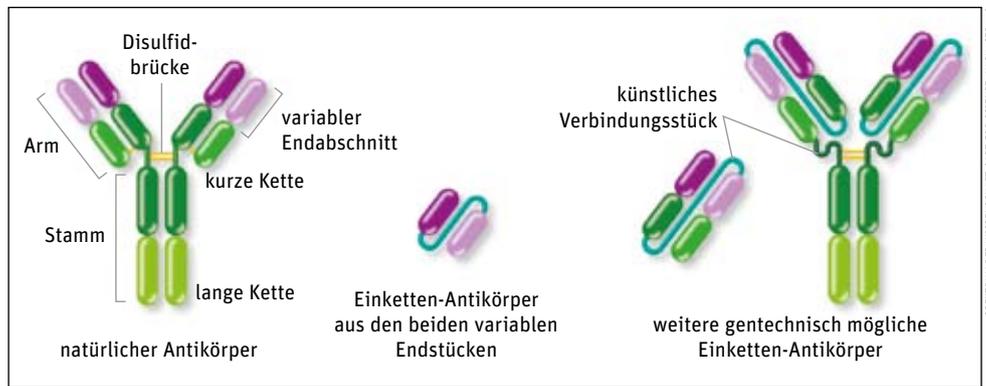
Unsere Wahl fiel auf das zuvor biotechnologisch wenig erforschte Bakterium *Bacillus me-*

gaterium und den Fadenpilz *Aspergillus niger*. Der Zusatz »megaterium« bedeutet großes Biest. Das Riesenbakterium erreicht das bis zu fünfhundertfache Volumen des biotechnologisch oft eingesetzten Bakteriums *Escherichia coli*, einem schlechten Proteinexporteur, der zudem wegen seiner breiten Anwendung so mit Patenten abgedeckt ist, dass er für neue Prozesse in Unternehmen oft unattraktiv ist (siehe großes Foto oben).

Auch die gewählte Art von Fadenpilz – der schwarze Gießkannenschimmelpilz – trägt ihre volkstümlichen wie fachlichen Namen nach dem Aussehen, denn unter dem Mikroskop ähneln die Nebenfruchtkörper einem Weihwasserwedel (Aspergil) beziehungsweise den Wasserstrahlen aus einer Gießkannenbrause (siehe kleines Foto oben). Für uns spielte seine bekannte, aber wenig erforschte Eigenschaft als exzellenter Proteinexporteur eine zentrale Rolle. Zudem war er für andere Anwendungen bereits biotechnologisch erschlossen.

Für den systematischen gentechnischen Aufbau der beiden Kandidaten zu Produktionsorganismen mussten wir uns im nächsten Schritt für Modellprodukte mit wirtschaftlicher Relevanz entscheiden. Die Wahl fiel zum einen auf wichtige Enzyme, die als Biokatalysatoren am Aufbau von Zuckerketten beteiligt sind, zum anderen auf die medizinisch stark nachgefragte Gruppe der Antikörper. An Letzteren wollen wir hier vorwiegend unsere Vorgehensweise darstellen. Immerhin sind Antikörper klar die Eiweißtherapeutika der Zukunft (siehe Randspalte rechts). Auf ih-

Natürliche komplette Antikörper enthalten gewöhnlich eine so genannte schwere und eine leichte Kette, und zwar in jeder Hälfte des Y-förmigen Moleküls. Die Endabschnitte eines ungleichen Pairs bilden gemeinsam gewissermaßen die Greifhände an den Armen des Y (links). Zur Vereinfachung der Produktion hat das Forscherteam die beiden getrennten Endabschnitte auf Genebene als durchgehende Kette mit einem Verbindungsstück konstruiert. Dieser Einketten-Antikörper kann dann trotzdem eine Greifhand ausbilden. Das Prinzip lässt noch andersartige Einkettenvarianten zu.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / ART FOR SCIENCE, NACH: SFB 578

Systembiologie

Hier werden bioinformatische Modelle genutzt, um das Verhalten biologischer Prozesse vorherzusagen und experimentell zu überprüfen. Das hilft neue Hypothesen aufzustellen und fokussiert Experimente auf wesentliche Ziele. Zur Aufstellung dieser Modelle müssen möglichst alle Daten zum Informationsfluss vom Gen bis zum zellulären Akteur gemessen werden.

Systembiotechnologie

Dieser von uns geprägte Begriff steht für die Idee, etablierte Biotechnologie mit der neuen Systembiologie zu verknüpfen. Dabei sollen nun alle berechenbaren Größen des biotechnologischen Produktionsprozesses in das systembiologische Modell mit einbezogen und zu dessen Optimierung benutzt werden – einschließlich der Anwendung des gentechnisch erzeugten Produkts. Letztlich wird dies die Entwicklung neuer Biotech-Erzeugnisse, darunter auch Medikamente, um Jahre verkürzen.

nen basieren bereits jetzt über 65 Prozent aller Proteinwirkstoffe, die zur Zulassung als Medikament angemeldet werden. Es mangelt aber an schnellen und preiswerten Produktionsmöglichkeiten.

Wir begannen also, das Riesenbakterium auf seine Aufgabe als Antikörperproduzent vorzubereiten. Nach vielen Versuchen gelang es uns endlich, in ihm fremde Erbinformation für eine künstliche Antikörpervariante auf einem Plasmid, einem zusätzlichen DNA-Ring, stabil in den Zellen zu vermehren. Natürliche komplette Antikörper setzen sich gewöhnlich aus einer so genannten schweren und einer leichten Kette zusammen. Das ungleiche Paar ist in dem Y-förmigen Molekül auf jeder Seite vorhanden, und seine Endabschnitte bilden gemeinsam gewissermaßen die Greifhände an den Armen des Y (siehe linke Grafik der Abbildung oben). Zur Vereinfachung der Produktion haben wir die beiden getrennten Endabschnitte auf Genebene als durchgehende Kette mit einem Verbindungsstück konstruiert. Diese Einketten-Antikörper können dann trotzdem eine Greifhand ausbilden.

Damit unser Protein auch in die umgebende Kulturbrühe ausgeschleust wird, mussten wir ihm – wieder auf Ebene des Erbguts – einen Versandhinweis mit Zielangabe einfügen. Dies gelang mit zusätzlich eingebauter DNA für ein so genanntes Leitpeptid, das ein Exportsignal aus Bakterien darstellt, da dort die Signale aus menschlichen Immunzellen nicht funktionieren. Leider schied das Riesenbakterium auch Enzyme in das Kulturmedium aus, welche die gerade produzierten Antikörper wieder zerstörten. Daher mussten wir die Gene dieser Enzyme inaktivieren. Der Lohn der Mühe: die erste erfolgreiche Sekretion eines komplexen rekombinanten menschlichen Moleküls durch *B. megaterium*. Danach aber stieß die weitere Steigerung der Antikörperproduktion auf Grenzen, für deren Überwindung eine neue Strategie zu entwickeln war.

Um zu erkennen, woran es lag, gingen wir daran, den zellulären Produktionsprozess mit *B. megaterium* in seiner Gesamtheit zu modellieren – was hieß, erst einmal alle beteiligten Komponenten, darunter Regulatorproteine, Synthesenzyme und Stoffwechselprodukte, im System Zelle zu bestimmen und wenn möglich quantitativ zu erfassen. Ein ganzes Arsenal moderner Methoden war gefragt (siehe Kasten rechts). Für ihre praktikable Anwendung auf das Riesenbakterium hatten wir dessen Erbgut zu entziffern: Es besteht aus rund fünf Millionen Bausteinen für etwa 5300 Gene.

Einblick ins Innenleben unserer Mikromitarbeiter

Darauf aufbauend entwickelten wir neue DNA-Chips für so genannte Transkriptom-Analysen, mit denen sich alle zum Zeitpunkt des Experiments arbeitenden Gene erfassen lassen. Von aktiven Genen erzeugt die Zelle Abschriften, Transkripte, daher die Bezeichnung. Wir bestimmten das Proteom, also alle gerade von der Bakterienzelle verwendeten Proteine, und überdies das Metabolom, also alle momentan in ihr vorhandenen Stoffwechselprodukte (Metaboliten). So konnten wir vielfältige Informationen über das Innenleben unserer Antikörper produzierenden mikroskopischen Mitarbeiter sammeln, wobei alle drei »-ome« jeweils so etwas wie Momentaufnahmen eigentlich dynamischer, sich laufend verändernder Vorgänge bieten.

Für die Auswertung der gewonnenen Datenfülle ist eine leistungsfähige Bioinformatik gefragt. Unsere Datenbank PRODORIC bietet die weltweit größte Datensammlung zur Transkriptionsregulation in Bakterien. Daneben steht mit BRENDA (der Braunschweig-Enzym-Datenbank) die weltweit größte Datensammlung über Enzyme und ihre katalysierten Reaktionen zur Verfügung. Auch die Programme für eine bioinformatische Auswertung und systembiotechnologische Modellbildung der Transkriptom-, Proteom- und

INFORMATIONSFLOSS IN DER ZELLE

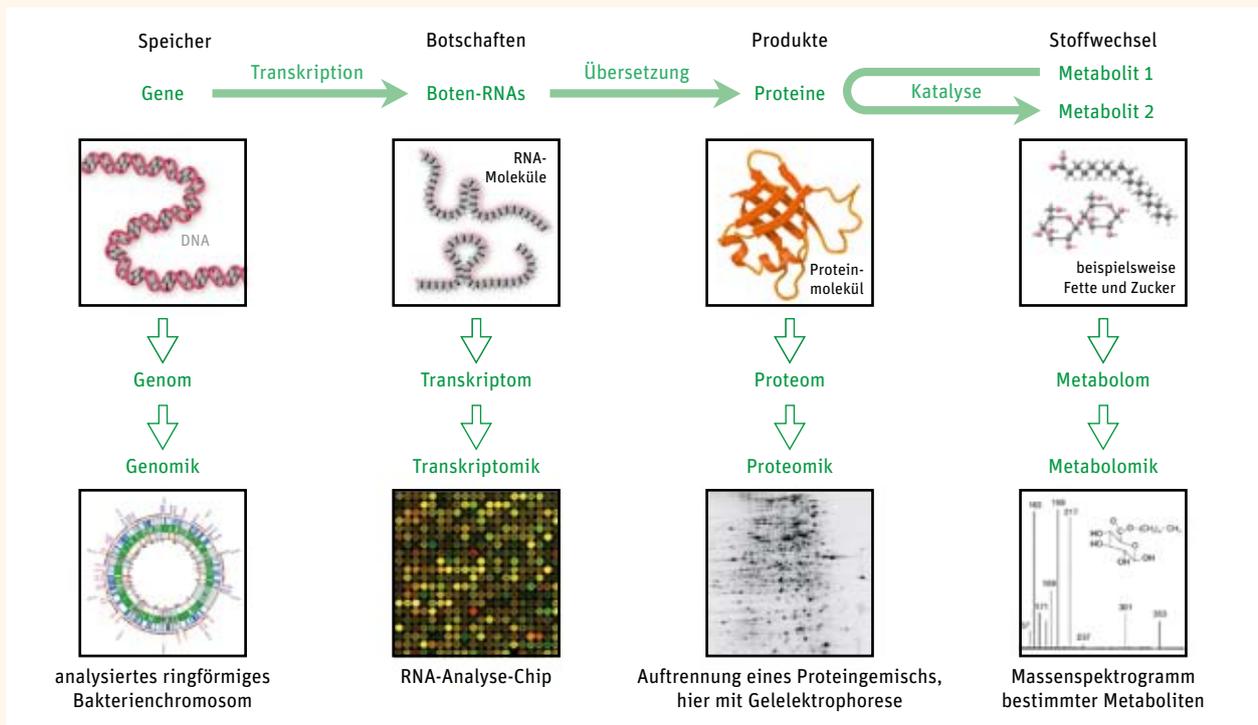
Um das biologische Geschehen im Riesenkaktus in seiner Gesamtheit modellieren zu können, mussten zunächst alle beteiligten Komponenten im System Zelle bestimmt und möglichst quantitativ erfassen werden.

a. Die Erbinformation für die Proteinherstellung ist im Genom, der Gesamtheit der Gene eines Organismus, niedergelegt.

b. Benötigt die Zelle die Information eines Gens, so erzeugt sie davon eine Abschrift, ein Transkript, aus Boten-RNA.

c. An den zelleigenen Montageeinheiten wird gemäß dieser Anweisung das entsprechende Protein hergestellt.

d. Ein Großteil der Proteine arbeitet als Enzym, katalysiert die Umsetzung von Hunderten von Stoffwechselprodukten. Alle diese Schritte lassen sich heute mit modernen Methoden fast vollständig experimentell erfassen.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / ART FOR SCIENCE, INACH, SFB 578

Genomik entziffert das Genom (DNA) und sucht insbesondere regulatorische und proteinkodierende Sequenzen, unter anderem durch Vergleich mit Genprodukten bekannter Funktion in Datenbanken. Moderne DNA-Sequenzierroboter bestimmen dabei die Basenabfolge des Genoms eines Mikroorganismus in Stunden. Bioinformatik ordnet dieser Sequenz (aus den genetischen »Buchstaben« A, C, G und T) Gene und deren Funktionen zu.

Transkriptomik erfasst Art und Menge der gerade vorhandenen Genabschriften, das Transkriptom. Durch DNA-Chiptechnologie kann sie auch deren Konzentrationsänderungen messen. Gelb steht für gleich gebliebene, rot für gestiegene und grün für gesunkene Konzentration jeweils eines Transkripts.

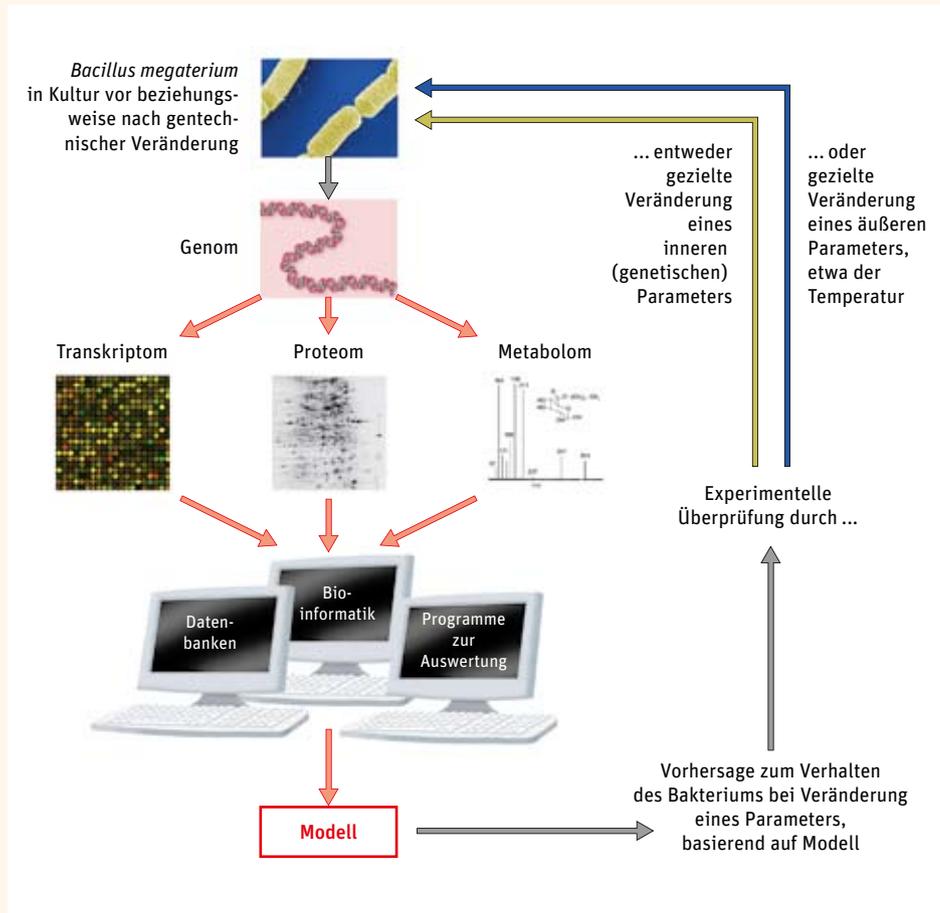
Proteomik identifiziert Art und Menge von möglichst vielen aktuell vorhandenen Zellproteinen, das Proteom. Dazu werden elektrophoretische und chromatografische Trennverfahren mit modernster Massenspektrometrie kombiniert. Zur Bestimmung des aktuellen Transkriptoms und Proteoms benötigt man effizienterweise ein komplett entschlüsseltes Genom.

Metabolomik bestimmt Art und Menge gerade vorhandener Stoffwechselprodukte, das Metabolom. Immerhin sind viele der gebildeten Proteine Enzyme, katalysieren also die Umsetzung einer Stoffwechselsubstanz (Metabolit) in eine andere. Das Metabolom wird mit raffinierter massenspektrometrischer Analyse ermittelt und gibt Auskunft darüber, welche wichtigen Zellbausteine – wie Aminosäuren, Zucker und Fette – gerade erzeugt werden.

WIE DIE SYSTEMBIOLOGIE VORGEHT

Am Beispiel des Riesenbakteriums zeigt die Grafik die wichtigsten Schritte, wie dessen Verhalten über einen systembiologischen Ansatz experimentell gemessen, dann berechnet und schließlich modelliert werden kann.

Das Ganze ist ein iterativer Prozess: Anhand der Modelle werden Vorhersagen erstellt, wie sich eine bestimmte Veränderung auf das Verhalten des Produktionsorganismus auswirken müsste, und diese dann experimentell überprüft, um die Modelle immer besser der Realität anzupassen. Über gute Endmodelle lassen sich dann verlässliche Vorhersagen zur Optimierung des gewünschten biotechnologischen Produktionsprozesses treffen. Diese können auf Ebene des Bakteriums selbst gentechnisch umgesetzt werden, aber auch bei der Kultivierung im Bioreaktor oder der Produktaufbereitung (nicht dargestellt).



Metabolomdaten wurden – im Rahmen zahlreicher Diplom- und Doktorarbeiten unseres Sonderforschungsbereichs – im Lauf der letzten rund zehn Jahren erstellt.

Die experimentellen Daten verraten uns nun, unter welcher Versuchsbedingung welche Gene abgelesen, welche Proteine gebildet werden und welche Stoffwechselprodukte in welchen Mengen vorhanden sind. Zum Verständnis mussten die Zusammenhänge bei der Regulation der Gene im untersuchten Organismus – die regulatorischen Netzwerke – ebenso abgeleitet werden wie die Stoffwechselnetzwerke. Daraus ergeben sich Hinweise, mit welchen übergeordneten Regulations- und Stoffwechselstrategien der Mikroorganismus sich an seine neuen Lebensbedingungen anpasst, die durch die erzwungene massive Produktion und den Export des untergeschobenen gewünschten Zielproteins bestimmt sind.

Kurzum: Wir erfassen all dies zunächst für das normale Bakterium in Kultur und vergleiche

chen die gewonnenen Ergebnisse mit denen des Produktionsbakteriums, beides für konstante Wachstumsbedingungen. Dann beginnen wir an jeweils einer Schraube zu drehen – ändern nun also einen einzigen Parameter in den Kultivierungsbedingungen, wie die Temperatur, die Versorgung mit Sauerstoff oder die Nahrungsquelle. Die daraufhin zu beobachtenden Änderungen in der Genaktivität und im Stoffwechsel lassen sich so schließlich dem entsprechenden Umweltreiz zuordnen. Auf diese Weise erkannten wir beispielsweise, dass wir für unsere Zwecke die Kultivierungstemperatur ungewöhnlich stark erhöhen mussten. Dank diesen und weiteren Erkenntnissen wurde die erwünschte massive Produktion im Bakterium machbar, die Ausbeute an Antikörpern deutlich gesteigert.

Allerdings: Die Produktionssysteme für Antikörper mit dem Riesenbakterium – wie auch die analog untersuchten Systeme für Zuckertransfer-Enzyme (Glycosyltransferasen) mit dem Gießkannenschimmel – waren alle

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / ART FOR SCIENCE, NACH SFB 578

für kleinere »Probekulturen« im Litermaßstab aufgebaut worden. Die Herstellung großer Mengen biotechnologischer Produkte erfordert die Kultivierung einer entsprechend großen Anzahl von Mikroorganismen. Dazu benutzen Bioverfahrenstechniker seit vielen Jahrzehnten Bioreaktoren (siehe Foto rechts). Hier lassen sich durch eine computerunterstützte Steuerungstechnik die wichtigsten Wachstumsparameter parallel kontrollieren und einstellen, wie Temperatur, Sauerstoffversorgung, Durchmischungsgrad, Salzgehalt, Nahrungsangebot und Säuregrad der Kulturbrühe. Diese Parameter bestimmen den Stoffwechsel der Mikroorganismen und damit auch deren Produktivität im Großen.

Eines der technischen Hauptprobleme beim Aufbau einer Großproduktion mittels eines Bioreaktors ist der Unterschied zwischen Kultivierungen im kleinen und im großen Maßstab: ungefähr so, als ob man Suppe im Ein-Liter-Topf oder in einem beheizten Tanklastzug kochen wollte. Zum Durchmischen der Kulturbrühe, welches für eine gleichmäßige Versorgung der Mikroorganismen mit Nährstoffen und Sauerstoff unerlässlich ist, reicht dann kein »Löffel« mehr. Zudem müssen überall im Bioreaktor gleiche Temperatur und gleicher Säuregrad erzielt werden, ohne das Ganze zu Schaum zu rühren. Das geht im kleinen Maßstab alles ohne größere Probleme, bedarf aber bei Industriereaktoren eines erheblichen Aufwands.

Gerührt – zu Klümpchen

Auch hier helfen die Erkenntnisse der Systembiotechnologie weiter. So wurden wieder Transkriptom, Proteom und Metabolom unserer beiden Produzenten unter wohl definierten Konstellationen von Umweltbedingungen – dem so genannten Environom – bestimmt und dann die Ergebnisse in Beziehung zur gewonnenen Produktmenge gesetzt. Wir sind nun dabei, aus diesen Daten die Veränderungen im Stoffwechsel und seiner Regulation abzuleiten, um darüber die kritischen Punkte bei der Umsetzung einer Laborkultur in den Industriemaßstab zu identifizieren.

Dieser systembiotechnologische Ansatz ließ sich zwar beim Riesenbakterium direkt umsetzen. Doch unsere Entscheidung, den schwarzen Gießkannenschimmel als Modellorganismus zu nehmen, verlangte, zusätzliche Anforderungen zu berücksichtigen. Der Pilz kann je nach Kulturbedingungen – Temperatur, Rührgeschwindigkeit, Begasung und so fort – in unterschiedlicher Form wachsen: in Gestalt kleiner, fädiger Einzelschläuche (Hyphen), als Verbund mehrerer Schläuche (Myzel) oder auch als kompakter größerer Ver-



HEIDE FOTOS: SFB 578

bund, Biopellets genannt (siehe kleines Foto oben). Da die Gestalt die Produktivität stark beeinflusst, galt es, sie zu kontrollieren.

Der Inhalt des Bioreaktors wird bei der Kultivierung – wie erwähnt – durch Rühren kräftig durchmischt, um den Pilz gleichmäßig mit Nährstoffen und Sauerstoff zu versorgen. Durch die Verwirbelungen beim Rühren und durch das starke Begasen des Reaktors entstehen Scherkräfte. Und sie erwiesen sich als verantwortlich für den beobachteten Gestaltwandel: Die mechanisch empfindlichen Pilzhypen werden abgeschert und formieren sich zu kompakteren Bällchen unterschiedlicher Größe und Produktivität.

Für das Wachstum und für eine hohe Produktivität ist eine gute Sauerstoffversorgung im Biopellet unbedingt erforderlich, wie wir feststellten. Mit einem mathematischen Modell können wir inzwischen berechnen, wie sich bei größeren Pellets die Diffusion von Sauerstoff ins Innere vermindert und die resultierende Unterversorgung zum Rückgang der Proteinproduktion führt. Für die Praxis hieß das: Das Rühren und Begasen, und damit der so genannte Schereintrag, musste je nach Volumen des Bioreaktors so justiert werden, dass keine zu großen, sondern gleichmäßige kleine Pellets entstehen, da nur sie hohe Produktivität gewährleisten.

Nicht jedes Protein wird allerdings von der Erzeugerzelle exportiert. Einige Antikörpervarianten werden, wie man mittlerweile weiß, trotz eines Exportsignals nicht in die Kulturbrühe ausgeschleust. Besonders die größten, die sich aus mehreren getrennten Ketten aufbauen und vollständigen menschlichen Antikörpern am nächsten kommen, bereiten noch

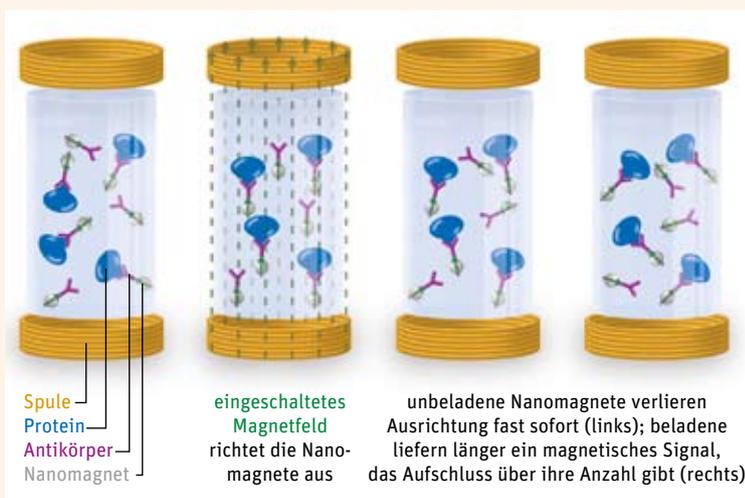


In einem Bioreaktor, links ein Forschungsreaktor von zwei Liter Inhalt, muss die Kulturbrühe durch Rühren ständig durchmischt werden. Im Fall des Gießkannenschimmelpilzes heißt das: Die mechanisch empfindlichen Pilzfäden werden abgeschert und formieren sich zu kompakteren Bällchen unterschiedlicher Größe (Foto rechts). In zu dicken Biopellets leidet aber die Produktivität stark, da das Zentrum nicht mehr genügend Sauerstoff erhält. Eine Modellierung half auch hier, die optimalen Bedingungen für Temperatur, Rührgeschwindigkeit und Belüftung zu finden.

Hydrogele

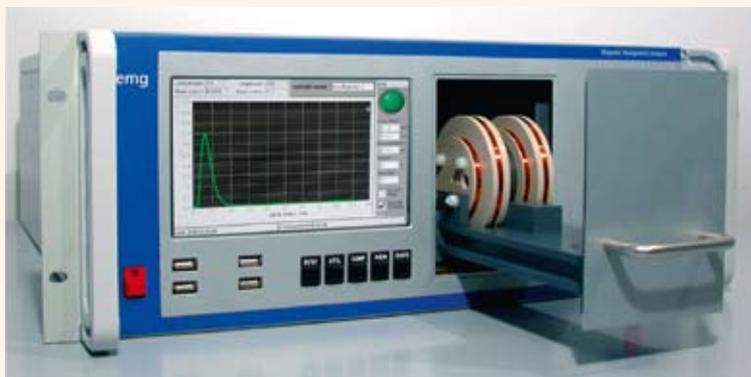
Sie werden durch chemische oder physikalische Vernetzung aus einzelnen Polymerketten aufgebaut. Während die Einzelketten in der Regel wasserlöslich sind, kann das Netzwerk in Wasser nur aufquellen – dies aber beträchtlich, ohne seinen stofflichen Zusammenhalt zu verlieren. Wegen ihres hohen Wassergehalts sind Hydrogele meist biokompatibel und besitzen gewebeähnliche mechanische Eigenschaften. Sie haben deshalb vielseitige Anwendungen im biomedizinischen Bereich.

PROTEINE ZÄHLEN – MIT NANOMAGNETEN



Ein interessantes Zielprotein (blau) ist mit Tausenden ähnlicher Komponenten in der Zelle vermischt, wie die sprichwörtliche Nadel im Heuhaufen. Magnetische Nanoteilchen (grau), wenige hunderttausendstel Millimeter dick, helfen hier weiter. Dazu wird jeder Nanomagnet mit einem Antikörper (lila) als Angelhaken versehen, der ein Exemplar des gesuchten Proteins festhalten kann. Solche Teilchen haben nach Zugabe zu einem Proteingemisch in kurzer Zeit die gesuchten Moleküle – die auch selbst wieder ein Antikörper sein können – am Haken. Über ein von außen angelegtes magnetisches Feld (gestrichelte Linien) lassen sich alle Nanomagnete, auch solche ohne ein geangelltes Zielprotein, einsammeln (nicht dargestellt).

Um dann festzustellen, wie viele der gesuchten Moleküle vorhanden sind, reicht es oft aus, die Anzahl magnetischer Nanoteilchen, die Beute gemacht haben, zu messen. Erfolgreiche Nanoteilchen stören nicht, da sie sich anders verhalten als jene, die ein Zielmolekül gebunden haben: Beide richten sich in einem äußeren Magnetfeld (grün) aus, doch die erfolglosen Teilchen verlieren ihr magnetisches Signal schnell in wenigen Mikrosekunden, während die beladenen bis in den Millisekundenbereich magnetisiert bleiben. Dies macht das Verfahren sehr einfach anwendbar.



Die Probe kommt zwischen die Magnetspulen (rot) in der Schublade.

Nach diesem Prinzip bauten wir eine hochempfindliche Analyseeinheit für magnetische Nanoteilchen (Foto). Angekoppelt an den Bioreaktor ermöglicht sie es, zu jeder Zeit der Kultivierung sehr schnell die Menge an gebildetem Produkt zu messen, vor allem, wenn es in die Nährbrühe abgegeben wird. Anderenfalls werden die Zellen dazu vorher geöffnet.

Schwierigkeiten. Um auch sie zu gewinnen, bleibt nur, die Zellen gewissermaßen zu knacken. Dazu werden zunächst die Organismen aus der Kulturbrühe herausgefiltert oder abzentrifugiert und dann ihre stabilen Zellumhüllungen mechanisch oder chemisch zerstört.

Das Wunschprotein muss dann von den ungewollten anderen zellulären Proteinen getrennt werden. Zur endgültigen Reinigung nutzen wir so genannte Chromatografie-Verfahren. Vereinfacht gesagt wird das Proteingemisch dazu in einem Lösungsmittel über eine feste Substanz geführt, wobei unterschiedliche Proteine beim Vorbeifließen unterschiedlich gut haften bleiben und dadurch gebremst werden. Geschickt eingesetzt kann man so die Spreu vom Weizen trennen. Für die großtechnische Anwendung haben wir chromatografische Verfahren entwickelt, die mit möglichst wenig Einsatz von Lösungsmitteln und einer möglichst effizienten Prozessführung reine Proteinlösungen bieten. Die mathematische Modellierung des Prozesses erlaubt auch hier eine verlässliche Vorhersage seiner Ergebnisse.

Magnetische Nanoteilchen als dienstbare Geister

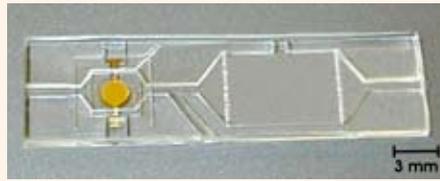
Selbst ein gereinigter Antikörper ist aber noch kein Produkt für eine medizinische Anwendung. Der therapeutische Einsatz dieser Proteine erfordert zwar meist nur sehr geringe Wirkstoffmengen am Zielorgan. Die Moleküle weisen allerdings im Organismus häufig nur eine kurze biologische Haltbarkeit auf, das heißt der Wirkstoffspiegel fällt zu schnell ab. Eine erfolgreiche medizinische Anwendung ist daher abhängig von der Verfügbarkeit geeigneter Trägersysteme, die eine kontrollierte Freisetzung der erforderlichen Wirkstoffmengen am Zielgewebe ermöglichen. Hier kommt der Bereich Anwendungstechnik unseres Sonderforschungsbereichs ins Spiel.

Wir konnten zeigen, dass man Proteine in eine Hydrogelmatrix (siehe Randspalte S. 39) einlagern kann, die aus einem mit der Stärke verwandten Molekül erzeugt wird. Diese Matrix ist biokompatibel, also gut körperversäglich, weil sich das Material ohne den üblichen Einsatz von organischen Lösungsmitteln herstellen lässt. Und es ist bioabbaubar: Mit der allmählichen Zersetzung des Hydrogels wird der Wirkstoff kontinuierlich freigesetzt.

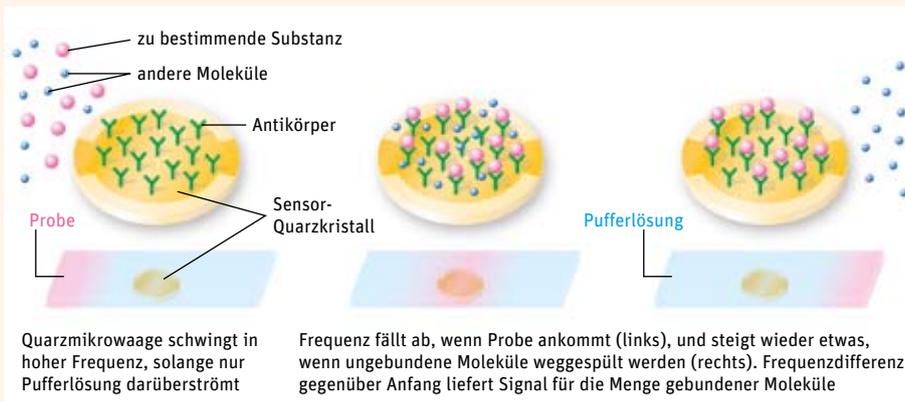
Steuern lässt sich die Geschwindigkeit, mit der das geschieht, indem man die Maschen des Netzwerks, das bei der dreidimensionalen Verknüpfung der speziellen Stärkemoleküle

LABOR IN CHIPGRÖSSE

Für den möglichen Einsatz unserer Antikörper in der medizinischen Diagnostik haben wir ein automatisiertes Analyselabor in Chipgröße entwickelt (Foto). Es beruht auf ausge-reifter Nanotechnologie und Mikrotechnik in Verbindung mit Antikörper-Knowhow. Das nur wenige Millimeter große System nutzt Hochfrequenz-Quarzmikrowaagen (Schema unten), um etwa im Blut in wenigen Minuten völlig automatisch wichtige klinische Parameter zu be-stimmen. Bisherige Tests sind zu zeit- und per-sonalaufwändig.



In der linken Kammer dieses so genannten Mikrofluid-Chips ist eine Hochfrequenz-Quarzmikrowaage eingebaut. Das goldfarbene Plättchen ist der Sensor-Quarzkristall. Die Funktion wird im Schema erläutert.



entsteht, unterschiedlich dicht knüpft. Wir erreichen dies beispielsweise durch unterschiedlich lang andauernde oder unterschiedlich intensive UV-Bestrahlung während der sogenannten Fotopolymerisation, der lichtabhängigen Quervernetzung zum wasserlöslichen Gel. Mit Hilfe magnetischer Nanoteilchen, die statt der Einketten-Antikörper in den Maschen bei der Vernetzung festgehalten wurden, ließ sich nachweisen, wie die Geschwindigkeit der Wirkstoffeinbindung und -freisetzung von der Vernetzungsstruktur abhängt. Solche Nanoteilchen leisten uns in noch anderer Hinsicht gute Dienste (siehe Kasten links).

Außer in der Therapie werden Antikörper heute auch vielfach in der medizinischen Diagnostik eingesetzt. Allerdings sind die dazu durchzuführenden Tests zeit- und personalaufwändig. In einem weiteren Projekt haben wir daher für diagnostische Anwendungen unserer Antikörper ein automatisiertes Analyselabor in Chipgröße entwickelt (nach dem englischen Fachbegriff *lab on chip* genannt). Dies bedurfte ausgereifter Nanotechnologie und Mikrotechnik in Verbindung mit Antikörper-Knowhow. Das nur wenige Millimeter große System nutzt Hochfrequenz-Quar-

mikrowaagen, um in wenigen Minuten völlig automatisch wichtige klinische Parameter zu bestimmen (siehe Kasten oben).

Der hier im Sonderforschungsbereich gewählte integrative Ansatz der Systembiotechnologie macht biotechnologische Prozesse vom produzierenden Mikroorganismus über die Kultivierung im Bioreaktor und die Reinigung des Produktes bis hin zur Anwendung nun also berechenbar. Die Systembiotechnologie bildet die Basis für mathematische Modelle der Einzelschritte und schließlich des Gesamtprozesses. Mit deren Hilfe lassen sich dann Vorhersagen machen, die ihrerseits die Grundlage für einen umweltverträglichen, preiswerten und dabei sehr effizienten Produktionsprozess liefern.

Dieser wissenschaftliche Ansatz ist in der universitären Forschung in Europa noch einzigartig. Die gewählte universelle Form gewährleistet eine breite Anwendung und damit schnelle Verbreitung der Systembiotechnologie. Die Forschungsergebnisse werden einmal die Entwicklung von Produkten um Jahre verkürzen, sie schon deshalb preiswerter und konkurrenzfähiger machen. Aus der Zukunft der Biotechnologie ist deshalb die Systembiotechnologie nicht mehr wegzudenken. ◀



Meinhard Schilling (oben) ist Professor am Institut für Elektrische Messtechnik und Grundlagen der Elektrotechnik an der Technischen Universität Braunschweig. Ihn interessiert besonders die messtechnische Anwendung der Nanotechnologie in der biochemischen Analytik und medizinischen Diagnostik. An seiner Tätigkeit im Sonderforschungsbereich 578 »Vom Gen zum Produkt« begeistert ihn der unkomplizierte interdisziplinäre Austausch über alle Fachgrenzen hinweg.

Dietmar Christian Hempel (links) war von 1994 bis 2009 geschäftsführender Leiter des Instituts für Bioverfahrenstechnik an der TU Braunschweig und von 2001 bis 2007 Sprecher des Sonderforschungsbereichs 578. Seine Hauptarbeitsfelder sind die Reaktions- und Verfahrenstechnik biologischer und chemischer Prozesse, insbesondere die Wechselwirkung von biologisch-chemischen mit physikalischen Vorgängen (Systembiotechnologie). **Dieter Jahn** ist Professor am Institut für Mikrobiologie der TU Braunschweig und Sprecher des Sonderforschungsbereichs 578. Er interessiert sich seit vielen Jahren für die Biochemie, Genregulation und nun inzwischen die Systembiologie von Mikroorganismen.

Jahn, M., Jahn, D.: Regulation und Systembiologie. In: Munk, K. (Hg.): Taschenlehrbuch Biologie – Genetik. Thieme, Stuttgart, Oktober 2009.

Klipp, E. et al.: Systems Biology: A Textbook. Wiley-VCH, Weinheim, Taschenbuchausgabe 2009.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/1005449.

Ein neues MOLEKÜL DES LEBENS?

So genannte Peptidnukleinsäuren, synthetische Zwitter aus Protein und DNA, könnten der Ausgangspunkt für die Entwicklung neuartiger Medikamente sein. Vielleicht ermöglichen sie aber auch die Konstruktion künstlicher Organismen.

Von Peter E. Nielsen

In Kürze

- ▶ Die in der Natur nicht vorkommenden **Peptidnukleinsäuren (PNAs)** kombinieren die Fähigkeit der DNA, Informationen zu speichern, mit der chemischen Stabilität eines proteinartigen Rückgrats.
- ▶ **Wirkstoffe auf PNA-Basis** können sich gezielt an bestimmte Basensequenzen in DNA oder RNA anlagern und so die Aktivität des entsprechenden Gens hemmen oder aktivieren. Ihr **medizinischer Einsatz** scheitert bisher allerdings an der Schwierigkeit, sie in Zellen einzuschleusen.
- ▶ Einige Wissenschaftler, die **künstliches Leben** erschaffen wollen, halten PNA für eine wichtige Zutat in ihrem Cocktail.
- ▶ Auch **die ersten irdischen Lebensformen** nutzten möglicherweise PNA-artige Moleküle als genetisches Material.

Die enorme Vielfalt der Lebensformen auf unserem Planeten – von winzigen Bakterien bis zu majestätischen Walen, von Sonnenlicht verwertenden Pflanzen bis zu Endolithen, die sich tief unter der Erde von Mineralen ernähren – beruht auf einem einzigen universellen Funktionsprinzip: dem »zentralen Dogma der Molekularbiologie«. Demnach speichert das Erbmolekül DNA die genetische Information, während RNA-Moleküle als Arbeitskopien von Genen fungieren, nach deren Vorlage die Ribosomen Proteine synthetisieren. Die Eiweißstoffe wiederum bilden Strukturelemente der Gewebe und dienen in Form von Enzymen als »Arbeitspferde« der Zellen.

So überwältigend der Erfolg dieses Dogmas war und ist, träumen manche Wissenschaftler davon, künstliche Lebensformen zu schaffen, die ganz anders funktionieren. Zum einen wollen sie damit die Mindestanforderungen an einen Organismus herausbekommen und so ergründen, was das Leben im Kern ausmacht und wie es auf der Erde entstanden ist. Zum anderen reizt es sie einfach, zu probieren, was geht. Im Endeffekt wollen sie einen neuen Satz von Molekülen entwickeln, die das Gleiche können wie ihre natürlichen Gegenstücke: durch Selbstorganisation komplexere Einheiten bilden, eine Energiequelle nutzen sowie sich vermehren und weiterentwickeln.

Für eine zentrale Rolle bei diesem Unternehmen bieten sich Peptidnukleinsäuren (PNAs) an. Sie können wie DNA und RNA Informationen tragen. Doch ihr Rückgrat besteht nicht aus einer Wechselfolge von Zuckermolekülen und Phosphatgruppen, sondern aus

einem einfacher aufgebauten und noch dazu stabileren Aminosäurestrang. Meine Arbeitsgruppe hat vor mehr als 15 Jahren die ersten Exemplare synthetisiert. Damals ging es uns weniger um die Erschaffung neuer Lebensformen als um konkrete, schnell verwertbare Ergebnisse. Wir wollten Medikamente konzipieren, die sich gezielt an ein vorgegebenes Gen anlagern und so dessen Expression (die Herstellung des darin kodierten Proteins) entweder blockieren oder verstärken. Vom Prinzip her ähnelt dieser Ansatz dem Antisense-Konzept, bei dem kurze DNA- oder RNA-Stränge zum Einsatz kommen, die sich ebenfalls an die Arbeitskopien eines Gens heften und dadurch dessen Expression verhindern (Spektrum der Wissenschaft 3/1990, S. 70)

PNAs sollten gegenüber Antisense-DNAs oder -RNAs jedoch gleich mehrere Vorteile bieten: Sie sind vielseitiger, weil sie sich an jede Art von Nukleinsäure und nicht nur an RNAs anlagern können; sie heften sich fester an ihre Zielstruktur, und sie werden im enzymreichen zellulären Milieu nicht so leicht abgebaut. Viele Untersuchungen in den vergangenen 15 Jahren haben ergeben, dass PNAs zumindest im Reagenzglas oder in Zellkulturen die Genexpression beeinflussen können. Inzwischen werden auch schon erste Tierversuche mit ihnen durchgeführt. Zugleich erproben Forscher Möglichkeiten, PNAs so abzuwandeln, dass sie aus dem Blutstrom in menschliche Zellen übertreten können.

Auf diesen erstaunlichen Molekülen ruhen aber nicht nur die Hoffnungen der Mediziner, sie stehen auch im Zentrum von Spekulationen über den Ursprung des irdischen Lebens. Nach Ansicht einiger Wissenschaftler könnten PNAs oder sehr ähnliche Moleküle die Basis



Peptidnukleinsäuren (goldfarben) können sich in die große Furche der DNA-Doppelhelix zwängen und mit ihr einen Tripelstrang bilden. Auch andere Strukturen sind möglich. Das eröffnet neuartige Chancen zur Beeinflussung der Genaktivität.

Vielleicht lassen Forscher bei dem Versuch, künstliches Leben zu kreieren, unsere frühesten Ahnen auferstehen

urtümlicher Organismen gebildet haben, bevor Proteine, DNA und RNA auf den Plan traten. Vielleicht lassen Forscher bei dem Versuch, künstliches Leben zu kreieren, also zugleich unsere frühesten Ahnen auferstehen.

Die Geschichte der PNA beginnt in den frühen 1990er Jahren. Auf der Suche nach breiter einsetzbaren Alternativen zu Antisense-RNA arbeiteten meine Kollegen Michael Egholm, Rolf H. Berg, Ole Buchard und ich damals an der Synthese kleiner Moleküle, die kurze Abschnitte von doppelsträngiger DNA spezifisch erkennen konnten. Dies war keine leichte Aufgabe. Die Schwierigkeit liegt in der besonderen Struktur der DNA-Doppelhelix.

In dem Erbmolekül ist die genetische Information in der Abfolge von vier so genannten Basen verschlüsselt: Thymin (T), Adenin (A), Cytosin (C) und Guanin (G). (RNA enthält statt Thymin das sehr ähnliche Uracil (U).) Je zwei dieser vier Basen können sich über Wasserstoffbrücken verbinden. Solche »Watson-Crick-Paare« aus G und C oder A und T bilden die Sprossen der bekannten DNA-»Leiter«. Ein Molekül, das ein kurzes Stück Doppelhelix-DNA mit einer bestimmten Basensequenz erkennen kann, würde mit allen Genen interagieren, in denen diese spezifische Abfolge vorkommt.

Molekulare Sonden zu entwerfen, die sich an gewisse Basensequenzen in einzelsträngiger DNA oder RNA anlagern, ist nicht sehr schwierig. Wenn nämlich zwei Nukleinsäure-

stränge komplementäre Sequenzen aufweisen, paaren sich die betreffenden Basen wie beschrieben und verbinden die beiden Stränge zur Doppelhelix. Sofern man also die Basenfolge eines Gens kennt – beispielsweise aus der Datenbank des Humangenomprojekts –, muss man lediglich den komplementären Gegenstrang synthetisieren und erhält ein Molekül, das sich gezielt an die einzelsträngige Form dieses Gens anlagert.

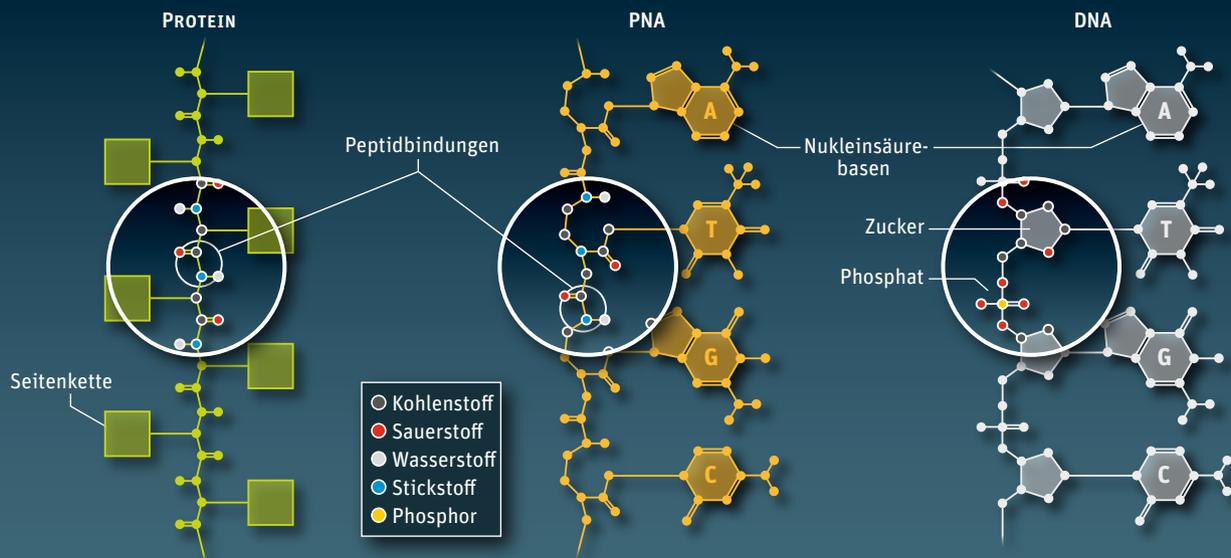
Molekulares Tasten mit Zink-Fingern

Bei Doppelstrang-DNA fällt das Erkennen bestimmter Sequenzen sehr viel schwerer. Denn die Atome, welche die Watson-Crick-Basenpaarung vermitteln, sind bereits an Wasserstoffbrückenbindungen beteiligt, die beide Stränge aneinanderkoppeln, und stehen daher nicht für Wechselwirkungen mit anderen Molekülen zur Verfügung. Dennoch ist das Kunststück prinzipiell möglich. Das beweisen zahlreiche natürliche Proteine, die sich an spezifische DNA-Sequenzen in Doppelstrangform heften und so die Genexpression beeinflussen können. Gelänge es, künstliche Moleküle mit der gleichen Fähigkeit zu entwickeln, könnte man sie vielleicht als Medikamente einsetzen, die steuernd in die Genregulation eingreifen.

Die Genexpression erfolgt, wie erwähnt, in zwei Schritten. Im ersten, der Transkription, synthetisiert das Enzym RNA-Polymerase die Boten-RNA (mRNA). Deren Basensequenz

EIN PROTEIN-DNA-ZWITTER

Peptidnukleinsäuren (PNAs) vereinen Merkmale von Proteinen und DNA in sich. Ihr Rückgrat besteht aus relativ simplen Einheiten, die durch dieselben Peptidbindungen zusammengehalten werden wie die Aminosäuren in den Proteinen. Es ist deshalb viel stabiler als das negativ geladene Zucker-Phosphat-Rückgrat der DNA. Wie in der DNA trägt jeder PNA-Baustein eine Nukleinsäurebase.



stimmt exakt mit derjenigen des Originalgens überein. Das Ribosom – eine molekulare Maschine, die selbst aus RNA und Proteinen besteht – vollzieht den zweiten Schritt: die Translation. Dazu liest es die mRNA ab und übersetzt die Basensequenz in eine Abfolge von Aminosäuren, die es zum Protein verknüpft.

Antisense-Moleküle stören die Translation, indem sie sich an die Botenmoleküle binden. Typischerweise handelt es sich um kleine, chemisch modifizierte Nukleinsäuren. Sie erkennen ihre Ziel-mRNA mittels Watson-Crick-Basenpaarung und ergänzen sie lokal zu einem Doppelstrang, der das Botenmolekül rein mechanisch außer Funktion setzt oder dafür sorgt, dass Enzyme es abbauen.

Regulatorische Proteine, so genannte Transkriptionsfaktoren, steuern die Genexpression dagegen im Transkriptionsstadium. Dazu heften sie sich an ganz bestimmte Sequenzen in der Doppelstrang-DNA. Sie können die Aktivität eines Gens unterdrücken, indem sie die RNA-Polymerase am Abschreiben der zugehörigen DNA-Sequenz hindern. Umgekehrt können sie ein ruhendes Gen aber auch anschalten, indem sie der RNA-Polymerase helfen, an der betreffenden DNA anzudocken und die Transkription zu starten.

Die Transkriptionsfaktoren sind demnach gute Vorlagen für Moleküle, die DNA-Sequenzen von außerhalb der Helix »ablesen« können. Allerdings ist es Biochemikern noch bis in die 1990er Jahre nicht gelungen, künstliche Proteine zu entwerfen, die vorgegebene Zielsequenzen erkennen. Die Doppelhelix weist zwischen den Holmen der Basenpaarleiter, die zu einer Art Wendeltreppe gewunden ist, zwei Furchen auf. Ein Transkriptionsfaktor ist so geformt, dass er mit einem Arm in die tiefere dieser beiden Rinnen »hineingreifen« und die Basenpaare im Zentrum des Doppelstrangs »ertasten« kann. Die äußere Gestalt eines künstlichen Proteins ist jedoch schwer vorherzubestimmen. Sie hängt von der räumlichen Faltung seiner Aminosäurekette ab, und was dabei herauskommt, lässt sich bis heute nicht zuverlässig vorab sagen.

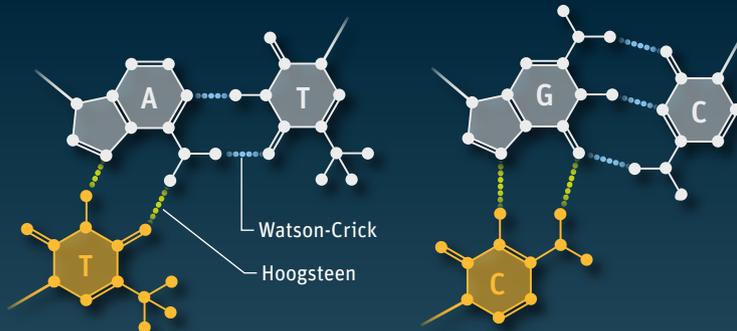
Inzwischen haben Forscher zwar Fortschritte erzielt, indem sie Transkriptionsfaktoren, die so genannte Zink-Finger tragen, als Modell nahmen. Bei diesen »Fingern« handelt es sich um Abschnitte aus etwa 30 Aminosäuren, die sich teilweise um ein Zinkion winden. Sie passen in die große Furche der DNA, wo sich einige ihrer Aminosäuren parallel zu den Basen ausrichten. Dennoch ist es nach wie vor schwierig, selbst für relativ kurze DNA-Sequenzen Proteine nach dem Vorbild der Zink-Finger zu konstruieren, die sich spezifisch an diese Sequenzen heften.

WECHSELWIRKUNG VON PNA MIT DNA

PNA bindet sich an DNA und RNA sowohl über die Watson-Crick-Paarung komplementärer Basen (wie sie in gewöhnlicher doppelsträngiger DNA vorkommt) als auch über so genannte Hoogsteen-Paarungen. Dadurch kann sie eine Vielzahl von Strukturen ausbilden, was zahlreiche Möglichkeiten für Anwendungen in der Medizin bietet.

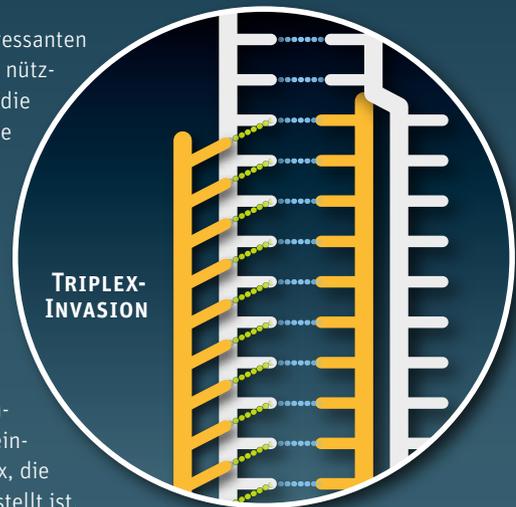
BASENPAARUNG

Watson-Crick-Paarungen verbinden die komplementären Basen A und T (links) sowie G und C (rechts). Die Hoogsteen-Paarung ermöglicht einem weiteren T (orange, links), an ein A-T-Paar anzudocken, und einem zusätzlichen C (mit einem Extra-Wasserstoffatom), sich an ein G-C-Paar zu heften.



PNA-DNA-STRUKTUREN

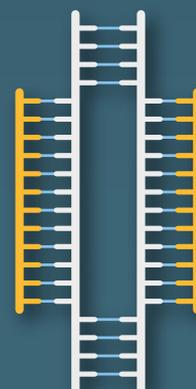
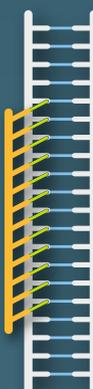
Zu einer besonders interessanten Struktur mit potenziell nützlichen Auswirkungen auf die Zelle führt die so genannte Triplex-Invasion (rechts). Dabei verdrängen zwei PNA-Stränge (orange) einen Strang in der DNA-Doppelhelix und bilden mit dem anderen eine dreisträngige Triplexhelix. Zu den übrigen möglichen Strukturen (unten) gehört auch die einfache PNA-DNA-Triplexhelix, die auf S. 43 im Detail dargestellt ist.



TRIPLEXHELIX

DUPLEX-INVASION

DOPPEL-DUPLEX-INVASION

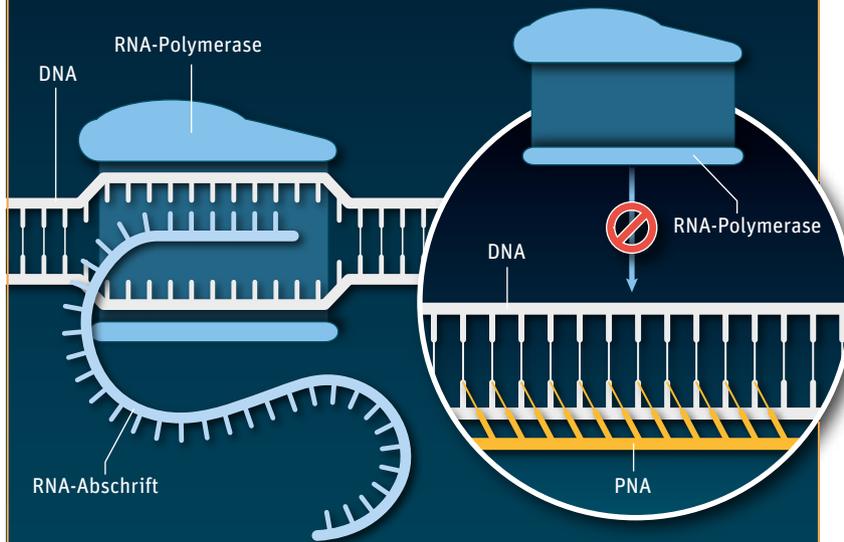


GENREGULATION MIT PNA

PNA kann dank ihrer Fähigkeit, sich auf verschiedene Arten sowohl mit doppelsträngiger DNA als auch mit RNA zu verbinden, die Produktion von Proteinen beeinflussen.

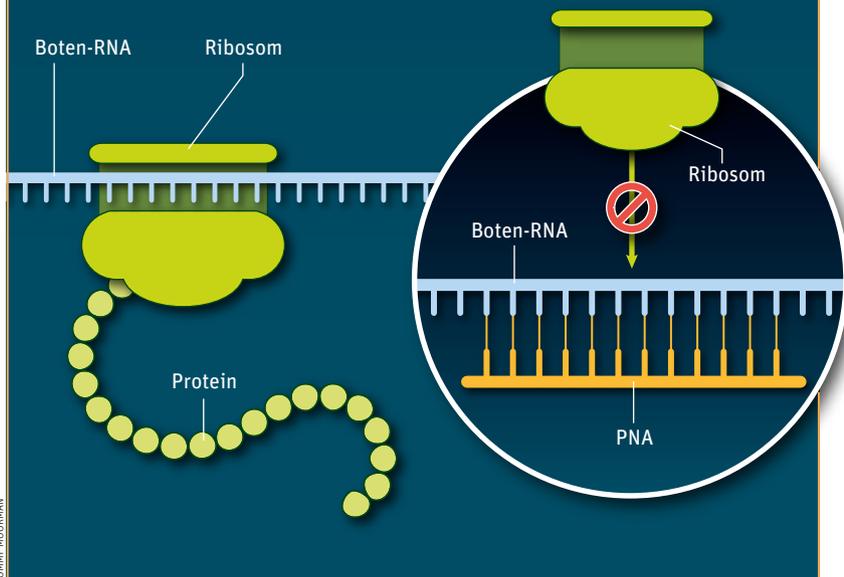
KONTROLLE DER TRANSKRIPTION

Bei der Transkription erstellt das Enzym RNA-Polymerase von einem Gen auf der DNA eine Abschrift in Form einer Boten-RNA. Eine PNA kann das verhindern, indem sie sich an dieses Gen bindet (Ausschnittsvergrößerung). Umgekehrt vermag sie das Abschreiben aber auch zu fördern, wenn sie per Triplex- oder Duplex-Invasion an der passenden Stelle einen DNA-Abschnitt als Einzelstrang freilegt, an den sich dann Enzyme anlagern, welche die Transkription einleiten (nicht gezeigt).



BLOCKADE DER TRANSLATION

Im zweiten Schritt der Proteinproduktion übersetzt ein Ribosom die Basenfolge der Boten-RNA in eine Aminosäuresequenz und synthetisiert so das Protein. PNA kann diesen Vorgang stören, indem sie sich an die Boten-RNA anlagert.



Einen völlig anderen Ansatz ermöglicht eine Entdeckung aus dem Jahr 1957, nur vier Jahre nach der Strukturbestimmung der Doppelhelix. Damals erzeugten Gary Felsenfeld, Alexander Rich und David Davies von den National Institutes of Health in Bethesda (Maryland) eine DNA-Tripelhelix, in der ein dritter Nukleinsäurestrang in der großen Furche verläuft. Die Bindung erfolgt dabei nach einem Schema, das Karst Hoogsteen 1963 entdeckt hat (siehe Kasten S. 45). Demnach bilden sich Basen-Trios, in denen sich ein zusätzliches Thymin an ein T-A-Paar anlagert (T-A=T; wobei »=« die Hoogsteen-Bindung symbolisiert) und ein Cytosin an ein C-G-Paar (C-G=C). Wie man sieht, kann sich diese Struktur allerdings nur dann ausbilden, wenn der dritte Strang ausschließlich die Pyrimidinbasen C und T (oder U im Fall der RNA) enthält und ein Strang der Doppelhelix allein aus den Purinbasen G und A aufgebaut ist.

Claude Hélène, damals am Naturgeschichtlichen Museum in Paris, und Peter B. Derivan vom California Institute of Technology wiesen 1987 unabhängig voneinander nach, dass sich das Tripelhelixprinzip dazu nutzen lässt, Oligonukleotide (DNA-Einzelstränge von etwa 15 Basen Länge) herzustellen, die sich an ihre Hoogsteen-komplementäre Zielsequenz in einer Doppelhelix anlagern. Davon inspiriert, begann unsere Arbeitsgruppe die Suche nach anderen Molekülen, die denselben Trick beherrschen, aber mit weniger Einschränkungen. So sollten sie nicht nur aus G und A bestehende Sequenzen erkennen und zudem elektrisch neutral sein. Das Rückgrat der Nukleinsäuren enthält nämlich Phosphatgruppen, die unter den Bedingungen in der Zelle negative Ladungen tragen und so dafür sorgen, dass sich alle drei Stränge abstoßen. Das wirkt der Ausbildung einer Tripelhelix entgegen.

Unerwartete Invasion

Wir beschlossen deshalb, unseren neuen Molekülen ein Rückgrat zu verpassen, das von denselben Peptidbindungen zusammengehalten wird, die auch Aminosäuren zu Proteinen verketteten. Mit erprobten Methoden zum Knüpfen solcher Bindungen lassen sich auf einfache Weise hochstabile neutrale Fadenmoleküle herstellen. Die PNAs, die wir nach diesem Prinzip entwarfen, haben ein peptidartiges Rückgrat, das wesentlich einfacher aufgebaut ist als die Zucker-Phosphat-Ketten der DNA und RNA. Jeder Baustein kann eine natürliche Nukleinsäurebase (T, A, C oder G) tragen oder auch ein chemisch modifiziertes Exemplar mit speziellen Eigenschaften. Der Abstand zwischen den Basen eines PNA-Strangs stimmt mit dem in

TOMMY MOORHAN

der DNA oder RNA ziemlich gut überein. Kurze PNA-Ketten (PNA-Oligomere) bilden deshalb sehr stabile Duplexstrukturen sowohl miteinander als auch mit den natürlichen Nucleinsäuren, wobei sie sich nach dem Watson-Crick-Schema paaren.

Als wir nun PNAs, die nur Pyrimidinbasen enthielten, mit DNA-Doppelsträngen zusammenbrachten, geschah etwas Überraschendes. Die Peptidnucleinsäure nahm nicht den vorgesehenen Platz in der großen Furche der Doppelhelix ein. Stattdessen verdrängte sie einen der beiden DNA-Stränge und verband sich über Watson-Crick-Paarungen mit dem anderen. An dieses gemischte Doppel lagerte sich dann ein weiteres PNA-Molekül über Hoogsteen-Bindungen an, so dass eine PNA-DNA=PNA Tripelhelix entstand. Neben ihr verlief das verdrängte DNA-Stück als einzelsträngige, P-Loop genannte Schleife.

Diese so genannte Triplex-Invasion war biologisch wie medizinisch hochinteressant. Zum einen erwies sich die hybride Tripelhelix als hochstabil. Zum anderen spielen P-Loops bei zentralen biologischen Prozessen wie Transkription, DNA-Replikation und DNA-Reparatur eine wesentliche Rolle. So kann die Bildung einer solchen Struktur das Abschreiben eines Gens in Gang setzen. Außerdem lassen sich Einzelstrangschleifen medizinisch nutzen – etwa zur Diagnose von Erbkrankheiten. Oft muss das schadhafte Gen, bevor es sich nachweisen lässt, nämlich vervielfältigt werden, und der P-Loop eignet sich als spezifischer Startpunkt für diesen Kopierprozess.

PNAs können je nach ihrem Aufbau aber auch noch auf andere Arten mit DNA geeigneter Basensequenz interagieren. Von Interesse ist insbesondere die Doppel-Duplex-Invasion. Sie kommt zu Stande, wenn zwei PNA-Oligomere nicht gut genug zueinander passen, um eine PNA-PNA-Doppelhelix bilden zu können, aber ausreichend komplementär zu den beiden Strängen einer gewöhnlichen DNA-Helix sind, um sich mit diesen zu verbinden. Die PNAs zwingen sich dann zwischen die DNA-Helix und bilden zwei PNA-DNA-Doppelstränge.

Wie erwähnt, bildet sich nur dann eine Tripelhelix, wenn ein Strang der Ziel-DNA längere Abschnitte aus den Purinbasen A und G enthält. Bei der Doppel-Duplex-Invasion sind die Anforderungen an die DNA-Sequenz weniger strikt: Sie muss nur mindestens zur Hälfte aus A-T-Basenpaaren bestehen. Doch selbst diese Einschränkung ließe sich mit geeignet modifizierten Versionen von G und C lockern.

PNAs heften sich spezifischer und fester an komplementäre RNA- und DNA-Stränge, als diese sich untereinander verbinden. PNA-Oli-

gomere mit angehängten fluoreszierenden Gruppen eignen sich deshalb ideal zum Nachweis von Genen und Genvarianten in diagnostischen Tests. So können sie bei der Fluoreszenz-in-situ-Hybridisierung die Position bestimmter DNA-Sequenzen auf den Chromosomen anzeigen.

Chancen für die Medizin

Inzwischen haben zahlreiche Untersuchungen im Reagenzglas und an Zellkulturen auch den Beweis für die prinzipielle Fähigkeit von PNA-Oligomeren erbracht, durch Anlagerung an DNA die Transkription, Replikation und Reparatur von Genen gezielt zu hemmen oder zu aktivieren. Zudem gelang es bei verschiedensten Experimenten, meist in Zellkulturen und bei Mäusen, die Genexpression nach Art der Antisense-RNA-Interferenz auf der Stufe der Translation zu unterbinden. PNAs erreichen diese Blockade vermutlich allein durch ihre feste Bindung an die Botenmoleküle, die eine Übersetzung in Proteine an den Ribosomen verhindert. Enzyme, die bei der normalen Antisense-RNA-Interferenz RNA-DNA- und RNA-RNA-Doppelstränge abbauen, sollten keine Rolle spielen, weil sie mit den fremdartigen Strukturen nichts anfangen können. Allerdings ist das bisher erst für ein solches Enzym genauer untersucht. Dank ihres unnatürlichen Aufbaus sind PNA-Oligomere zudem im Zellmilieu hochstabil; denn weder Enzyme, die Peptide verdauen, noch solche, die Nucleinsäuren abbauen, erkennen sie als Substrat.

Matthew Wood von der University of Oxford und seine Mitarbeiter bewiesen 2007, dass die Blockade einer RNA durch PNA einen Proteinfekt beheben kann. Als die Forscher bei Mäusen mit Muskelschwund bestimmte PNAs in die Muskeln injizierten, entstand dort mehr Dystrophin, dessen Mangel die Erkrankung verursacht hatte. Der Eingriff verhinderte nämlich die Translation eines defekten Abschnitts im Dystrophin-Gen. Dadurch wurde die schädliche Mutation dort nicht in das Protein eingebaut, und der intakte Rest reichte für ein funktionsfähiges Rumpf-Dystrophin.

Wie natürliche Nucleinsäuren sind PNA-Oligomere große, hydrophile (Wasser liebende) Moleküle. Das hat den Nachteil, dass sie kaum ins Innere von Körperzellen, deren Hülle aus hydrophoben Lipidmembranen besteht, vordringen können. Deshalb werden sie rasch mit dem Urin ausgeschieden. So ist schon eine halbe Stunde nach der Injektion die Hälfte der verabreichten PNA-Menge wieder aus dem Körper einer Maus verschwunden. Medikamente auf PNA-Basis bleiben darum so lange ein Wunschtraum, bis es mit chemischen Modifikationen oder pharmazeutischen Formulie-

GRUNDLEGENDE EXPERIMENTE

Zahlreiche Untersuchungen haben ergeben, dass PNA-Oligomere biologische Prozesse in therapeutisch nutzbarer Weise beeinflussen können.

► Peter M. Glazer und seine Mitarbeiter an der Yale University in New Haven (Connecticut) zeigten an Zellkulturen, dass PNA über eine Triplex-Invasion für die Reparatur eines mutierten Gens sorgen kann, das die Blutkrankheit Thalassämie auslöst. Analog lassen sich vielleicht generell Erbkrankheiten behandeln, die auf Punktmutationen oder dem Verlust kurzer Genstücke beruhen.

► Eine Gruppe um David Corey vom Southwestern Medical Center der University of Texas in Dallas demonstrierte an menschlichen Brustkrebszellen, dass PNA die Transkription blockieren kann, indem sie sich an einen Abschnitt der DNA heftet, der unmittelbar, bevor die RNA-Polymerase mit dem Abschreiben beginnt, in die beiden Einzelstränge aufgetrennt wird.

► Wissenschaftler haben PNAs hergestellt, welche die Expression essenzieller Gene in Bakterien blockieren und so deren Wachstum hemmen oder sie sogar abtöten. Diese Entdeckung könnte zu einer neuartigen Klasse von Antibiotika führen, mit der sich der Resistenz zahlreicher Keime gegen herkömmliche Wirkstoffe begegnen ließe.

PNA erscheint als attraktiver Kandidat für eine Prä-RNA-Welt: Sie ist extrem stabil, einfach aufgebaut und kann Informationen speichern

rungen (Mischung mit Hilfssubstanzen) gelingt, ihre Bioverfügbarkeit zu steigern. Allgemein dreht sich die Forschung über Gene oder genartige Substanzen als Arzneimittel derzeit denn auch hauptsächlich darum, das Problem des Einschleusens zu lösen. Viele Wissenschaftler sehen darin die letzte Hürde auf dem Weg zur therapeutischen Anwendung.

Künstliche Lebewesen

Da PNAs eine Kombination aus Peptid und Nukleinsäure darstellen, könnten sie in künstlichen Zellen sowohl wie DNA die Erbinformation speichern als auch wie Enzyme, die normalerweise aus Proteinen bestehen, Stoffwechselprozesse katalysieren. Insbesondere diese potenzielle Doppelfunktion hat sie ins Blickfeld von Wissenschaftlern gerückt, die künstliches Leben erschaffen wollen.

Doch in einem Punkt ist RNA der PNA deutlich überlegen: Es gibt zahlreiche Beispiele für natürliche und künstliche RNA-Moleküle mit katalytischen Eigenschaften; PNAs mit der gleichen Fähigkeit wurden dagegen bisher noch nicht beschrieben. Allerdings verknäueln

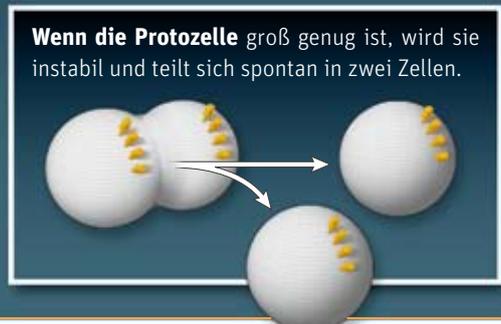
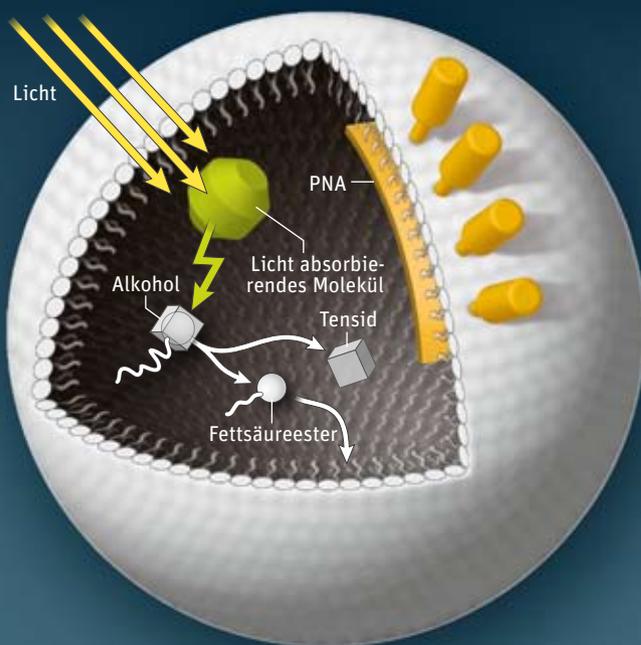
oder falten sie sich genau wie Proteine und RNAs und bilden dabei so genannte Sekundär- und Tertiärstrukturen, die für die katalytische Funktion entscheidend sind. Deshalb ist es vielleicht nur eine Frage der Zeit, bis die Herstellung katalytisch wirksamer PNAs gelingt.

Einer der beliebtesten Ansätze zum Erschaffen von Leben im Labor beinhaltet die Suche nach RNA-Molekülen, die selbstreplizierend sind, also ihre eigene Synthese katalysieren. Im Prinzip könnten sich dafür auch PNA-Moleküle oder verwandte Substanzen eignen. Autokatalytische Replikationssysteme auf der Basis kurzer Oligonukleotide wurden bereits beschrieben, ebenso selbstreplizierende kurze Peptide. Demnach sollte es möglich sein, auch selbstreplizierende PNA-Systeme zu konstruieren. Sie hätten durchaus Vorteile, würden sie doch das chemisch stabile Peptidrückgrat von PNAs mit deren Vielseitigkeit und Spezifität beim Erkennen von Basensequenzen verbinden.

Ein System zur Replikation genetischer Information ist zwar eine besonders wichtige Komponente lebender Organismen, aber

SCHEMA FÜR KÜNSTLICHES LEBEN

Forscher, die aus toter Materie neuartige Lebensformen erschaffen wollen, liebäugeln mit der Idee, als Träger der Erbinformation PNA einzusetzen, da sie einfacher aufgebaut und stabiler ist als DNA oder RNA. In dem hier gezeigten Modell bilden Tensidmoleküle durch Selbstorganisation eine kugelförmige »Mizelle«. In deren Außenhülle bettet sich die PNA ein. Durch Anlagerung kurzer, komplementärer Stücke kann sie sich vermehren (rechts oben). Andere Moleküle in der Membran erzeugen mit Hilfe von Sonnenlicht aus Vorläufersubstanzen weitere Tensidmoleküle. Diese zwingen sich zusätzlich in die Außenhülle, wodurch sich die Mizelle vergrößert und schließlich teilt (rechts unten). Selbstorganisation, Stoffwechsel (Nutzung einer Energiequelle) und Replikation sind die grundlegenden Eigenschaften des Lebens.



TOMMY MOORHAN

nicht die einzige. Im Grunde lässt sich Leben als Netzwerk chemischer Reaktionen mit ein- und ausgehenden Energie- und Stoffströmen verstehen, das sich in einem relativ stabilen Zustand, aber nicht im Gleichgewicht befindet (Spektrum der Wissenschaft 11/2007, S. 64). Die nächste große Herausforderung besteht also darin, ein selbstreplizierendes Molekül in ein umfangreicheres System zu integrieren, das auch andere katalytische Aktivitäten aufweist und einen Stoffwechselkreislauf aufrechterhält. Dieses Gesamtsystem muss zudem in eine Hülle – etwa ein Lipidbläschen – verpackt werden, was einige Forscher dann als »Protozelle« bezeichnen.

Steen Rasmussen vom Los Alamos National Laboratory und Liaohai Chen vom Argonne National Laboratory haben ein Schema entworfen, wie eine primitive derartige Zelle auf PNA-Basis funktionieren könnte (siehe Kasten links). Ihre Hülle würde sich aus Tensidmolekülen – langkettigen Fettsäuren mit hydrophobem Schwanz und hydrophilem Kopf – selbst zusammensetzen. Damit sich die PNA in die Lipidmembran einbettet, müsste man ihr Rückgrat so abwandeln, dass es lipophil wird. Durch Anlagerung kurzer PNA-Stücke könnte ein zweiter Strang mit komplementärer Sequenz entstehen. Ein Licht absorbierendes Molekül sollte für Nachschub an Tensidmolekülen sorgen, die sich in die Hülle einlagern, so dass sich die Protozelle vergrößert. Ab einer bestimmten Größe würde diese instabil werden und sich von selbst teilen.

Dieses Schema ist bisher allerdings rein spekulativ. Außerdem krankt es an einem grundlegenden Problem, das Chemiker erst noch lösen müssen: Die doppelsträngige PNA spaltet sich wegen ihrer großen Stabilität nicht spontan in Mutter- und Tochterstrang auf. Bis zur Herstellung funktionsfähiger künstlicher Zellen ist es also noch ein langer, steiniger Weg.

Ursprung des Lebens

Die Versuche zur Erschaffung künstlichen Lebens im Labor haben vor allem auch das Ziel, die Entstehung des natürlichen Lebens auf der Erde besser zu verstehen. Eine genaue mikrobiologische Betrachtung der heutigen Lebensformen macht klar, dass die RNA vermutlich urtümlicher ist als DNA und Proteine. Nur sie kann sowohl den Genotyp (die genetische Information) als auch den Phänotyp (die katalytischen Funktionen) eines Organismus verkörpern. Aus diesem Grund sowie aus anderen Erwägungen heraus sind viele Wissenschaftler inzwischen der Meinung, dass der Vorläufer unserer heutigen DNA/RNA/Protein-Welt eine RNA-Welt gewesen sein muss (Spektrum der Wissenschaft, Spezial 3/1994, S. 44).

HYPOTHETISCHE PNA-WELT

Nach Ansicht einiger Forscher könnten die frühesten irdischen Lebensformen PNA als Informationsträger verwendet haben; denn sie ist einfacher aufgebaut und stabiler als RNA, die nach allgemeiner Auffassung vor der DNA entstand. Aus der »PNA-Welt« hätte sich dann eine »RNA-Welt« entwickelt, aus der schließlich das heutige Leben hervorging, das auf DNA, RNA und Proteinen beruht.

JEAN-FRANÇOIS POUBEVIN

Allerdings ist noch immer ziemlich rätselhaft, wie unter primitiven präbiotischen Bedingungen RNA-Moleküle entstanden sein sollen. Das betrifft vor allem eine wesentliche Komponente ihres Rückgrats: den Zucker Ribose. Doch selbst wenn sich RNA-Moleküle tatsächlich spontan gebildet haben sollten, wären sie ungeschützt kaum beständig genug gewesen, um eine zentrale Rolle in der anfänglichen chemischen Evolution des Lebens zu spielen. Vor diesem Hintergrund erscheint die PNA als attraktiver Kandidat für eine Prä-RNA-Welt: Sie ist extrem stabil, einfach aufgebaut und kann Sequenzinformationen speichern.

Stanley L. Miller hatte in wegweisenden Experimenten vor 50 Jahren demonstriert, dass unter Bedingungen ähnlich denen auf der urzeitlichen Erde Aminosäuren entstehen können. Im Jahr 2000 wies er bei analogen Versuchen auch Vorläufer von PNA nach. Andere Forscher haben zudem gezeigt, dass sich Sequenzinformationen von einem PNA-Oligomer auf andere PNA-Oligomere oder RNA-Moleküle übertragen lassen – unverzichtbare Voraussetzung für eine PNA-Welt und den späteren Übergang zu ihrem RNA-Nachfolger. Sicher ist es gewagt, von solchen Einzelbeobachtungen auf die Existenz einer Prä-RNA-Welt auf Basis von PNA oder einem sehr ähnlichen Molekül zu schließen. Deshalb steht diese Hypothese so lange auf wackligen Füßen, bis nicht wenigstens katalytisch aktive PNA-Moleküle gefunden wurden.

Auch 15 Jahre nach der Entdeckung der PNA-Moleküle sind noch viele Fragen offen. Gibt es katalytisch aktive Exemplare? Wie lassen sich PNAs für Therapie Zwecke in Körperzellen einschleusen? Ist eine vollsynthetische Lebensform auf PNA-Basis im Labor herstellbar? Ich persönlich glaube fest daran, dass nach weiteren 15 Jahren Antworten auf diese und viele andere Fragen gefunden sein werden. <



Peter E. Nielsen leitet das Zentrum für Biomolekulare Erkennung an der Universität Kopenhagen, an der er 1980 promoviert hat. Er ist Miterfinder der Peptidnukleinsäuren und Mitbegründer der Biotechnologiefirmen Pantheco und PNA Diagnostics, welche medizinische Anwendungen der neuartigen Moleküle entwickeln und inzwischen zu den Unternehmen Santaris beziehungsweise Applied Biosystems gehören. Auf sein Konto gehen mehr als 20 Patente und Patentanmeldungen.

Böhler, C. et al.: Template Switching between PNA and RNA Oligonucleotides. In: Nature 376, S. 578–581, 17. August 1995.

Nielsen, P. E.: Peptide Nucleic Acid. A Molecule with Two Identities. In: Accounts of Chemical Research 32, S. 624–630, Juli 1999.

Orgel, L. E.: Prebiotic Chemistry and the Origin of the RNA World. In: Critical Reviews in Biochemistry and Molecular Biology 39, S. 99–123, März/April 2004.

Szostak, J. W. et al.: Synthesizing Life. In: Nature 409, S. 387–390, 18. Januar 2001.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/1005450.

MIGRÄNE – LEIDER KEINE EINBILDUNG

Als Ursache dieser besonderen, rasenden Kopfschmerzen und der typischen Begleitsymptome vermuten Forscher jetzt Erregungsdefekte im Hirnstamm.

Von David W. Dodick und J. Jay Gargus

In Kürze

► Migräne ist **mehr als nur Kopfschmerz**. Sie verläuft in unterscheidbaren Phasen, und die Patienten erleiden massive, meist einseitige, pulsierende Kopfschmerzen, die stunden- oder tagelang andauern.

► Bisher suchten Forscher die Ursache bei Fehlfunktionen von Blutgefäßen. Neuere Studien zeigen aber, dass es sich um eine **neurologische Störung** handelt. Auffallend ist eine großflächige Erregungswelle, die weite Gebiete des Gehirns überflutet und oft mit einer Aura einhergeht.

► Die Wurzel des Übels könnte eine **Fehlfunktion im Stammhirn** sein.

► Anhand der neuen Erkenntnisse entwickeln die Forscher **effektivere Migränetherapien**.

Wer Migräne aus eigenem Erleben kennt, dem muss niemand erzählen, wie quälend und zermürend die Attacken sind. Schätzungsweise über 300 Millionen Menschen weltweit setzt der heftige, pulsierende Kopfschmerz mit seinen Begleiterscheinungen immer wieder für Stunden oder sogar Tage praktisch außer Gefecht. Wer von diesem Leiden verschont ist, mag das Befinden während eines Migräneanfalls am ehesten nachvollziehen können, falls er einmal eine schwere Höhenkrankheit durchgemacht hat: mit rasenden Schmerzen, begleitet von Übelkeit und starker Licht-, oft auch Geräuschempfindlichkeit.

»Dass noch niemand an Migräne gestorben ist, erscheint jedem, der sich mitten in einem Anfall befindet, als ein schwacher Trost«, schreibt die US-amerikanische Schriftstellerin Joan Didion in dem Essay »Im Bett«. Er ist enthalten in ihrem 1979 erschienenen Band »Das weiße Album. Eine kalifornische Geisterbeschwörung«.

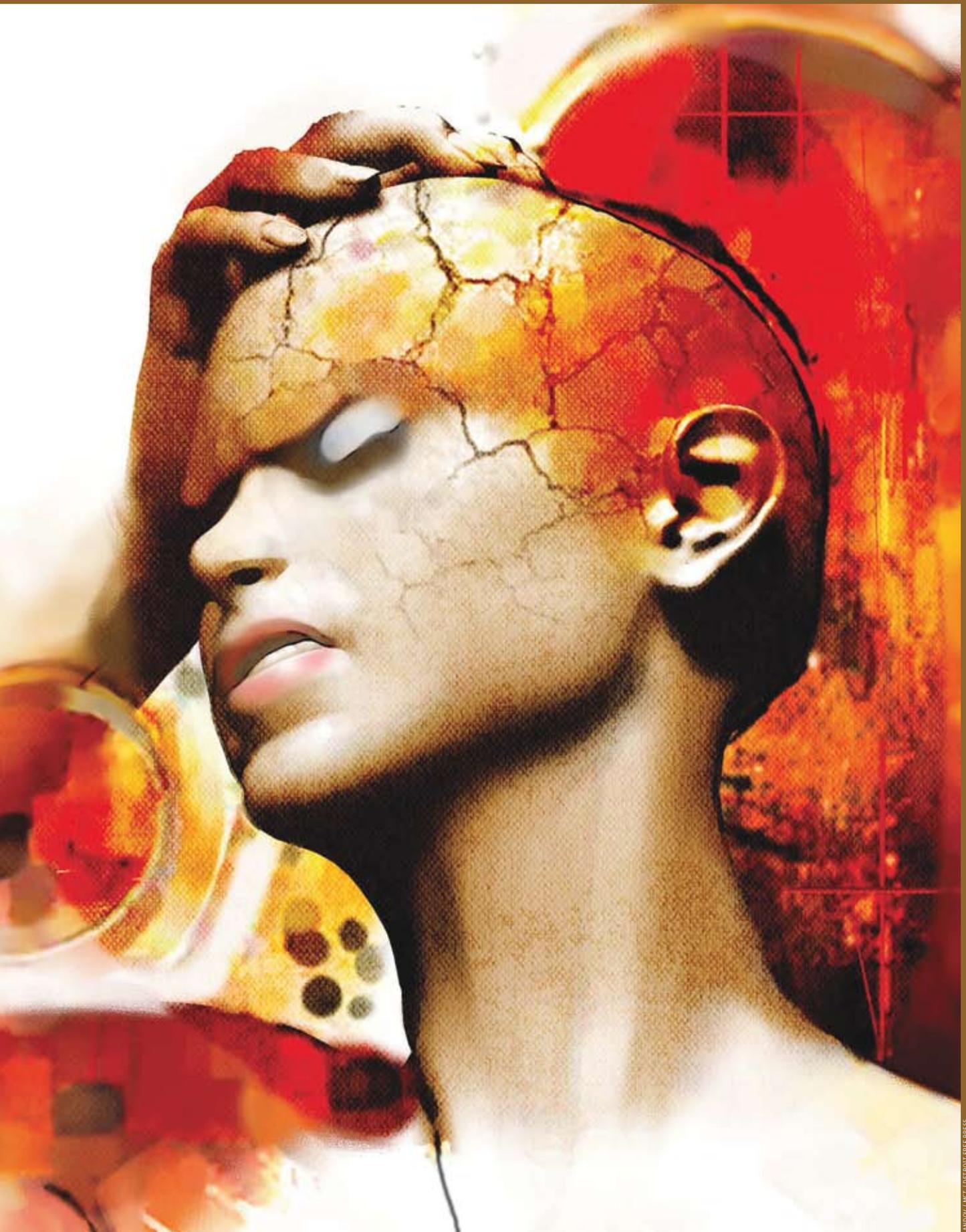
Offenbar litten Menschen bereits vor Jahrtausenden an dieser besonderen Krankheit. Trotzdem fühlen sich Migränepatienten selbst noch heute viel zu häufig auch vom Arzt nicht ernst genommen und nur unzureichend behandelt. Ihr Leiden wird wie kaum ein anderes allzu oft bagatellisiert, ja nicht einmal richtig erkannt. Andererseits suchen viele Betroffene erst gar keine fachliche Behandlung, weil sie glauben, die Medizin könne ihnen doch nicht wirklich helfen. Tatsächlich kommt es immer noch vor,

dass Ärzte eine Migräne geringschätzig abtun, wie es Didion vor 30 Jahren beschrieb: »Denn ich hatte keinen Gehirntumor, keine Überanstrengung der Augen, keinen hohen Blutdruck, mir fehlte überhaupt nichts: Ich hatte bloß Migränekopfschmerzen, und Migränekopfschmerzen waren, wie jeder, der sie nie hatte, wusste, nur Einbildung.«

Das ändert sich nun endlich. Laut einem Bericht der Weltgesundheitsorganisation zählt unter den chronischen Krankheiten, die das Leben stark beeinträchtigen, Migräne zu den ersten vier. Die Volkswirtschaft kostet das Leiden Unsummen – von den Arbeitsausfällen bis hin zur Frühinvalidität. Allein die Behandlung verschlingt in Deutschland jährlich 500 Millionen Euro, die Folgekosten schätzungsweise das Zehnfache. Nach einer anderen Berechnung kostet Migräne in der EU im Jahr mindestens 27 Milliarden Euro und gilt als die teuerste neurologische Störung.

Dass das zermürende Leiden allmählich die ihm gebührende Aufmerksamkeit erhält, verdanken wir vor allem neuen Erkenntnissen durch Hirnaufnahmen, aus Genetik und Molekularbiologie. Deren Befunde weisen offenbar zum selben medizinischen Kern. Dies lässt uns hoffen, die Ursachen der Migräne bald wirklich in den Griff zu bekommen. Dann endlich sollten auch Therapien möglich werden, die besser helfen als bisherige Angebote. Das Ziel wäre, die grausamen Attacken gleich zu Beginn abzuwehren oder besser noch im Vorhinein zu verhindern.

Das wohl schlimmste Symptom von Migräne: der quälende Kopfschmerz, der stunden- oder tagelang anhält



LANDOV / IKT / DETROIT/REE PRESS

Mitunter sehen die Patienten bei der Aura verzerrte Bilder oder illusionäre Strukturen. Hier hat ein Patient versucht, solch eine Wahrnehmung zu malen. Typisch sind die gezackten Formen und die sehr hellen Flächen.



MIGRAINE ACTION ASSOCIATION UND BOEHRINGER INGELHEIM

Eine tragfähige Theorie der Migräne hat ihren sämtlichen Begleitsymptomen Rechnung zu tragen. Zugleich muss sie einbeziehen, dass nicht jeder Betroffene an allen Erscheinungen leidet. Auch sollte hineinpassen, dass die auslösenden Faktoren sowie die Häufigkeit, Qualität und Dauer der einzelnen Episoden von Patient zu Patient stark variieren. Im statistischen Durchschnitt werden die Patienten ein- bis zweimal im Monat heimgesucht, und im Mittel dauern die Kopfschmerzen dann einen

Tag lang. Doch jeder zehnte Betroffene erfährt wöchentlich eine Attacke, bei jedem fünften hält sie zwei oder drei Tage lang an, und bei nahezu jedem siebten setzt seine Migräne mindestens die Hälfte des Monats zu. Oft, aber nicht immer, tritt der Schmerz halbseitig auf. Die auslösenden Faktoren sind so vielfältig, dass anfällige Personen sie kaum völlig meiden können: Schuld ist bald Alkohol, bald Flüssigkeitsmangel oder körperliche Anstrengung, die Menstruation, psychischer Stress, ein Wetterumschwung oder der Wechsel der Jahreszeit, eine Allergie, Schlafmangel, Hunger, eine Höhenveränderung oder Neonlicht. Migräne kann in jedem Alter auftreten. Auch sucht sie beide Geschlechter heim. Allerdings sind zwei Drittel der Patienten Frauen zwischen 15 und 55 Jahren.

Steigen Lebersäfte zu Kopf?

Schon früh bemühten sich Ärzte, das Leiden zu erklären. Der Grieche Galen (Claudius Galenus, um 129–199) glaubte, dass Lebersäfte in den Kopf steigen. Seine Beschreibung einer Hemikranie (halbseitiger Kopfschmerz) passt zum heutigen Bild von Migräne. So leitet sich auch unser Wort dafür von dem griechischen Begriff *hemikranion* her.

Gelehrte des 17. Jahrhunderts fanden einen neuen Schuldigen: einen gestörten Blutfluss im Gehirn. In präziserer Form galt diese Ansicht weit gehend bis in die 1980er Jahre. Maßgeblich formulierte sie der New Yorker Arzt Harold G. Wolff (1898–1962). Der Neurologe glaubte zu erkennen, dass sich vor einer Attacke Hirngefäße zuerst ungebührlich verengen. Den Schmerz würde daraufhin eine zu starke Dehnung von Gefäßen auslösen.

Neuere Hirnaufnahmen während Migräneanfällen zeigen etwas anderes. Ein Abfall der Blutversorgung geht den Kopfschmerzen offenbar meist nicht voraus, im Gegenteil: Der Blutdurchfluss steigt vorher – um das Dreifache. Sind die Kopfschmerzen aber erst da, herrscht anscheinend wieder ein normaler, teils sogar ein verminderter Durchfluss.

Auch die Ursachen von Migräne sieht die Mehrheit der Mediziner heute woanders. Nach ihren Erkenntnissen scheint eine neurologische Störung, eine Fehlfunktion im Nervensystem, vorzuliegen. Viele Forscher meinen, dass im so genannten Hirnstamm (Stammhirn) etwas nicht stimmt, also in den älteren, tief liegenden Hirnteilen etwa vom Mittelhirn abwärts. Die neueren Auffassungen resultieren hauptsächlich aus Forschungen über zwei Erscheinungen der Krankheit: Zum einen betreffen die Studien die so genannte Aura, die einer Attacke oft – längst nicht immer – vorausgeht, zum anderen den Kopfschmerz selbst.

TYPISCHE PHASEN EINES MIGRÄNEANFALLS

Migräne kündigt sich oft, doch längst nicht immer durch andere Symptome an. Auch nachdem der Kopfschmerz abgeklungen ist, fühlen sich viele Patienten noch eine Zeit lang krank.

Anteil Betroffener

60 Prozent

Vorbotenphase:

MERKMALE: Konzentrationsschwierigkeiten, Gähnen, Erschöpfung, hohe Licht- und Geräuschempfindlichkeit

DAUER: einige Stunden bis einige Tage

30 Prozent

Auraphase:

MERKMALE: visuelle Illusionen wie Lichtpunkte und Blitze, und an denselben Stellen bald darauf blinde oder dunkle Flecken

DAUER: 20 bis 60 Minuten

100 Prozent

Kopfschmerzphase:

MERKMALE: quälender Kopfschmerz, manchmal über eine ganze Kopfseite; dabei Licht- und Geräuschempfindlichkeit, Übelkeit und Erbrechen.

DAUER: vier Stunden bis zu drei Tage

70 Prozent

Rückbildungsphase:

MERKMALE: anhaltende Empfindlichkeit für Licht und Bewegung; Lethargie, Erschöpfung, unscharfes Sehen; manche Patienten nennen das »Zombie-Phase«

DAUER: einige Stunden bis mehrere Tage

Als Aura bezeichnen Ärzte seit ungefähr 100 Jahren die Sinnesillusionen, die den Schmerz bei etwa einem Drittel der Patienten ankündigen. Das Wort war seit der Spätantike für die sensorischen Halluzinationen gebräuchlich, die manchmal direkt vor einem epileptischen Anfall auftreten. (Tatsächlich dürfte zwischen beiden Krankheiten eine Beziehung bestehen, denn bei Migränpatienten kommen gelegentlich Krampfanfälle vor – wie auch umgekehrt Epileptiker nicht selten unter Migräneattacken leiden.) Hauptsächlich handelt es sich bei der Aura der Migräne um imaginierte visuelle Erscheinungen, etwa vorgetauschte Lichtwahrnehmungen oder verzerrte Linien und Bilder. Der Betroffene sieht dann zum Beispiel sehr helle Punkte oder Lichtblitze, leuchtende Spuren oder nicht existente geometrische Muster (Bild links). Bald danach erscheinen an derselben Stelle oft blinde oder dunkle Flecken. Manchmal sind die Trugbilder von einem Kribbeln oder Schwächegefühl auf einer Körperseite begleitet. Auch Sprachstörungen können dabei auftreten. Nicht immer geht dem Kopfschmerz eine Aura nur voraus. In einzelnen Fällen erscheinen die Sinnesstörungen sogar erst kurz nach dem Schmerzbeginn, und teils bleiben sie die ganze Zeit über bestehen.

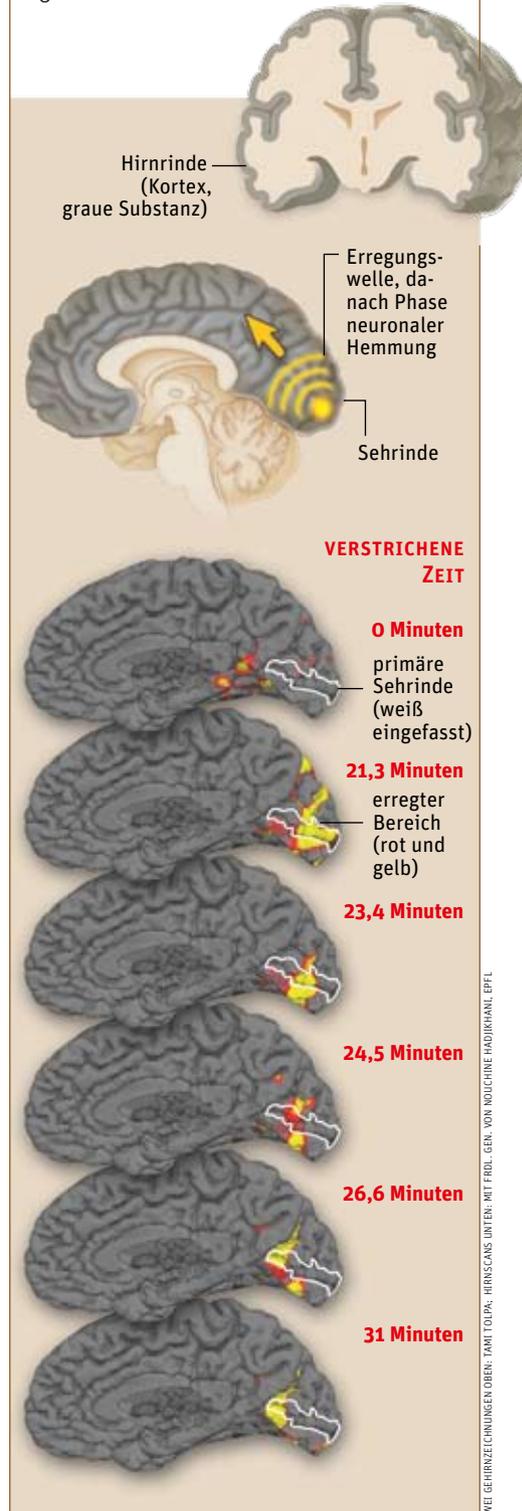
Die Funkstille danach

Nach heutiger Ansicht ist die Aura eine Begleiterscheinung quasi eines großflächigen neuronalen Erregungssturms – fachlich kortikale Streudepolarisation genannt –, der Teile der Hirnrinde überzieht. Manche Forscher sprechen auch von einer kortikalen Erregungswelle. Auf die übermäßige Aktivierung der Neurone in der Hirnrinde folgt aus physiologischen Gründen eine besonders intensive, längere Phase der Hemmung, in der dieselben Nervenzellen keine Signale erzeugen können. (Im Englischen heißt die Erscheinung nach dieser Hemmphase *cortical spreading depression*.) Dass solche großen Erregungsstürme und die Funkstille danach möglich sind, wies der brasilianische Neurobiologe Aristides Leão zum ersten Mal 1944 bei Tieren nach. Der Arzt Edward Lieving hatte allerdings schon im 19. Jahrhundert Ähnliches als Ursache von Migräne vermutet. Erst vor Kurzem gelang es schließlich, einen Zusammenhang von Streudepolarisation und Migräne experimentell aufzuzeigen.

Normalerweise kehren sich, wenn sich elektrische Signale über Nervenzellausläufer ausbreiten, die Ladungsverhältnisse (also die elektrische Spannung) an deren Membranen vorübergehend um – indem verschiedene Ionen rasch die Seite wechseln. Der neue Zu-

STURM IM GEHIRN

Offenbar kommt die Migräneaura durch eine so genannte Streudepolarisation zu Stande: eine große Erregungswelle, gefolgt von einer Phase der Erregungsstille. Die Erscheinung wandert mit zwei bis drei Millimetern in der Minute durch die Hirnrinde. Die Bilder unten sind nach Hirnaufnahmen gezeichnet.

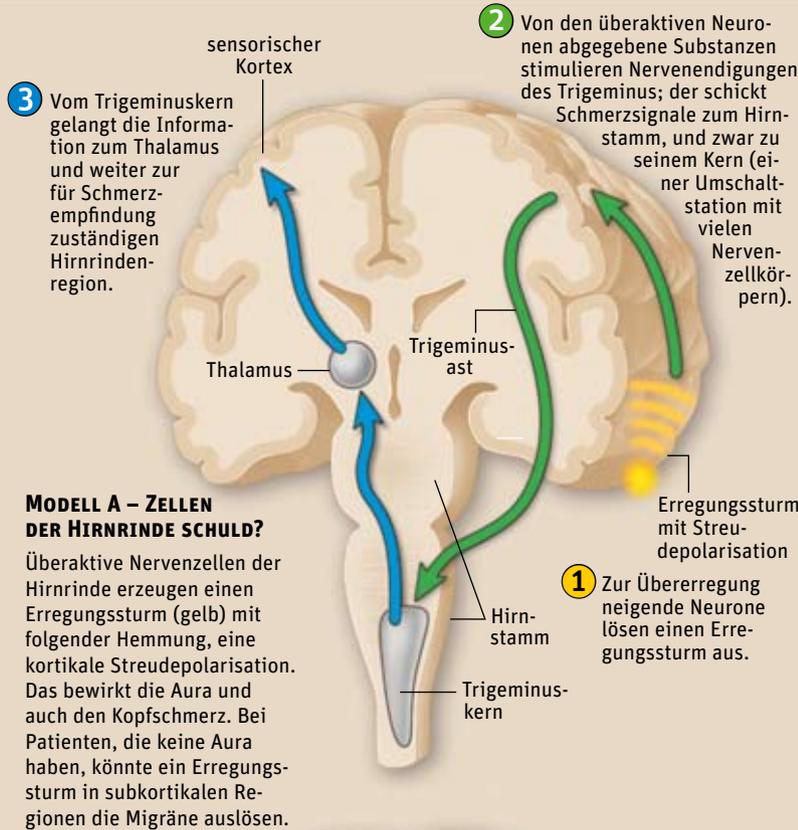


Nach den Lichterscheinungen sehen die Patienten an derselben Stelle blinde oder dunkle Flecken

ZWEI GEHIRNZEICHNUNGEN OBEN: TAMM TOUPE; HIRNSCANS UNTEN: MIT FRIEDL GEN. VON NDOUCINE HADJIKRANI, EPL

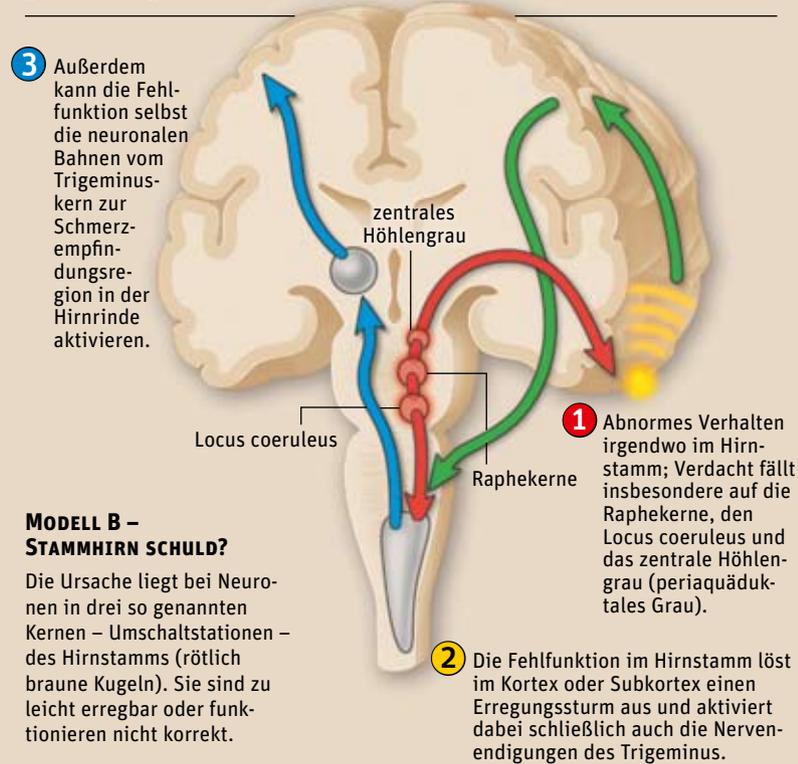
WURZELN DES MIGRÄNESCHMERZES

Noch diskutieren Forscher mehrere Modelle, was einen Migränekopfschmerz ursächlich auslöst. Der lange grüne, nach unten führende Pfeil bezeichnet den Signalweg von Schmerzreizen außerhalb des Gehirns über einen Ast des Trigemini, eines Gesichtsnervs.



MODELL A – ZELLEN DER HIRNRINDE SCHULD?

Überaktive Nervenzellen der Hirnrinde erzeugen einen Erregungssturm (gelb) mit folgender Hemmung, eine kortikale Streudepolarisation. Das bewirkt die Aura und auch den Kopfschmerz. Bei Patienten, die keine Aura haben, könnte ein Erregungssturm in subkortikalen Regionen die Migräne auslösen.



MODELL B – STAMMHIRN SCHULD?

Die Ursache liegt bei Neuronen in drei so genannten Kernen – Umschaltstationen – des Hirnstamms (rötlich braune Kugeln). Sie sind zu leicht erregbar oder funktionieren nicht korrekt.

stand heißt Depolarisation. Die Zellen kontrollieren diese Strömungen sowie die sofortige Rückführung der Ionen genauestens mit Hilfe von verschiedenen speziellen Ionenkanälen und -pumpen in den Membranen. Die Gegenreaktion schießt allerdings etwas über. Dadurch herrscht nach einem durchgeflossenen Signal kurzfristig ein Hyperpolarisation genannter Zustand, in dem die Membranen nicht nochmals erregbar sind.

All diese Vorgänge fallen bei einer Streudepolarisation besonders stark aus. Nicht nur die Erregungswelle, sondern auch die anschließende erzwungene Funkstille ist großflächig und intensiv. Außerdem besteht die Hemmung länger als normal. Das alles passt zu den vorn beschriebenen Unterschieden im Blutfluss im Vorfeld von und bei einer Migräne. Denn wenn viele aktivierte Neurone Signale weiterleiten, benötigen sie dafür viel Energie, sprich eine hohe Blutzufuhr. In der Phase der Funkstille verbrauchen sie nur wenig. Auch die Symptome einer Aura lassen sich hiermit gut erklären.

Noch manch anderes spricht dafür, dass hinter der Aura eine Streudepolarisation steht. So deckt sich der zeitliche und räumliche Verlauf gut mit dem Erleben der Patienten. Das zeigen Hirnaufnahmen mit modernen bildgebenden Verfahren. Solch eine Erregungswelle pflügt mit zwei bis drei Millimetern pro Minute von hinten her über die Hirnrinde zu wandern, wobei sie auch über den hinten gelegenen primären visuellen Kortex hinwegzieht, wo normalerweise die Sinneseindrücke vom Auge eintreffen (Kasten S. 53). Die Reihenfolge der anderen Missempfindungen und Sinnesstörungen passt genau zum Verlauf der Welle, wie sie nacheinander andere Rindengebiete quert. Dass manche Patienten nach den überhellen Flecken oder Mustern anschließend an genau denselben Stellen dunkle Flecken sehen, erklärt sich überdies mit der besonders intensiven Hemmung der zuvor unmäßig erregten Hirnareale. Anscheinend fallen diese Gebiete einfach vorübergehend aus.

Womöglich kann es auch genetische Ursachen haben, dass eine kortikale Streudepolarisation zumindest bei einigen Migränepatienten auftritt. Schon an sich dürften die meisten Formen des Leidens unter anderem auf Erbanlagen beruhen. In manchen Familien tritt Migräne gehäuft auf. Außerdem erkrankten bei eineiigen Zwillingen sehr viel eher beide daran als bei zweieiigen. Beides spricht für eine starke genetische Beteiligung. Eine einzige Mutation allein ist aber ganz sicher nicht schuld. Vielmehr müssen offenbar eine Anzahl ungünstiger Gene zusammenkommen, wobei jede dieser Erbanlagen einen geringen Anteil zur

Krankheit beisteuert. Es scheint sich demnach um eine der verbreiteten so genannten komplexen polygenetischen Krankheiten zu handeln, zu denen etwa Diabetes, Krebs, Autismus und Bluthochdruck zählen. Daneben existieren sicherlich auch nichtgenetische Einflüsse, denn selbst von eineiigen Zwillingen leidet manchmal nur einer an Migräne.

Noch wissen die Mediziner nicht, welche Gene generell die Anfälligkeit für Migräne oder eine Aura mitverschulden. Es gibt aber eine eher seltene schwere, deutlich erbliche Form, die familiäre hemiplegische Migräne. Bei diesen Patienten scheinen falsch funktionierende Ionenkanäle und -pumpen an Nervenzellen die Aura und den Kopfschmerz zu verursachen. Forscher fanden schon an mehreren Genen Mutationen für deren Moleküle. Jede jener Veränderungen könnte die Symptome allein erzeugen. Denn die betreffenden Nervenzellen sind nun ungewöhnlich stark erregbar. Dies alles bestärkt zudem den Verdacht, dass bei anderen Migräneformen etwas mit dem Ionentransport durch die Nervenzellmembranen nicht stimmt. Somit könnte es sich letztlich um eine Ionenkanalkrankheit handeln.

Das Gehirn selbst spürt keinen Schmerz

Auch ist noch nicht klar, ob eine Aura immer, oder allein, auf Fehler beim Ionentransport zurückgeht. Genauso wenig steht fest, ob obige Gene bei der Mehrheit der Migräneformen überhaupt mitwirken. Immerhin haben die genetischen Befunde aber den Verdacht aufgebracht, dass die kortikale Streudepolarisation mit Ionenkanalfehlern zusammenhängen könnte. Sollte sich dies bewahrheiten, wäre das ein guter Ansatzpunkt für zielgenaue Migränemedikamente.

Doch wie erklärt sich der Kopfschmerz? Er quält ebenso jene Patienten, die keine Aura erleben. Bisher ist nur klar, wo er unmittelbar entsteht, nämlich bei den Hirnhäuten und den sie versorgenden Blutgefäßen. Das Gehirn selbst ist schmerzempfindlich. Für Schmerzreize sensible Nervenverzweigungen erreichen die Hirnhäute von außen her. Sie gehören zu Verästelungen des so genannten Trigeminusnervs, der auch Abzweigungen ins Gesicht und in die Kiefer schickt. Der Trigeminus leitet die Schmerzsignale zum so genannten Trigeminuskern, einer Schaltstelle im Hirnstamm, wo dieser große Nerv entspringt. Von dort gelangt die Information über den Thalamus zu Gebieten der Hirnrinde, die für Schmerzwahrnehmung zuständig sind (Kasten links).

Was die Schmerzattacken letztlich auslöst, ist noch strittig. Vor allem über zwei Stand-



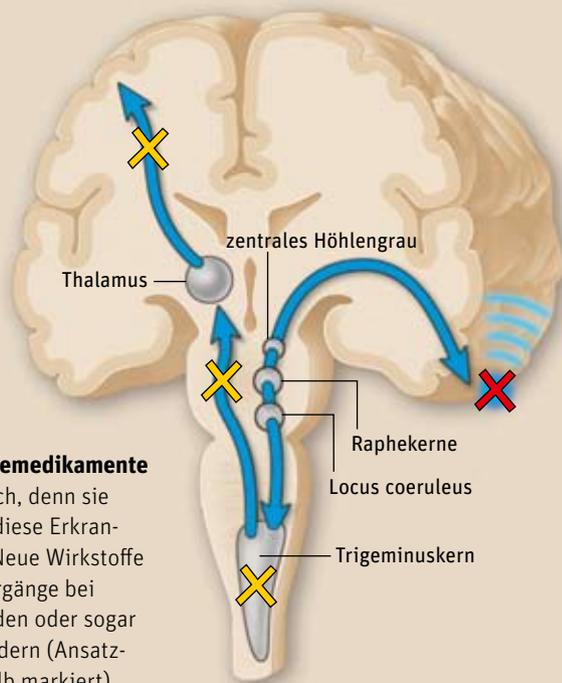
punkte wird diskutiert. Nach der einen Vorstellung liegt die Ursache für die Migräne unmittelbar bei der Streudepolarisation – somit also bei überempfindlichen Nervenzellen, die zu leicht erregt werden (Kasten links, oben). Der Schmerz kommt demnach zu Stande, weil der kortikale Erregungsturm die Nervenendigungen des Trigeminus über dabei freigesetzte Stoffe sozusagen direkt stimuliert. Denn wenn er über die Hirnrinde zieht, werden Ionen und neuronale Botenstoffe (Neurotransmitter) wie Glutamat und Stickstoffmonoxid ausgeschüttet. Dass dieser Weg im Prinzip möglich ist, haben Tierstudien erwiesen.

Mit dem Modell ließe sich sogar erklären, wieso ein größerer Teil der Migränepatienten keine Aura erlebt. In ihrem Fall würde die Erregungswelle nur in Bereichen der Hirnrinde auftreten, deren Aktivierung in der Phase vor dem Kopfschmerz keine deutlichen äußer-



Hildegard von Bingen (1098–1179) illustrierte ihr theologisches Hauptwerk, die Glaubenskunde »Liber Scivias Domini« (»Wisse die Wege des Herrn«), mit kunstvollen, farbenfrohen Miniaturen. Dieses Bild stellt das Weltall dar. Schon zu Lebzeiten wurde die Mystikerin wegen ihrer geistigen Visionen als Heilige verehrt. Mediziner glauben, dass sie auch Auraerlebnisse verarbeitet.

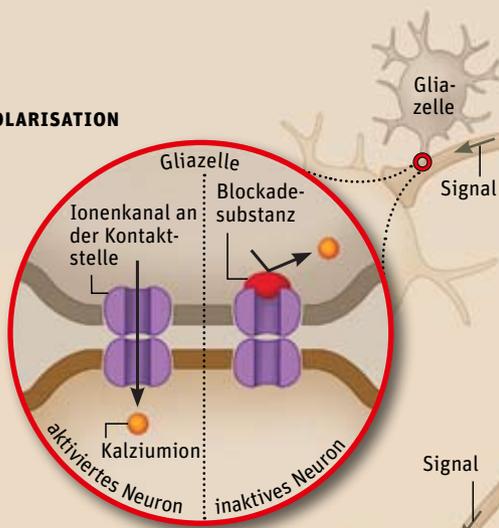
ANSATZPUNKTE FÜR ZIELGENAUE THERAPIEN



Bisherige Migränemedikamente wirken unspezifisch, denn sie wurden nicht für diese Erkrankung entwickelt. Neue Wirkstoffe sollen speziell Vorgänge bei Migräne unterbinden oder sogar die Anfälle verhindern (Ansatzpunkte rot und gelb markiert).

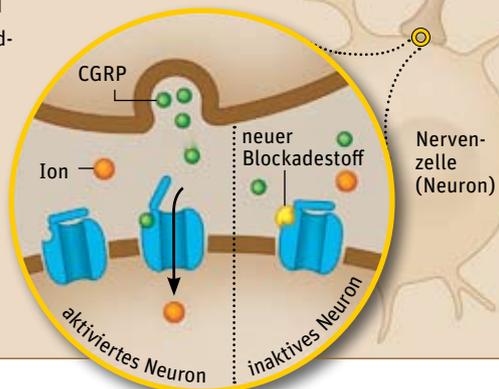
X KORTIKALE STREUDEPOLARISATION UNTERBINDEN

Bei einer Streudepolarisation strömen Kalziumionen über enge Kontakte (so genannte *gap junctions*) von Glia- in Nervenzellen, was letztere aktiviert. Neue Wirkstoffe versperren die betreffenden Ionenkanäle.



X SCHMERZSIGNAL VOM TRIGEMINUS AUF DEM WEG STOPPEN

Besser als die bisher oft verordneten Triptane mit ihren unerwünschten Nebenwirkungen helfen offenbar neue Substanzen, die das Neuropeptid CGRP blockieren. Es hilft bei der Übermittlung von Schmerzsignalen.



lichen Symptome, vor allem keine Illusionen hervorruft. Oder vielleicht ereignet sich die Streudepolarisation manchmal gar nicht in der Hirnrinde, sondern in tiefer liegenden Zonen, und reizt den Trigeminus trotzdem. In Tierversuchen zumindest ließen sich subkortikale Erregungswellen auslösen. Falls das Szenario zutrifft, wären Migräneanfälle mit und ohne Aura physiologisch im Grunde etwas Ähnliches.

These: Fehler im Hirnstamm

Die Verfechter dieses Modells führen an, dass die Hirndurchblutung bei beiden Patientengruppen dem gleichen Muster folgt. Denn in beiden Fällen steigt der Blutfluss, wie beschrieben, erst stark an und normalisiert sich dann wieder oder sinkt sogar etwas unter das Normalmaß. Das könnte bedeuten, dass eine Streudepolarisation mitsamt der anschließenden unmäßigen Hemmung derselben Gebiete in jedem Fall für Migräne grundlegend ist, dass sich das Phänomen aber nur fallweise durch eine deutliche Sinnesillusion bemerkbar macht. Andere Patienten sind stattdessen vielleicht nur besonders matt, oder ihr Konzentrationsvermögen leidet. Immerhin böte dieses Modell eine Erklärung, wieso eine Aura gelegentlich selbst jenen Patienten nicht erscheint, die sie normalerweise erleben.

Die Verfechter des zweiten Standpunkts halten den Erregungssturm dagegen erst für die Folge anderer Fehlfunktionen – die nach ihrer Ansicht im Hirnstamm zu suchen sind. In diesen alten Hirnabschnitten liegen viele zentrale Umschaltgebiete, über die Informationen aus dem Körper einlaufen und Hirnbefehle verschickt werden. Hier sitzen die Kontrollzentren für Wachheit, die Wahrnehmung von Licht und Geräuschen, die Hirndurchblutung, Atmung, die Schlaf-wach-Rhythmen, die Regulation des Herz-Kreislauf-Systems – und die Schmerzempfindlichkeit. Tomografische (PET-)Aufnahmen zeigten, dass während eines Migräneanfalls sowie noch direkt danach drei neuronale Kerngebiete oder Nuklei des Hirnstamms aktiv sind: der Locus coeruleus, die Raphekerne und das zentrale Höhlengrau (periaquäduktales Grau).

Eben jene Kerne hemmen normalerweise Neurone im Trigemuskern für Schmerzsignale. Gewissermaßen befehlen sie ihm fortwährend: »Nicht feuern!« Sollten sie diese Aufgabe aber nicht ordnungsgemäß erfüllen, würde die Hirnrinde vermeintliche Kopfschmerzsignale erhalten, obwohl die Hirnhäute und deren Blutgefäße den Trigeminusnerven gar keinen Alarmanlass liefern. Des Weiteren erscheint es durchaus möglich, dass die drei verdächtigen Kerne des Hirnstamms

OBEN: TAMI TOLPA; UNTEN: JEN CHRISTIANSEN

auch Streudepolarisationen auslösen (beides im Kasten S. 54).

Nach Meinung von Hirnforschern würde man gerade an jenen Kerngebieten ansetzen, wenn man künstlich durch Manipulation des Hirnstamms typische Begleitsymptome von Migräne initiieren wollte. Denn zu den Hauptaufgaben jener Nuklei gehört, zur Hirnrinde fließende Sinnesinformationen über Licht, Geräusche, Düfte – und wie gesagt Schmerzereignisse – zu kontrollieren. Mit gelegentlichen Funktionsstörungen an diesen Orten mag sich somit auch erklären, wieso Menschen bei Migräne oft helles Licht, laute Geräusche oder Gerüche nicht vertragen.

Zu einer Fehlfunktion im Hirnstamm würde außerdem passen, dass manchmal Stress, psychischer Druck oder Aufregung einen Migräneanfall auslösen. Denn die Verhaltenssituation und die Gefühlslage wirken sich auf die Aktivität der genannten Kerngebiete aus. Diese Kerne beziehen nur von zwei Hirnrindengebieten neuronale Signale: vom limbischen und vom paralimbischen Kortex. Die beiden Regionen regulieren Stimmung, Aufmerksamkeit und Erregungsniveau. Auf dem Weg über den Hirnstamm beeinflusst der limbische Kortex zudem die anderen Hirnrindengebiete. Migräneanfälle gehen tatsächlich oft mit Stimmungsschwankungen einher. Auch leiden die Patienten öfter als der Durchschnitt an Depressionen und Angststörungen.

Uralter Mechanismus gestört?

Noch etwas fällt auf: Bei der Regulierung der Schmerzsignalwege sowie der Schlaf-wach-Zyklen und der übrigen inneren Tagesrhythmen kommt es entscheidend auf die so genannte Schrittmacherfunktion der Raphekerne an, also auf deren spontan in ihnen selbst erzeugte Signalgebung. Sie müssen sich dabei hochpräzise verhalten. Dazu ist es erforderlich, dass die Ionenkanäle der Rapheneurone vollkommen genau arbeiten, denn deren Ausläufer sollen die Botenstoffe Noradrenalin und Serotonin in anderen Hirngebieten exakt abgestimmt ausschütten. Übrigens mag es sich hierbei um einen uralten Mechanismus handeln. Denn zwei Gene des Fadenwurms *Caenorhabditis elegans*, die bei ihm für die Freisetzung von Serotonin wichtig sind, gleichen stark zwei der Erbanlagen, die bei der erwähnten familiären hemiplegischen Migräne mutiert sind. Somit könnte es durchaus möglich sein, dass allgemein bei Migräne mutationsbedingte Ionenkanalfehler vorliegen. Infolgedessen würden wichtige Kerngebiete im Hirnstamm falsch funktionieren und so manchmal in der Hirnrinde übermäßige Erregung verschulden.

Bisher gibt es nur wenige vorbeugende Medikamente gegen Migräneattacken. Alle entstanden außerdem zu anderen Zwecken, etwa zur Behandlung von Bluthochdruck, Depressionen oder Epilepsie. Da wundert es kaum, dass diese Mittel nur einem von zwei Patienten helfen und selbst denen nur ungefähr in der Hälfte der Fälle. Außerdem haben sie eine Menge, teils sogar potenziell gefährliche Nebenwirkungen.

Nach neueren Erkenntnissen unterdrücken jene vorbeugenden Wirkstoffe den weiter vorn beschriebenen Erregungssturm in der Hirnrinde, die kortikale Streudepolarisation. Dass die Medikamente gegen Migräne mit wie auch ohne Aura helfen, spricht dafür, dass der Erregungssturm bei beiden Typen eine Bedeutung hat.

Die Medikamentensituation war bisher sogar für akute Anfälle nicht befriedigend. Recht gut direkt wirken an sich so genannte Triptane. Dadurch verengen sich die Blutgefäße – leider aber auch an unerwünschter Stelle einschließlich der Herzkranzgefäße. Die Behandlung damit basierte überdies auf der irrigen Annahme, dass übermäßig erweiterte Gefäße den Kopfschmerz auslösen. Vielmehr scheinen Triptane die Schmerzweiterleitung vom Trigeminusnerv und vielleicht an anschließenden Schaltstationen zu beeinträchtigen, und zwar indem sie Botenmoleküle stören, wie vor allem das Peptid CGRP.

Solche Erkenntnisse verhelfen inzwischen zu speziellen Migränemedikamenten (Kasten links). Derzeit laufen schon Studien mit Wirkstoffen, die CGRP blockieren oder andere Botenstoffe des Trigeminus, etwa Glutamat oder Stickoxid, außer Gefecht setzen. Die Blutgefäße sollen sie nicht verengen.

Daneben verfolgt die Forschung nicht-pharmazeutische Behandlungsansätze. So prüfen Mediziner jetzt die so genannte transkranielle Magnetstimulation (TMS), die eine sich anbahnende Migräne in manchen Fällen aufhalten kann. Sie testen außerdem, inwieweit tragbare TMS-Geräte gegen Attacken mit und ohne eine Aura Nutzen bringen.

Für Millionen Menschen mit Migräne bedeuten diese Entwicklungen einen Durchbruch. Aber die neuen Forschungsbefunde werden hoffentlich nicht nur viele Patienten vor ihren peinigenden Anfällen schützen. Sie zeigen zugleich, dass die Mediziner und Neurologen das Leiden endlich ernst nehmen und wissenschaftlichen Studien dazu einen hohen Stellenwert einräumen. Bei Migräne handelt es sich um einen hochkomplexen, biologisch faszinierenden Vorgang, der die Lebensqualität massiv einschränkt. Von wegen Einbildung! ◀

Auch Charles Lutwidge Dodgson (1832–1898), bekannt unter dem Künstlernamen Lewis Carroll, litt an Migräne. Zu seinem Kinderbuch »Alice im Wunderland«, das physikalische Gesetze verdreht, könnten den Künstler und Logiker selbst erlebte verzerrte Wahrnehmungen angeregt haben.



CORBIS / CHRISTIE'S IMAGES



David W. Dodick (links) ist Professor für Neurologie an der Mayo-Klinik in Arizona bei Phoenix. Er hat Medizin studiert und erforscht pathologische Prozesse des Zentralnervensystems, die Migräne und andere Kopfschmerzarten bedingen. **J. Jay Gargus** ist ebenfalls Mediziner. Er hat eine Professur für Physiologie, Biophysik und Humangenetik an der University of California in Irvine inne. Er befasst sich mit Krankheiten durch Ionenkanaldefekte wie Migräne.

Goadsby, P. J.: Recent Advances in Understanding Migraine Mechanisms, Molecules, and Therapeutics. In: Trends in Molecular Medicine 13(1), S. 39–44, Januar 2007.

Schwedt, T. J., Dodick, W. D.: Advanced Neuroimaging of Migraine. Review in: Lancet Neurology 8(6), S. 560–568, Juni 2009.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/100541.

WIE SICH DAS GEHIRN IN FALTEN LEGT

Nervenfaser formen mit ihren vereinten Kräften die wellige Landschaft der Hirnrinde. Manche Windungen sehen bei Schizophrenie oder Autismus anders aus als bei gesunden Menschen. Dieser Befund könnte neue Diagnoseansätze ermöglichen.

Von Claus C. Hilgetag und Helen Barbas

Am menschlichen Gehirn fällt zunächst die charakteristische, von Windungen durchzogene Oberfläche ins Auge. Diese wellige Landschaft mit ihren tiefen Furchen vermittelt unsere Wahrnehmungen, unser Denken, Fühlen und Handeln. Sie wird von der Großhirnrinde geformt, der so genannten grauen Substanz – einer zwei bis vier Millimeter dicken Schicht voller Nervenzellen, die Hirnforscher auch als zerebralen Kortex bezeichnen.

Auch bei anderen großen Säugetieren ist die Hirnoberfläche gefaltet, so bei Walen, Hunden oder Menschenaffen, bei jeder Art in für sie charakteristischer Weise. Hingegen besitzen kleine Säugetiere eher glatte Gehirne, wie auch andere Wirbeltiere. Der Unterschied hängt damit zusammen, dass die Hirnrinde bei größeren Säugern mehr Platz benötigt, als der Schädel bietet. Besonders ausgeprägt ist das beim Menschen: Seine Großhirnrinde würde ausgebreitet etwa das Dreifache der Schädelinnenfläche aufspannen.

Wie kommt es, dass die großen Hirnwindungen in der Regel bei allen Menschen ähnlich aussehen, die kleineren Windungen aber stark variieren? Repräsentiert die charakteristische Hirnlandschaft auch Funktionen unseres Denkapparats? Neueren Forschungen zufolge ziehen vor der Geburt Nervenfaser die Hirnoberfläche zurecht und halten sie auch später in Form. Das erklärt, warum Schädigungen in den neuronalen Kommunikationsnetzen äußerlich an der Hirnfaltung sichtbar sein können – gleich, ob die Defekte in der frühen Entwicklung eintreten, wie bei einigen psychischen Krankheiten, oder erst später, etwa bei einem Schlaganfall oder einer Verletzung. Diese Beobachtung dürfte die Di-

agnose einiger psychischer und mentaler Störungen und Behinderungen erleichtern. Nicht zuletzt kann sie auch neue Ideen für Therapien liefern.

Form und Aussehen unseres Gehirns beschäftigen Forscher schon seit Langem. Im frühen 19. Jahrhundert begründete der deutsche Mediziner Franz Joseph Gall (1758–1828) die Phrenologie. Er glaubte, dass die Schädel- und Hirnform Rückschlüsse auf Intelligenz und Charakter erlauben. Diese Lehre gilt heute weitgehend als unwissenschaftlich. Von ihr angeregt begannen im 19. Jahrhundert jedoch viele Gelehrte mit der Sammlung von »Verbrecher-«, »Schwachsinnigen-« und »Geniegehirnen«.

Frühe biomechanische Ansätze

Eine weitere These entwarf vor gut 100 Jahren der Schweizer Anatom und Embryologe Wilhelm His (1831–1904), der in Leipzig wirkte: Er glaubte, dass physikalische Kräfte die Gehirnform entscheidend prägen. Dieselbe Idee griff der britische Allround-Gelehrte D'Arcy Wentworth Thompson (1860–1948) in seinen Modellen zur Selbstorganisation von biologischen und unbelebten Formen auf. Nach seinen Untersuchungen verdanken viele Organismen ihre Form physikalischen Grundprinzipien.

Diese frühen Thesen verschwanden aber später aus dem Blickfeld der Hirnforscher. Für lange Jahre verdrängten modernere genetische Theorien der Hirnentwicklung die alten biomechanischen Ansätze. Erst in jüngerer Zeit fanden manche der früheren Ideen wieder Interesse. Diese Renaissance gründet sich auf moderne bildgebende Verfahren in der Hirnforschung, die eine große Menge an Daten zur Hirnstruktur liefern. In einem 1997 in der Fachzeitschrift »Nature« publizierten Artikel

In Kürze

- ▶ Ihre Windungen verleihen unserer Großhirnrinde (dem zerebralen Kortex) ihr typisches Aussehen. Sie ist für komplexe Verarbeitungsprozesse beim **Wahrnehmen, Fühlen, Denken und Handeln** zuständig.
- ▶ Ausgebreitet würde der Kortex **dreimal mehr Platz** beanspruchen, als die Schädelinnenfläche bietet.
- ▶ Mechanische Zugkräfte durch **neuronale Verbindungen** zwischen einzelnen Rindengebieten bewirken die starke Auffaltung.
- ▶ Bei manchen **psychischen und geistigen Störungen** wie Autismus oder Schizophrenie sieht die Kortexlandschaft ungewöhnlich aus. Wahrscheinlich liegt das an irregulären Hirnverbindungen.

kam David C. Van Essen, Neurobiologe an der Washington University in St. Louis (Missouri), dann auf biomechanische Ideen der Hirnfaltung zurück. Er stellte die Hypothese auf, dass Nervenfasern auf die Kortexregionen, die sie miteinander verbinden, einen leichten Zug ausüben. Dadurch könnten sie die Gestalt des Gehirns beeinflussen.

Beim menschlichen Fetus ist die Hirnoberfläche bis in den sechsten Monat hinein noch ziemlich glatt. Erst im späten zweiten Trimester beginnt sie sich zu falten. Zum Zeitpunkt der Geburt ist diese Entwicklung weit gehend abgeschlossen: Der Kortex besitzt jetzt in etwa seine endgültigen Windungen (Kasten S. 62, rechts). Seine Neurone entstehen während der Schwangerschaft in tieferen Bereichen des Ge-

hirns und wandern dann zur Großhirnrinde. Am Ende ihrer Wanderung bilden sie Ausläufer: kurze Auswüchse (die Dendriten), mit denen sie Signale anderer Nervenzellen empfangen, und lange (die Axone), über die sie selbst Signale versenden. Diese Axone können beträchtliche Entfernungen überbrücken und verlaufen innerhalb der so genannten weißen Substanz, unter der Hirnrinde. Jede axonale Faser weist eine geringe Faserspannung auf, die sich aber multipliziert, sowie Hunderte und Tausende von Einzelfasern in einem Nervenbündel zusammenkommen. Wenn das Gehirn wächst, müssen sich diese Fasern dehnen.

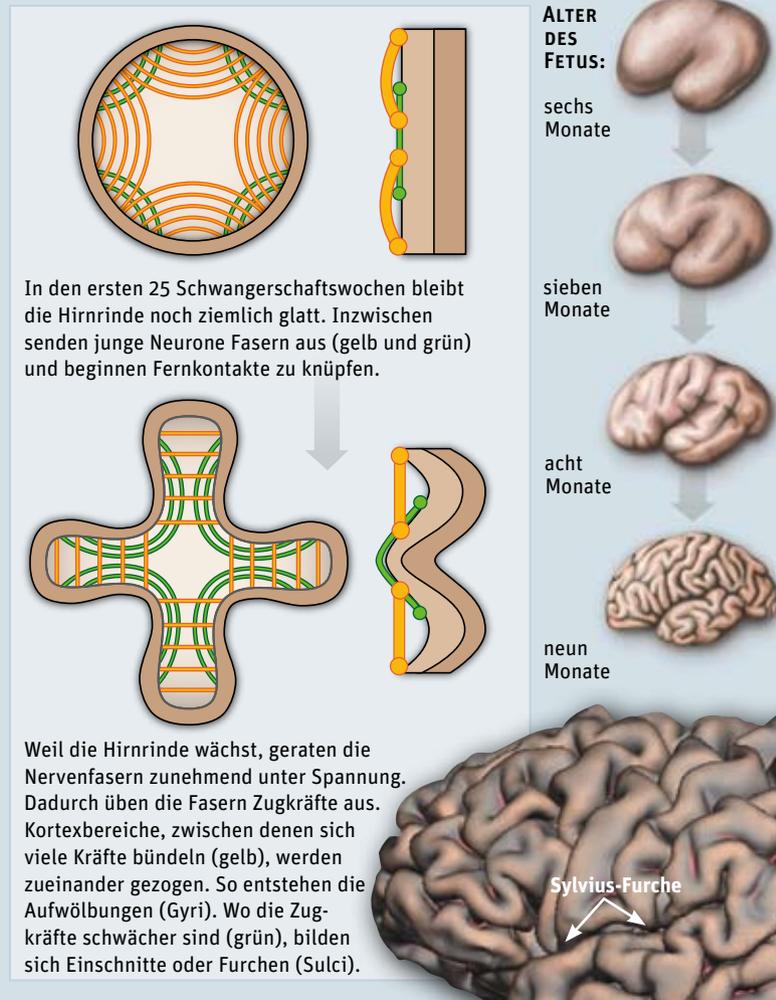
Dazu überlegte Van Essen: Wo zwischen zwei Hirnregionen viele Fasern verlaufen, müsste zwischen beiden Gebieten ein recht

Dank komplizierter Faltung passt die riesige Großhirnrinde des Menschen in den Schädel.



ROHE KRÄFTE AM WERK

Bis zur Geburt hat das menschliche Gehirn seine Kortexwindungen weitgehend ausgebildet (rechts). Wie das mechanische Kräfte bewerkstelligen könnten, zeigt das vereinfachte Modell links.



JEN CHRISTENSEN, NACH CLAUDS C. HELGETAG UND HELEN BARRAS (ENTWICKLUNGSMODELL LINKS) BZW. NACH BRUCE FISCHL (RECHTS)

starker Zug herrschen.

Diese versammelten Kräfte würden dafür sorgen, dass die betreffenden Hirnabschnitte enger zusammenrücken. So entstünde zwischen ihnen eine Aufwölbung, ein so genannter Gyrus. Regionen mit wenigen Faserverbindungen, also wenig Zugkraft zwischen sich, würden auseinanderweichen. Das ergäbe eine Furche, einen Sulcus.

Bestimmt also das Kommunikationssystem der Hirnrinde mit, wie ihre Oberfläche geformt ist? Ziehen viele Kommunikationsstränge die verbundenen Hirnregionen näher zusammen, wobei sich die Fasern verkürzen und begradigen würden? Diese Hypothese haben wir an den gefalteten Gehirnen von Rhesusaffen mit einem modernen histologischen Verfahren getestet, der so genannten retrograden Markierung. Dazu injizierten wir jeweils in ein

kleines Rindengebiet einen Farbstoff, den die Axonenden (Nervenfasernenden) aufnehmen. Weil die Axone die Farbe dann zu ihrem Zellkörper transportierten, konnten wir verfolgen, aus welchen anderen Gebieten die von uns angefarbte Stelle Nervenfasern erhält, also zwischen welchen Zonen des Kortex Kommunikationsstränge verliefen.

Praktischerweise zeigt dieses Verfahren auch, wie stark die einzelnen Verbindungen sind. Und man kann feststellen, ob die Faserstränge schnurgerade verlaufen oder gekrümmt sind. Auf die Weise haben wir eine große Anzahl neuronaler Wege zwischen einzelnen Kortexbereichen markiert. Wie in unserer Hypothese vorausgesagt, waren die meisten dieser Fasern gerade oder höchstens leicht gebogen. Wir konnten auch zeigen: je massiver eine Verbindung, umso geradliniger tendenziell ihre Bahn.

Dass starke Nervenfaserbündel vermutlich die Hirnwindungen mitformen, zeigt besonders eindrucksvoll der Vergleich einer auffallenden Hirnfurche des Menschen auf der rechten und linken Hirnhälfte: der Sylvius-Furche oberhalb des Schläfenlappens. Diese Vertiefung steigt rechts deutlich steiler nach hinten an als links. In beiden Hirnhälften zieht um die Furche herum ein prominenter Faserstrang, der Fasciculus arcuatus, der vordere und hintere Sprachregionen des Gehirns miteinander verbindet.

Bekanntlich ist bei den meisten Menschen die linke Hemisphäre dominant für Sprache, auch wenn die rechte Seite an Sprachfunktionen beteiligt ist.

In einer Arbeit von 2006 vermuteten wir, dass der Fasciculus arcuatus wegen seiner Rolle bei der Sprachverarbeitung links massiver sein könnte als rechts, also mehr Fasern enthält. Eine Reihe von

Hirnstudien hat unsere Vermutung bestätigt. Wir deuten den Befund so: Die Verbindung ist links stärker ausgeprägt; dadurch haben diese Axone zusammen mehr Zugkraft; infolgedessen verläuft der linke Strang vermutlich in einem etwas schwächeren Bogen als rechts – wodurch auch die linke Furche einen flacheren Winkel bildet. Ob die Krümmung des Faserstrangs links wirklich geringer ist, bleibt aber noch nachzuweisen.

Doch nicht nur die Gestalt von Windungen und Furchen beruht offenbar auf strukturierenden mechanischen Kräften. Vielmehr wird auch die Dicke der einzelnen Kortexschichten davon beeinflusst, ja selbst deren innere Architektur. Die Großhirnrinde gliedert sich in mehrere histologisch voneinander unterscheidbare Ebenen von Zellen. In den

Sogar die Dicke der einzelnen Kortexschichten wird von mechanischen Kräften beeinflusst

meisten Regionen sind es sechs verschiedene horizontale Schichten, deren Mächtigkeit und Zusammensetzung abhängig von der Hirnregion und ihrer spezifischen Funktion variiert. Wo Sinneswahrnehmungen eintreffen, weist die Rinde beispielsweise eine besonders kräftige Schicht 4 auf. Schicht 5 ist dort verdickt, wo willkürliche Bewegungen gesteuert werden. In den Assoziationszentren wiederum, unter anderem für Denken und Gedächtnis zuständig, ist Schicht 3 besonders ausgeprägt.

Solche Unterschiede benutzen Neuroanatomen seit über 100 Jahren, um Hirnregionen mit unterschiedlichen Spezialisierungen voneinander abzugrenzen. Die besten, bis heute weitgehend anerkannten Karten legte 1909 der deutsche Psychiater Korbinian Brodmann (1868–1918) vor. Die Forscher erkannten auch, dass sich die Schichtendicke infolge der Faltung verändert: Bei einer Windung nach außen (in einem Gyrus) sind die äußeren Lagen dünner, gewissermaßen seitlich gedehnt, die inneren Schichten hingegen relativ dicker. Umgekehrt verhält es sich bei Furchen (Sulci).

Klassisches Modell widerlegt

Wie aber kommen solche Unterschiede zu Stande? Manche Forscher vermuteten, dass sich der Kortex erst faltet, nachdem sämtliche Nervenzellen dort eingezogen sind und ihren Bestimmungsort erreicht haben. Folglich dürfte sich die Zellzahl einer Schicht und auch eines größeren Areals dann zwar insgesamt nicht ändern, die Zellen müssten sich aber anders verteilen. In den gedehnten Schichten müssten sie lockerer liegen als in anderen.

Diese Vorstellung haben wir, wiederum durch Studien an Rhesusaffen, widerlegt. An diversen Stichproben der Stirnhirnrinde wiesen wir nach, dass die tiefen Schichten der Gyri eine ebenso hohe Neuronendichte aufweisen wie die tiefen Schichten der Sulci, also in einer Volumeneinheit gleich viele Nervenzellen enthalten. Weil diese tieferen Lagen aber in einem Gyrus mächtiger sind als in einem Sulcus, liegen unter der gleichen Oberflächeneinheit in einem Gyrus mehr Neurone als in den gleichen Schichten einer Furche. Diese Beobachtung widerspricht dem klassischen Modell, bei dem die Anzahl der Neurone während der Hirnfaltung konstant bleibt und nur zwischen oberen und unteren Schichten unverteilt wird.

Auch die Tatsache, dass die Rinde an den aufgewölbten Stellen insgesamt dicker ist als unter den Furchen (siehe oberen Kasten S. 64 links), verlangt nach einem neuen Erklärungsansatz. Wir vermuten hier Einflüsse der Faltungskräfte auf die Neuronenwanderung in den Kortex. Entwicklungsstudien anderer

Forscher an menschlichen Feten bestärken unseren Verdacht. Demnach ist es eben nicht so, dass die jungen Neurone in die Hirnrinde einwandern und sich die Rinde erst anschließend faltet. Vielmehr überlappen sich beide Prozesse zeitlich. Wir vermuten deswegen, dass sich der komprimierte oder gedehnte Zustand von Rindenschichten auf die Zellwanderung von spät entstandenen Neuronen auswirkt. Komprimierte Schichten scheinen ihnen die Passage zu erschweren, gedehnte sie zu erleichtern. Dadurch bleiben in einem Gyrus überproportional viele Nervenzellen in den tieferen Schichten quasi stecken. Somit hätte die Faltung des Kortex sogar Einfluss auf dessen endgültige innere Architektur.

Außerdem unterscheidet sich sogar die Form der Neurone aus der gleichen Schicht, anhängig davon, ob sie in einem Gyrus oder in einem Sulcus liegen. Zellen in tiefen Lagen eines Gyri sehen beispielsweise schmal und hoch aus, wie seitlich gequetscht. Dagegen erscheinen Zellen aus tiefen Schichten in einem Sulcus niedrig und flach, wie seitlich langgezogen (Bilder rechts im oberen Kasten S. 64). Dieses Aussehen der Neurone kann dadurch erklärt werden, dass sie während der Kortexfaltung mechanischen Kräften ausgesetzt waren. Nur zu gern wüssten wir, ob die Formunterschiede auch auf die Funktion der Zellen Einfluss nehmen – was experimentell nicht leicht zu erforschen ist.

Unsere Computersimulationen lassen so einen Einfluss zumindest vermuten. Weil der Kortex an den aufgewölbten Stellen (Gyri), wie erwähnt, viel mächtiger ist als unter den Einschnitten (Sulci), benötigen die Neurone in einem Gyrus zwangsläufig längere Dendriten (Empfängerantennen). Bis zum Zellkörper legen die Signale deswegen einen längeren Weg zurück und schwächen sich dabei mehr ab als in der gleichen Schicht eines Sulcus. Unseres Wissens hat aber bisher niemand die Folgen dieser Unterschiede systematisch an einzelnen Hirnneuronen überprüft.

Von großem Interesse ist natürlich, ob solche Zusammenhänge auch für Unterschiede in den neurologischen Details einzelner Menschen gelten. Um verlässliche Regelmäßigkeiten zu erkennen, müssen die Forscher sehr viele Gehirne vergleichen. Da trifft es sich gut, dass die neuen bildgebenden Verfahren, wie die strukturelle Magnetresonanztomografie, nichtinvasive, aber trotzdem hochauflösende dreidimensionale Hirndarstellungen erlauben. Hiermit lassen sich viel mehr Gehirne untersuchen, als es früher durch Sammlungen von Gehirnen Verstorbener jemals möglich war.

An systematischen, computergestützten Auswertungen vieler solcher Aufnahmen erken-



PHOTO RESEARCHERS / ABRAM MENSHE

Bei psychischen Defekten wie Autismus, die auf Entwicklungsstörungen beruhen, fällt eine ungewöhnliche Faltung von Hirnwindungen auf. Auch die interne Struktur des Kortex kann von der Norm abweichen.

HATTEN PHREOLOGEN DOCH NICHT GANZ UNRECHT?

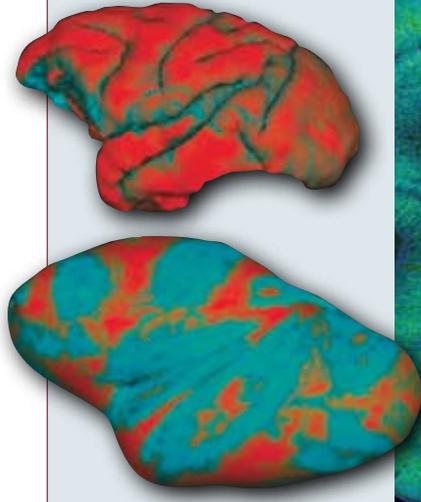


Mit Sicherheit spiegelt die Kopfform nicht den Charakter oder die Begabung. Allerdings korrespondieren manche Ausprägungen von Hirnwindungen mit spezialisierten geistigen Funktionen. Auch einige psychische Krankheiten zeigen an der Hirnoberfläche Spuren.

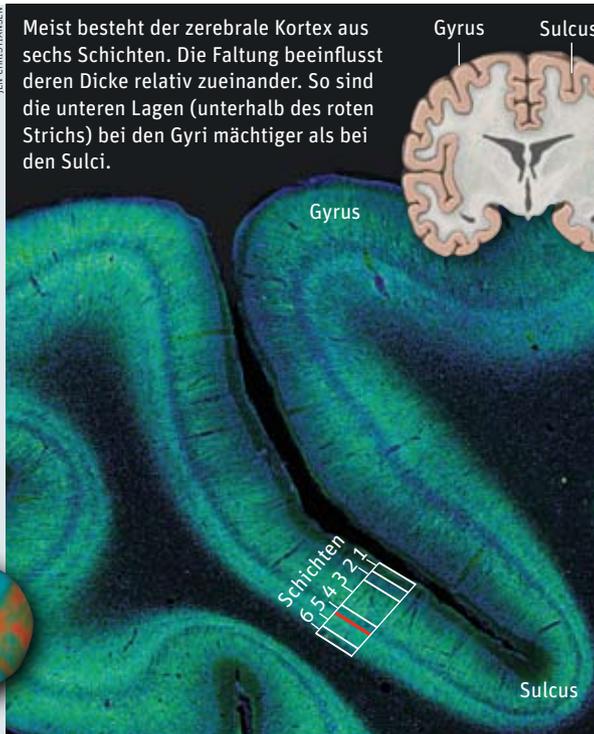
DIE FOLGEN DER FALTUNG

Die Faltung des Kortex beeinflusst sogar Feinheiten wie die Dicke der Großhirnrinde (links), die Struktur der Rindenschichten (Mitte) und die Form von Neuronen (rechts). Das könnte auch Funktionen betreffen.

In dieser Darstellung eines Rhesusaffengehirns sind dickere Partien der Hirnrinde rot, dünnere blaugrün markiert. Der ausgebreitete, ballonartig aufgeblasene Kortex unten zeigt, dass die Rinde bei den Aufwölbungen meist dicker ist als bei den Furchen.



Meist besteht der zerebrale Kortex aus sechs Schichten. Die Faltung beeinflusst deren Dicke relativ zueinander. So sind die unteren Lagen (unterhalb des roten Strichs) bei den Gyri mächtiger als bei den Sulci.

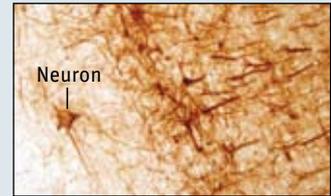


Nervenzellen in tiefen Schichten einer Aufwölbung wirken hoch, wie seitlich gequetscht (oben). Zellen in den gleichen Schichten unter Einbuchtungen sehen flach gedrückt aus (unten).

GYRUS



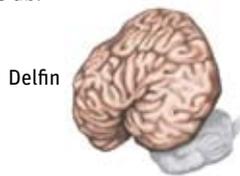
SULCUS



MIT FRIEDL. GELN. VON HELEN BARBAS

NOCH MEHR HIRN- LANDSCHAFTEN

Ob und wie markant das Gehirn einer Tierart sich faltet, hängt von der Tiergruppe, der Entwicklungshöhe und bei den Säugern von der Gehirngröße ab.



Delfin



Känguru



Schnabeltier



Zebrafink

BILDER NICHT
MASSSTABGEBEHT

nen die Forscher insbesondere, dass manche Gestaltunterschiede des Gehirns durchaus einen medizinischen Bezug haben. Bestimmte psychische Krankheiten oder Störungen gehen mit Unterschieden im Aussehen von Windungen einher. Das betrifft vor allem Störungen, deren Wurzeln früh im Leben gelegt werden, wenn sich die Neurone, ihre Verbindungen und die Hirnfalten bilden. Unseres Erachtens spiegeln solche Gestaltunterschiede den mechanischen Einfluss abnormer neuronaler Verbindungen wider.

Zwar ist dieses Forschungsfeld noch jung. Immerhin haben aber Forschergruppen in den letzten Jahren gezeigt, dass die Großhirnrinde bei Schizophrenen insgesamt weniger stark gefaltet ist als bei gesunden Menschen. Allerdings diskutieren die Wissenschaftler diesen Befund noch kontrovers, denn der Ort und die Art der abnormen Faltung können ganz unterschiedlich ausfallen. Mediziner pflegen Schizophrenie traditionell mit Störungen des neurochemischen Gleichgewichts im Gehirn zu erklären. Vermutlich kommen aber anatomische Abweichungen der Nervenverbindungen hinzu – welcher Art, wissen wir jedoch noch nicht.

Autismus halten Experten ebenfalls für eine Entwicklungsstörung. Auch Autisten be-

sitzen teilweise abnorme Hirnwindungen. Insbesondere scheinen bestimmte Furchen im Vergleich zur Norm tiefer zu reichen und ein wenig versetzt zu liegen. Aus diesem Grund deuten manche Forscher Autismus inzwischen als Folge falscher Verdrahtung. Hirnfunktionsstudien zufolge kommunizieren bei Autisten nah beieinanderliegende Gebiete stärker miteinander als bei gesunden Menschen. Dagegen gerät der Austausch zwischen weiter entfernten Bereichen schwächer. Das könnte erklären, wieso Betroffene große Schwierigkeiten haben, Unwichtiges auszublenden und sich umzustellen, sobald eine neue Situation Aufmerksamkeit verlangt.

Manche psychischen Störungen wie auch Lernbehinderungen gehen überdies mit einem ungewöhnlichen Aussehen von Kortexschichten einher. Man nehme etwa die so genannten Pyramidenzellen, die wegen ihrer typischen Form so heißen. Sie kommen in mehreren der Rindenschichten vor und sind die zellulären Hauptelemente für die neuronale Kommunikation im Kortex. Bei Legasthenie, so erkannte der Neurologe Albert Galaburda von der Harvard University in Cambridge (Massachusetts) schon Ende der 1970er Jahre, liegen jene Zellen in den für Sprachverarbeitung und Hören zuständigen

Arealen des Hirns versetzt gegenüber der normalen Schichtenposition.

Auch im Hirn Schizophrener fällt eine abweichende Kortextarchitektur auf. In einigen Bereichen der Stirnhirnrinde ist die Zelldichte mitunter geringer als normal. Das dürfte das neuronale Kommunikationsnetz und damit den regulären Informationsaustausch beeinträchtigen. Ob Abweichungen dieser Art auch bei Autismus auftreten, untersuchen Wissenschaftler gerade. Eingehende Forschungen über ähnliche Hintergründe bei anderen neurologischen Entwicklungsstörungen stehen noch aus.

Im Fall von Schizophrenie und Autismus könnten Psychologen neue Diagnose- und Behandlungsformen finden, wenn sie nicht länger nur von lokalen Defekten ausgehen, sondern Unregelmäßigkeiten in den neuronalen Netzen zu Grunde legen. Legasthenikern hilft es bekanntlich beim Lernen, wenn sie mehrere Sinne und Denkmodi aktivieren. Ähnlich könnte es Autisten oder Schizophrene fördern, Aufgaben gestellt zu bekommen, die ganz verschiedene Hirnbereiche beanspruchen.

Musik im motorischen Kortex

Die Phrenologen glaubten, am Erscheinungsbild des Gehirns, etwa an der Art der Windungen oder der Menge an grauer Substanz, ließen sich Talente ablesen. Das können Forscher nun im Prinzip anhand von nichtinvasiven Hirnaufnahmen prüfen. Nur sind solche Studien alles andere als einfach. Bisher gelingt der Nachweis vor allem dann, wenn eine Person eine bestimmte klar umrissene Fertigkeit oft und regelmäßig trainiert, die ein hochkoordiniertes geistiges und körperliches Zusammenspiel verlangt. Berufsmusiker zum Beispiel, die mit ihrem Instrument ausgiebig üben müssen, tragen den Stempel ihrer Hauptbeschäftigung in ihrem motorischen Kortex, der den häufig beanspruchten Bereichen besonders viel Platz einräumt. Ob aber auch allgemeine Begabungen an den Hirnwindungen abzulesen sind, wissen wir noch nicht.

In diesem Forschungsfeld stehen zahlreiche Antworten noch aus. Wodurch erhält jede Hirnwindung ihre individualspezifische Form und Größe? Entwicklungsbiologen verstehen diese Vorgänge bisher genauso wenig, wie sie sagen können, wieso jedes Ohr und jede Nase ihre eigene Form haben. Mit Computern ließe sich modellieren, wie die individuelle Vieltaligkeit unserer Gehirne dadurch zu Stande kommt, dass die ausreifenden Neurone einer Unmenge auch physikalischer Einflüsse ausgesetzt sind. Bisher sind die Modelle dafür jedoch noch viel zu einfach, denn wir verfü-

gen über zu wenig biologisches Hintergrundwissen, das wir einfüttern können.

Grundsätzlich fehlt es an Detailkenntnissen über die Entwicklung der Hirnrinde. Unser oberster Wunsch ist ein Zeitplan, wann genau die vielerlei neuronalen Verbindungen entstehen. An Tierfeten, bei denen Hirnzellen markiert werden, müssten wir beobachten können, in welchen Phasen die einzelnen Rindengebiete heranreifen. Man könnte die Vorgänge dann auch manipulieren, etwa ausgewählte Neurone oder Kortextschichten in ihrer Entwicklung behindern. So kämen die Forscher den Entwicklungsfehlern hinter spezifischen psychisch-neurologischen Behinderungen auf die Spur, vielleicht eines Tages auch von weniger allgemein bekannten Leiden. Die ganz verschiedenartigen neurologischen Störungen beruhen sicherlich auf unterschiedlichen frühen Defekten in verschiedensten Entwicklungsphasen. Wenn solche Störungen gerade zu einem ungünstigen Zeitpunkt auftreten, mögen sie die Entstehung, Wanderung und Verknüpfung von Neuronen genauso behindern wie die Ausbildung einer Kortextschicht oder einer ganzen Hirnregion.

Natürlich werden die Hirnfalten nicht allein von mechanischen Kräften geformt. Auch genetische Programme nehmen hierauf Einfluss. Es gibt sogar bei verwandten Personen eine gewisse Familienähnlichkeit von Windungen. Genetische Prozesse könnten kontrollieren, wann und in welcher Reihenfolge die Hirnrindengebiete entstehen. Aber bei den Feinheiten der Wanderung, Reifung und Verdrahtung sind Selbstorganisationsprozesse im Spiel. Da formen simple physikalische Kräfte die Kortextlandschaft. Wohl nur ein solches Zusammenspiel bringt zu Stande, dass die großen Hirnwindungen bei uns allen relativ gleich aussehen – und die kleineren Falten nicht einmal bei eineiigen Zwillingen übereinstimmen.

Mit diesen Forschungen greifen wir letztlich einige der klassischen Ideen der Hirnforschung wieder auf, die vor über 100 Jahren aufkamen. Heute können wir belegen: Es besteht tatsächlich eine Beziehung zwischen der Hirngestalt und manchen neuronalen und geistigen Funktionen. So einfach, wie frühe Forscher annahmen, gestaltet sich die Sache allerdings nicht. Kein Spezialist vermag einem Gehirn anzusehen, ob es einem Verbrecher gehört oder einem Genie. Doch wir würden gern alles zusammentragen, was die einzelnen Teildisziplinen über die Großhirnrinde, ihren Aufbau, ihre Ausreifung und die Zellverknüpfungen herausfinden. Dann könnten wir Modelle zur Hirnfaltung erstellen, die genetische und physikalische Einflüsse miteinander verknüpfen. ◀

Neurone, die zu einem ungünstigen Zeitpunkt in ihrer Entwicklung gestört werden, könnten die Ausbildung einer ganzen Hirnregion behindern



Claus C. Hilgetag ist Professor für Neurowissenschaften an der Jacobs University Bremen. **Helen Barbas** hat eine Professur für Gesundheitswissenschaften, Anatomie und Neurobiologie an der Boston University (Massachusetts) inne.

Burrell, B.: Im Museum der Gehirne. Die Suche nach Geist in den Köpfen berühmter Menschen. Hoffmann und Campe, Hamburg 2005.

Hilgetag, C. C., Barbas, H.: Role of Mechanical Factors in the Morphology of the Primate Cerebral Cortex. In: PLoS Computational Biology 2(3), S. e22, 24. März 2006 (frei erhältlich auf www.ploscompbiol.org).

Van Essen, D. C.: A Tension-Based Theory of Morphogenesis and Compact Wiring in the Central Nervous System. In: Nature 385, S. 313–318, 23. Januar 1997.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/1005452.

INSTINKTIV IN DIE KATASTROPHE

Die größte Wirtschaftskrise seit Jahrzehnten erschüttert auch die Grundfesten der Wirtschaftswissenschaften. Verhaltens- und Neuroökonomien zeigen, wie instinktgetriebenes Anlegerverhalten das Entstehen von Spekulationsblasen – und den nachfolgenden Crash – erklären kann.

Von Gary Stix

Der Eisenbahnarbeiter Phineas Gage überlebte, als eine Sprengung am 13. September 1848 eine 1,10 Meter lange und drei Zentimeter dicke Eisenstange durch seinen Schädel, genauer: seinen präfrontalen Kortex trieb. Seitdem zitieren Neurologen den Arbeitsunfall des Vorarbeiters, denn obwohl seine Verletzungen – bis auf die des linken Auges – anscheinend heilten, veränderte sich Gages Persönlichkeit. Zu den auffälligen Defiziten gehörte, dass er von nun an keine schwer wiegenden Entscheidungen mehr zu treffen vermochte. Rauschgifte wie Kokain richten in diesem Bereich der Großhirnrinde Schäden mit vergleichbaren Folgen an. So können selbst abstinenten Süchtige ein unstillbares Verlangen nach der Droge verspüren, wenn sie etwa durch Musik an den Rausch erinnert werden.

Aber auch ohne Verletzung oder Drogenkonsum veranlasst der präfrontale Kortex, nach allgemeiner Überzeugung die Kontrollinstanz situationsangepasster Handlungssteuerung, mitunter völlig falsche Entscheidungen und Einschätzungen. Ein als ventromedialer präfrontaler Kortex (VMPFC) bezeichneter Bereich entpuppte sich im Experiment als einer der zentralen Orte für ein Phänomen, das Ökonomen als »Geldwertillusion« bezeichnen. Ihr unterliegen beispielsweise Menschen, die bei einem Kauf einer Immobilie oder einer Aktie Inflationseffekte ignorieren und im »irrationalen Überschwang« – so nannte es der amerikanische Wirtschaftswissenschaftler

Alan Greenspan 1996 – ihrem Objekt der Begierde einen weit höheren Wert beimessen, als es tatsächlich besitzt. Robert J. Shiller, Wirtschaftsprofessor an der Yale University, vertritt die These, dass diese unstimmige Logik der Geldwertillusion zum jüngsten amerikanischen Immobilien-Crash beigetragen hat: »Da sich die Menschen eher daran erinnern, was sie vor vielen Jahren für ihr Haus bezahlt haben, als an andere Preise dieser Zeit, glauben sie heute, die Immobilienpreise seien stärker gestiegen als andere, und leiten daraus übertriebene Vorstellungen zukünftiger Wertsteigerungen ab.«

Der spekulierende Kortex

Ökonomen streiten seit Jahrzehnten darüber, welchen Einfluss Irrationalität auf geschäftliche Transaktionen ausübt. In ihren Standardmodellen postulierten sie, Konsumenten wie Arbeitgeber seien rationale Wesen. Geldtheoretiker wie der Nobelpreisträger Milton Friedman unterstellten, dass wirtschaftliche Akteure beispielsweise Inflationseffekte berücksichtigen, wenn sie Waren kaufen oder Löhne zahlen. Der Homo oeconomicus könne also den wahren Wert der Güter durchaus abschätzen.

In letzter Zeit jedoch werden solche Modelle zunehmend in Frage gestellt. Die Forschungsrichtung der Verhaltensökonomik, die psychologische Bedingungen ökonomischer Entscheidungen untersucht, gewinnt immer mehr Anhänger. Die Theorien der Psychologen werden auch durch Befunde von Hirnforschern und mit diesen zusammenarbeitenden Neuroökonomien gestützt, die mit bildgeben-

In Kürze

- ▶ Psychologen und Hirnforscher untersuchen Mechanismen, die **Märkte überhitzen** und sie kollabieren lassen.
- ▶ Während die klassische Wirtschaftstheorie von einem rational agierenden Homo oeconomicus ausgeht, glaubt die **Verhaltensökonomik**, dass Investmententscheidungen oft emotional begründet sind.
- ▶ Eine Synthese versuchen **evolutionäre Modelle**, die Spekulationen unter dem Aspekt von Selektion und Anpassung betrachten.

Verhaltensforscher wissen, letztlich sind wir Menschen Primaten, auch wenn wir einen Anzug tragen und täglich große Geldmengen bewegen.

den Verfahren der VMPFC-Region und anderen Hirnarealen bei der Arbeit zusehen. Ein viel beachtetes Experiment von Forschern der Universität Bonn und des California Institute of Technology (Caltech), dessen Ergebnisse im vergangenen März publiziert wurden, zeigte, dass einige der an Entscheidungsfindungen beteiligten Hirnareale für die Geldwertillusion anfällig sind: Bei Probanden, die größere Geldmengen erhielten, zeigte ein Teil der VMPFC-Regionen selbst dann verstärkte Aktivität, wenn sich die Kaufkraft auf Grund von Preissteigerungen in Wahrheit gar nicht verändert hatte.

Dass uns eine kleine Gruppe von Neuronen unseres Stirnlappens zu fehlerhaften Vorstellungen vom Geldwert verleiten kann, ist nur eines von vielen interessanten Ergebnissen jüngster Forschung. In immer raffinierteren Experimenten studieren Wissenschaftler Hirnzentren, die für grundlegende Anlegermotivationen zuständig sind: wie etwa die Angst – hier tritt der im Temporallappen liegende Mandelkern (Amygdala) in Aktion – oder die Gier, bei der die Nucleus accumbens genannte Kernstruktur im unteren Frontallappen eine Rolle zu spielen scheint, die, vielleicht nicht zufällig, auch sexuelles Begehren steuert und für die Suchtentwicklung Bedeutung hat. Die Kombination bildgebender Verfahren mit psychologischen und ökonomischen Ansätzen lieferte

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / MEGANIM



BILDGEBENDE VERFAHREN: DER SCHÖNE SCHEIN DES GELDES

Ein Phänomen namens »Geldwert-

illusion« mag zu jener Immobilienblase in den USA beigetragen haben, die letztlich die aktuelle Weltfinanzkrise ausgelöst hat. Diese Form der Illusion beruht auf Fehleinschätzungen des realen Geldwerts: Scheinbare Gewinne bei Immobilienpreisen oder Gehältern können sich als pure Illusion erweisen, berücksichtigt man die Entwertung der Wertzuwächse durch die Inflation.

Forscher der Universität Bonn und des California Institute of Technology entdeckten in einer kürzlich durchgeführten Studie, dass offenbar ein Entscheidungszentrum im Gehirn bei der Geldwertillusion eine Rolle spielt: Der ventromediale präfrontale Kortex zeigte Aktivität, wenn den Probanden ein scheinbarer, nicht inflationsbereinigter Gewinn präsentiert wurde.

REALE EINNAHMEN:

Probanden in einem Hirnscanner verdienten Geld, um Waren zu kaufen.

**SCH EINBARE GEWINNE:**

Später verdienten sie 50 Prozent mehr, doch auch die Preise waren um 50 Prozent gestiegen.

HISTORISCHE SPEKULATIONS- BLASEN

Die Tulpen-Hausse (1634 – 1637)

Aus einer Passion wurde ein Boom. Kostete eine Tulpenzwiebel um 1634 in den Niederlanden noch einen Gulden, stieg der Preis für die Züchtungen rasch in exorbitante Höhen. So wechselte 1637 eine ganze Brauerei im Wert von 30 000 Gulden für drei seltene Zwiebeln den Besitzer. Auch Optionen waren bereits üblich: Der Käufer erwarb das Recht auf einen Kauf zu einem festgelegten Zeitpunkt und Preis. Als die Blase 1637 platzte, kam die niederländische Wirtschaft zum Erliegen. Auch Rembrandt Harmenszoon van Rijn (1606 – 1669), dessen Bilder heute Millionen kosten, musste Konkurs anmelden: Er hatte nicht nur Geld durch Spekulationen verloren, auch seine Auftraggeber blieben aus.

»»» FORTSETZUNG AUF S. 70

erste Hinweise darauf, wie Individuen und als Summe individueller Verhaltensweisen ganze Ökonomien aus der Spur geraten können, warum ein Wirtschaftssystem, das über grundlegende Schutzmechanismen verfügt, dennoch kollabieren kann. Einige dieser Ergebnisse haben bereits in Aktionsprogramme der Regierung von Barack Obama, die den amerikanischen Banken- und Immobiliensektor zu stabilisieren versucht, Eingang gefunden.

Die nun stärker in den Fokus rückenden verhaltensökonomischen Thesen weichen in zentralen Punkten von den Vorstellungen der modernen Wirtschaftstheorie ab. Etwa davon, dass jeder Käufer oder Verkäufer ein rationales Wesen sei. »In der klassischen Ökonomie gilt der Mensch als eine Art Roboter, der unter allen Bedingungen zu objektivem Denken befähigt ist«, schrieb der Wirtschaftshistoriker Peter Bernstein (1919–2009).

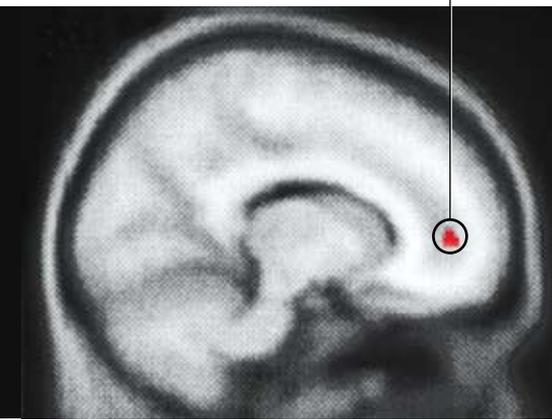
Eine weitere Kernthese der Rationalisten ist die Annahme effizienter Märkte: Am Markt bilde sich genau der Preis, der alle Informationen, die zur Verfügung stehen, auf die bestmögliche Weise auswertet und insoweit relativ zu den Informationen die richtige Balance zwischen Angebot und Nachfrage herstellt. Das Einzige, was dieses Gleichgewicht stören könne, seien externe Schocks wie die unerwartete Preisfestsetzung eines Ölkartells.

In der klassischen Theorie ist es zunächst ausgeschlossen, dass die interne Dynamik des

Marktes in einer Rückkopplungsschleife von Preissteigerungen das System aus dem Gleichgewicht bringen und eine Blase hervorrufen kann, bis sich die gesamte Entwicklung im Crash umkehrt. Bei strenger Auslegung der Hypothese vom effizienten Markt müsste das Risiko einer platzenden Blase aber in den Preisen antizipiert werden, etwa in denen riskanter Hypotheken. Wie also konnte der Wert der entsprechenden Papiere so stark verfallen? Das Nichtfunktionieren der klassischen Theorie erstaunte sogar Alan Greenspan, einen ihrer beharrlichsten Fürsprecher. Im Oktober 2008 erklärte er vor einem US-Kongressausschuss: »Diejenigen unter uns, die annahmen, die Eigeninteressen der kreditgebenden Institutionen würden das Vermögen der Anleger schützen – und dazu zähle auch ich –, befinden sich in einem Zustand schockierten Unglaubens.«

Verhaltensökonomien wandeln auf den Spuren der Psychologen Amos Tversky und Daniel Kahneman von der Hebräischen Universität in Jerusalem, die in den 1970er Jahren die Maxime vom Börsenparkett als Arena für Roboter in Zweifel gezogen hatten. Kahneman erhielt für diese Arbeiten 2002 den Wirtschaftsnobelpreis (Tversky verstarb 1996). Die wegweisende Forschung der beiden befasste sich mit dem Phänomen der Geldwertillusion und anderen psychologischen Schwächen wie der Tendenz des Menschen, auf einen Verlust emotional stärker zu reagieren als auf den Gewinn der gleichen Summe.

aktivierter Teil des ventromedialen präfrontalen Kortex



AUS: BERND WEBER, ANTONIO RANGEL, MATTHIAS WIBRAL UND ARMIN FALK: «MEDIAL PREFRONTAL CORTEX EXHIBITS MONETARY ILLUSION». IN: PNAS, BD. 106, NR. 13, 31.03.2009

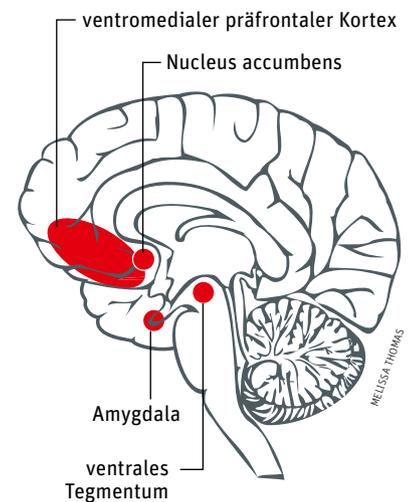
REAKTION IM GEHIRN

Die Aktivität in einem der Belohnungszentren des Gehirns – dem ventromedialen präfrontalen Kortex (rot hervorgehoben) – ist bei denjenigen Versuchspersonen stärker, die irrtümlich davon ausgehen, dass höheres Einkommen ein Gewinn sei, obwohl sich die reale Kaufkraft nicht verändert hat.

gekommen, und bewegt Anleger zu überstürzten Entscheidungen. Läuft der Markt auf eine Baisse zu, entstehen Ängste, die in Panik umschlagen und durch überstürzte Verkäufe die Stimmung anheizen.

Wie wichtig Emotionen und Urteilsverzerrungen (*cognitive bias*) für das Entstehen globaler Wirtschaftskrisen sind, belegt die Verkettung von Ereignissen, die im Lauf der letzten zehn Jahre das Finanzsystem erschüttert haben. In der Ära der Dot-com-Blase schossen überbewertete Aktien von Internetunternehmen in astronomische Höhen, um wenige Jahre später umso tiefer abzustürzen. Instinkte waren auch im Spiel, als sich Anleger in Zeiten niedriger Zinssätze von skrupellosen Kreditgebern riskante Hypotheken mit variablen Zinssätzen aufschwätzen ließen, möglicherweise eine weitere Form der Geldwertillusion: Sie kalkulierten nicht ein, was bei einem Wiederanstiegen der Zinsen geschehen würde. Verbriefte Hypotheken – Schulden von Hunderten bis Tausenden von Hausbesitzern, von Banken zu Paketen gebündelt und gehandelt – haben seitdem einen Großteil ihres Nominalwerts verloren. Banken, die nicht rechtzeitig aus dem riskanten Spiel ausstiegen, mussten mitansehen, wie ihre Kapitalbasis zusammenschmolz. Als Folge davon brach die Kreditvergabe ein, ohne Kredite wiederum lahmte die gesamte Wirtschaft, und diese unglückselige Kette setzte sich rund um den Globus fort.

Die Geldwertillusion ist nur ein Beispiel für die relevanten irrationalen Denkprozesse, die wohlmöglich ein Erbe aus alter Zeit sind: Mit wenig Wissen rasch Handlungsalternativen zu entwickeln, konnte Leben retten, wenn ein Höhlenbär den Weg querte, in Gefahrensituationen versprochen Faustregeln

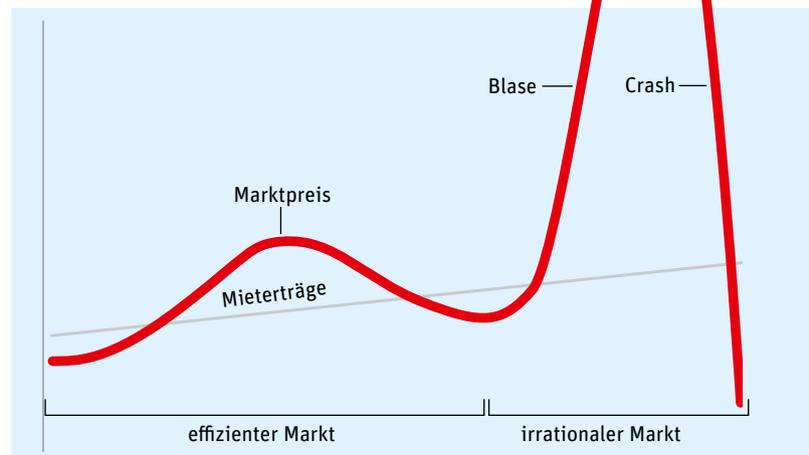


Risiken und Belohnungen aktivieren für Entscheidungen zuständige Hirnregionen. Einige sind hier dargestellt.

Robert Shiller, Experte in Sachen Finanzmarktpsychologie, sieht in animalischen Instinkten eine Ursache für Spekulationsblasen wie dramatische Markteinbrüche. Das normale Auf und Ab der Konjunktur hänge von dem wechselseitigen Vertrauen ab, mit dem sich alle Beteiligten bei ihren täglichen Geschäften begegnen. Die Grundlage dafür basiere jedoch nicht immer auf rationalen Einschätzungen. Übermäßiger Optimismus in einer Hausse verleitet zu der Ansicht, jetzt sei die richtige Zeit für den Kauf eines Hauses oder einer bislang wenig gehandelten Aktie

ALT GEGEN NEU: EFFIZIENTE MÄRKTE VERSUS BLASENWIRTSCHAFT

Nach der klassischen ökonomischen Theorie gelten Käufer als rationale Wesen, die den wahren Wert einer Ware abzuschätzen vermögen. Die Hypothese vom effizienten Markt – ein Eckpfeiler herkömmlicher Finanztheorien – geht deshalb davon aus, dass beispielsweise der Kauf einer Immobilie oder Aktie nur dann interessant erscheint, wenn sie unter ihrem wahren Wert zu haben ist (linke Seite der Grafik). Um Finanzblasen zu verstehen, in denen Marktpreise weit über den wahren Wert einer Anlage hinausschießen, sind neuere Modelle etwa der Verhaltensökonomik erforderlich, die den Einfluss von irrationalem Denken und Emotionen berücksichtigen. So kann eine Art Herdentrieb Anleger dazu verführen, immer mehr Geld in bereits überbewertete Investitionen zu stecken und später in einer Massenpanik wieder herauszuziehen, was letztlich zum völligen Zusammenbruch führt (rechts).



MELISSA THOMAS

SCHNELLE (UND MANCHMAL FALSCH) ENTSCHEIDUNG DANK HEURISTIKEN

Im Gehirn gibt es zwei Systeme für Urteile in Geldangelegenheiten. Das eine arbeitet vernunftorientiert, das andere intuitiv. Letzteres nutzt Faustregeln, so genannte Urteilsheuristiken, die

bei Finanzgeschäften allerdings zuweilen katastrophale Folgen zeitigen. Hier einige Beispiele, die Verhaltensökonomien entdeckt haben.

»Ein toller Kauf! In fünf Jahren wird das Haus ein Vermögen wert sein.«



ÜBERMÄSSIGE ZUVERSICHT: Wir neigen dazu, unsere Fähigkeiten zu überschätzen – vom Autofahren bis zu unserem Urteilsvermögen im Immobilien- und Aktienmarkt.

»Cisco ist die beste Internetaktie. Du solltest auch einsteigen.«



HERDENVERHALTEN: Die Tendenz, der Masse zu folgen, führt bei einer großen Zahl von Investoren zu ähnlichen Einschätzungen von Anlageobjekten, was die Preise hoch- oder runtertreibt.

>>> FORTSETZUNG VON S. 68

Die »Südsee-Blase« (1720)

Gegen die Aussicht auf das Handelsmonopol mit den spanischen Kolonien in Südamerika lieh das Konsortium »South Sea Company« der hoch verschuldeten britischen Regierung neun Millionen Pfund. Doch das Abkommen mit Spanien kam nicht zu Stande.

Die Company gab der Regierung weiteres Geld gegen die Erlaubnis, ihr Kapital unbegrenzt aufstocken zu dürfen. Dann streute sie Gerüchte über Verträge mit Spanien und gab neue Anteilscheine aus. Am 24. Juni 1720 wurde die 100-Pfund-Aktie zu 1050 Pfund gehandelt, die Gesamtzahl der emittierten Aktien hätte dem Doppelten des englischen Grundvermögens entsprochen. Trittbrettfahrer heizten die Blase an, die im Dezember platzte, und die britische Wirtschaft geriet in eine schwere Krise.

>>> FORTSETZUNG AUF S. 71

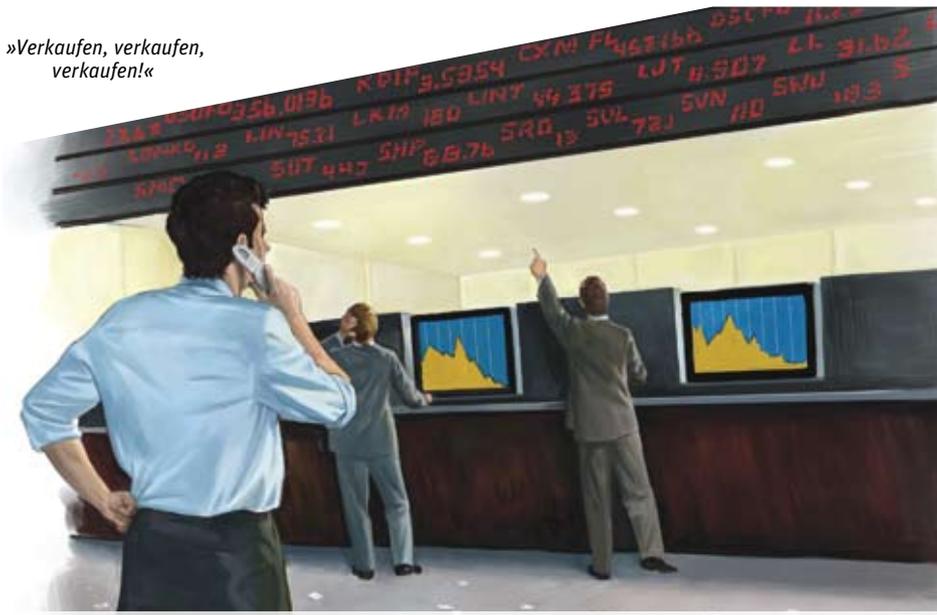
mehr Erfolg als ausgewogenes Denken. Schon Kahneman und Tversky glaubten, dass solche Urteilsheuristiken hinter vielen angeblich logisch begründeten Finanzentscheidungen stehen (siehe Kasten oben). Dass diese Faustregeln aber nicht immer zum richtigen Ergebnis führen, zeigt ein einfaches Beispiel: Liest man in den Börsennachrichten vom Absturz einer Aktie, wird man die Wiederholung dieses Ereignisses allein deshalb als wahrscheinlich erachten, weil die Nachricht leicht aus dem Gedächtnis abrufbar ist (Verfügbarkeitsheuristik).

Auch das Erleben von Bestätigungen verschiebt die Wahrnehmung. Angesichts stark steigender Immobilienpreise glaubten viele Anleger, man könne gefahrlos auf weitere Preisanstiege setzen. Daraus resultierte eine Art Herdenverhalten, das immer mehr Menschen ergriff. Um den Effekt der Verfügbarkeitsheuristik zu vermeiden – in diesem Fall eine Massenpanik unter Anlegern –, vermeiden einige Nachrichtenredakteure im vergangenen Herbst das Wort »Crash«. Auch die »späte Einsicht« gehört zu den Heuristiken: Das Gefühl, etwas sei schon vorher bekannt gewesen, bewegt Investoren, Hausbesitzer und Ökonomen heute zu dem Geständnis, die Anzeichen für eine Blase seien eigentlich offensichtlich gewesen, obwohl sie doch selbst dazu beigetragen hatten.

Die Neuroökonomie, eine Art Allierter der verhaltenstheoretischen Ökonomik, der sich Methoden der Hirnforschung bedient, untersucht mit funktioneller Magnetresonanztomografie (fMRT) und anderen bildgebenden Verfahren, ob all diese Ideen über instinktgesteuertes Anlegerverhalten, über Urteilsheuristiken und Voreinstellungen nur nette Konstrukte sind oder sich im Gehirn nachweisen lassen. Tatsächlich gelang es bereits, das Phänomen der Geldwertillusion zu bestätigen. Die Forscher interessieren sich beispielsweise auch dafür, ob das Sprechen über Geld, das Betrachten von Geld oder auch nur Gedanken daran neuronale Zentren aktiviert, die dafür bekannt sind, Erlebnisse von Belohnung oder Reue zu verarbeiten.

Bei der Jahresversammlung der Cognitive Neuroscience Society in San Francisco im März dieses Jahres präsentierte Julie L. Hall, Doktorandin bei Richard Gonzales an der University of Michigan in Ann Arbor, Experimente, die bestätigen: Der Wille, bei Geldgeschäften Risiken einzugehen, kann schon von kleinen emotionalen Anstößen beeinflusst werden. Auch dies widerspricht dem Mythos des eiskalten Investors. Bei dem Experiment wurden 24 Probanden – zwölf Männer und zwölf Frauen – Bilder von glücklichen, erbosten und neutralen Gesichtern gezeigt. Probanden, die glückliche Gesichter gesehen hat-

>>> FORTSETZUNG VON S. 70

»Verkaufen, verkaufen,
verkaufen!«

VERFÜGBARKEITSHEURISTIK: Aktuelle Nachrichten und andere, schnell aus dem Gedächtnis abrufbare Informationen können Investoren beeinflussen. Sie konzentrieren sich auf die kurzfristige Wertentwicklung einer Anlage – und verkaufen sie womöglich in Panik, wenn der Preis fällt.

ten, zeigten erhöhte Aktivität im Nucleus accumbens, einem Belohnungszentrum im Hirn. Und diese »Investoren« entschieden sich im Test durchweg für Aktien statt für die mit weniger Risiken behafteten Anleihen.

Geldsegen auch für Ahnungslose und Unbemittelte

Glückliche Gesichter begleiteten auch den amerikanischen Immobilienboom in der ersten Hälfte unseres Jahrzehnts. Etwa das von Carleton H. Sheets, der in nächtlichen Werbesendungen lächelnd auch denen einen Geldsegen verhieß, die keine flüssigen Mittel und keinerlei Erfahrungen im Immobiliengeschäft besaßen. Inzwischen wirbt Sheets dafür, bei Zwangsversteigerungen Profit zu machen.

Die Verhaltensökonomik kann nicht nur das Verhalten von Investoren im Nachhinein erklären, sondern liefert auch Entscheidungsgrundlagen für Gesetzgeber und Akteure auf dem Finanzmarkt, wie emotionsbasierte und falsch kalkulierte Investitionen künftig verhindert werden können.

Seit dem Amtsantritt des US-Präsidenten Barack Obama am 20. Januar dieses Jahres erfreut sich die neue Forschungsrichtung immer größerer Akzeptanz. Eine Gruppe führender Wissenschaftler erarbeitete einen Leitfadens, wie Wähler und Wahlhelfer bei Präsidentschaftswahlen besser motiviert werden können.

Anhänger und Vertreter der Verhaltensökonomik besetzen Positionen im Weißen Haus, darunter der Verfassungsrechtler Cass Sunstein, Koautor von »Nudge: Wie man kluge Entscheidungen fällt«. Er wurde zum Leiter des Office of Information and Regulatory Affairs ernannt, das sich mit der föderalen Gesetzgebung, aber auch mit Fragen des Datenschutzes befasst.

Sunstein und sein Koautor Richard Thaler, einer der Begründer der Verhaltensökonomik, prägten den Begriff des »libertären Paternalismus«, der beschreibt, wie Regierungsverordnungen Bürger von unklugen Entscheidungen abbringen können (*to nudge* bedeutet denn auch »einen Anstoß geben«). Diese Strategien basieren wesentlich auf der Verankerungsheuristik: Entscheidungen werden oft an überbewerteten Informationen »verankert«. So haben beispielsweise Zufallszahlen eines Glücksrads die Schätzungen von Probanden über die Zahl afrikanischer Staaten in der UN nach oben oder unten verschoben.

Umgekehrt lässt sich dieser Effekt aber auch sinnvoll nutzen. Werden Angestellte automatisch in ein Firmenpensionsprogramm integriert, statt nur eine Option darauf zu erhalten, dürfte das ihre Sparquote steigern. Die verordnete Aufnahme wirkt als Anker, der die Einstellung zur Altersvorsorge beeinflusst. Bereits in Obamas Wahlkampfversprechen wurde dieser Vorschlag aufgenommen.

Der »Schwarze Donnerstag« (1929)

»Ein Tag – ein Dollar, ein Jahr – ein Ford«, so versprach ein Werbeslogan Ende der 1920er Jahre. Die amerikanische Wirtschaft boomte, Reichtum für alle schien möglich, und als Mittel dazu galten Aktien, und seien sie mit Krediten finanziert.

Erste Anzeichen einer rückläufigen Entwicklung zeichneten sich im Frühjahr 1929 ab, doch die Mahner wurden belächelt. »Das einhellige Urteil der Millionen, deren Bewertung auf diesem großartigen Markt zum Ausdruck kommt, lautet, dass die Aktien nicht überbewertet sind«, erklärte der Ökonom Joseph Stagg Lawrence von der Princeton University noch im September. Und wie er versuchten andere bis hin zu Präsident J. Edgar Hoover die Amerikaner zu beruhigen.

Doch die Anleger reagierten immer nervöser auf Warnungen und schlechte Kursentwicklungen. Am Donnerstag, dem 24. Oktober 1929, wurden nach Eröffnung der New Yorker Börse innerhalb von einer halben Stunde 1,6 Millionen Aktien auf den Markt geworfen, bis zum Mittag belief sich der Gesamtverlust durch Panikverkäufe auf 11,25 Milliarden Dollar. Am Freitag erreichte der Crash Europa.

Stützungskäufe durch Banken und weitere Durchhalteparolen konnten den Einbruch zunächst stoppen, doch als die Banken am folgenden Montag weitere Risiken scheuten, brachen die Kurse weltweit ungehindert ein. Erst Mitte November stabilisierten sich die Märkte wieder. Zwischen ein und drei Millionen Amerikaner hatten bis dahin einen Großteil ihres Vermögens verloren, und die Weltwirtschaft schlitterte in eine mehrjährige Rezession.



THE GRANINGER COLLECTION

Thorstein Bunde Veblen (1857 – 1929) schlug vor, die **Wirtschaft als evolutionäre Wissenschaft zu betrachten. In der aktuellen Krise versuchen Forscher beide Disziplinen zu verschmelzen.**

Oft verlangen Entscheidungen nicht nur das Abwägen zwischen zwei Alternativen und es bedarf mehr als eines sanften Drucks in eine bestimmte Richtung, um Katastrophen vorzubeugen. Stehen unterschiedliche Optionen zur Wahl, so ist eine »Auswahl-Architektur« vonnöten. Wer beispielsweise ein Haus kaufen will, sollte über die Geldwertillusion und ähnliche Erscheinungen aufgeklärt sein. »Gäbe es nur Festzinshypotheken mit 30 Jahren Laufzeit, wäre die Sache klar – man würde einfach das Angebot mit den niedrigsten Zinsen wählen«, erläutert Thaler. »Doch wer bei variablen Zinssätzen, diversen Gebühren und all den heute gängigen Finanzierungsmodellen das individuell optimale Angebot finden will, benötigt schon beinahe einen Dokortitel in Ökonomie.«

Eine Auswahl-Architektur würde beinhalten, dass Kreditgeber alle Optionen vollständig und übersichtlich darlegen, nicht in einem Wust von Papieren, sondern in nicht mehr als zwei gut lesbaren Spalten: Gebühren und Zinszahlungen. Zudem sollten diese Angaben in digitaler Form, also in einem gängigen Tabellenkalkulationsformat, im Internet herunterzuladen sein, um sie mit den Angeboten anderer Institute zu vergleichen.

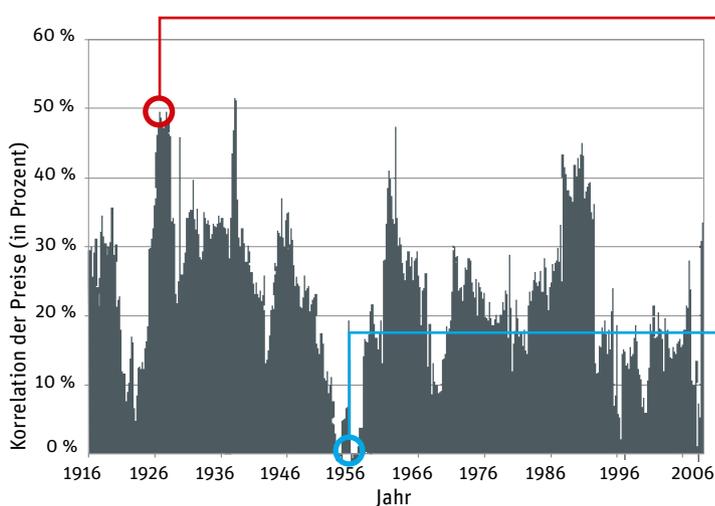
Yale-Ökonom Shiller schlägt zudem vor, zum Schutz gegen die Geldwertillusion eine neue Maßeinheit einzuführen, vergleichbar der *Unidad de fomento* (UF), die die chilenische Regierung 1967 eingeführt hatte und die später auch von anderen lateinamerikanischen Regierungen verwendet wurde. Sie gibt dem Käufer Aufschluss, ob ein Preis sich real verändert hat oder ob die wahrgenommene Veränderung lediglich eine inflationsbedingte Fata Morgana ist. UF basiert auf dem Gesamtpreis eines Warenkorbs, der definierte Güter enthält. »Chile ist das am besten inflationsindizierte Land der Welt«, lobt Shiller. »Hauspreise, Hypotheken, Mieten, Unterhaltszahlungen und Vorstandsboni werden oft in diesen Einheiten angegeben.«

Zu den notwendigen technischen Sicherheitsvorkehrungen rechnet der Ökonom nach wie vor auch Finanzinstrumente, die einen Gutteil zur aktuellen Krise beigetragen haben: Derivate, die Anleger gegen den Totalverlust von *Mortgage-backed Securities* schützen sollten, also Immobilienwertpapieren, deren Gewinn auf Zins- und Tilgungszahlungen beruht. Derivate sind gängige Instrumente des Finanzmarktes, um Kurs- oder Währungsrisiken abzusichern (im Fachjargon *Hedging*

DER EVOLUTIONÄRE ANSATZ: NEUE WEGE ZUR VORHERSAGE VON SPEKULATIONSBLASEN

Forscher am Massachusetts Institute of Technology haben mehrere Modelle, wie Märkte funktionieren, miteinander kombiniert und dabei auch die Evolutionstheorie einbezogen. Damit hoffen

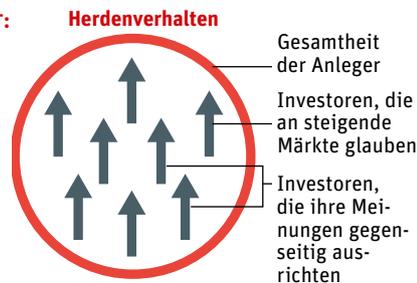
sie, besser prognostizieren zu können, wann Märkte in Bewegung kommen und welche Anleger diese Schieflagen überstehen. Ihr Ansatz wird als Hypothese der adaptiven Märkte bezeichnet.



KORRELATION: EIN PREIS FÜHRT ZUM NÄCHSTEN
Eine auf der Hypothese der adaptiven Märkte basierende Computeranalyse untersucht, inwieweit die Preisentwicklung an einem Tag diejenigen am nächsten beeinflusst, wie stark Preisänderungen also miteinander korreliert sind.

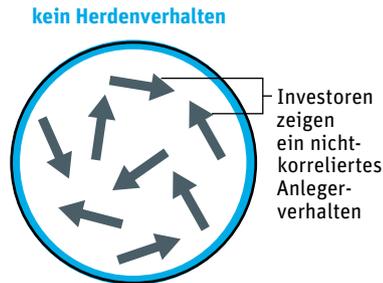
IRRATIONALER MARKT:

Stark korrelierte Preisanstiege können ein Herdenverhalten der Anleger anzeigen und somit vor einer Blase warnen.



RATIONALER MARKT:

Nach dem Crash und dem Abklingen des Herdenverhaltens (durch Panikverkäufe gekennzeichnet) kehrt der Markt wieder zu den rationalen Bewertungsmethoden zurück, die der klassischen Ökonomie entsprechen. Investoren urteilen unterschiedlich über die Markttendenz.



nach englisch *to hedge*, einzäunen): Man erwirbt das Recht, eine bestimmte Ware zu einem festgelegten Zeitpunkt zu einem anhand eines Basiswerts definierten Preis kaufen oder verkaufen zu dürfen. Weil man auf Grund konstruktiver Merkmale solcher Derivate von der jeweiligen Entwicklung etwa einer Aktie überproportional profitiert, lässt sich beispielsweise ein Kursverlust durch den Erwerb eines auf Kursverluste wettenden Derivats abfedern.

Doch in den letzten Jahren wurden diese Kontrakte zunehmend selbst im Rahmen sogenannter Hedgefonds für hochriskante Spekulationsgeschäfte genutzt. Trotz ihres Missbrauchspotenzials hält Shiller Derivate für brauchbare Absicherungen gegen schwierige wirtschaftliche Entwicklungen. Im Immobilienmarkt könnten sich Hausbesitzer und Kreditgeber damit gegen fallende Preise »versichern«. Damit sorgen sie für ausreichende Liquidität und hielten die Märkte in Gang.

Letztlich wird man zur Lösung der aktuellen Krise Informationen darüber erlangen müssen, wie Investoren agieren. Ein besonders kreatives Konzept versucht Schwächen der herkömmlichen Wirtschaftstheorien dadurch zu korrigieren, dass es Altes mit Neuem ver-



DAS ÜBERLEBEN DER FITTESTEN

Die Hypothese der adaptiven Märkte kombiniert die Evolutionstheorie mit Informationen zu korrelierten Entwicklungen und anderen Daten zur finanziellen »Robustheit« von Einzelpersonen oder Firmen. Auf diese Weise soll sich vorhersagen lassen, wer sich an veränderte Marktbedingungen anzupassen vermag und wer wahrscheinlich »ausstirbt«.



SPEKULATIONSBLASEN IM LABOR

Der Wirtschaftstheoretiker Prof. Jörg Oechssler vom Alfred-Weber-Institut der Universität Heidelberg arbeitet vor allem über Fragen der experimentellen Ökonomik, Verhaltensökonomik und Spieltheorie.

Spektrum der Wissenschaft: Wie sehen Laborbedingungen aus, mit denen man das Verhalten von Anlegern untersucht?

Prof. Jörg Oechssler: Wir simulieren Finanzmärkte per Computer, unser Labor bietet inzwischen gut 20 entsprechende Arbeitsplätze. Damit die richtigen Anreize gesetzt werden, bezahlen wir die Versuchspersonen nach dem Experiment entsprechend ihrem Gewinn, und zwar mit echtem Geld.

Spektrum: Haben Ihre Probanden Erfahrung in diesem Geschäft oder nehmen Sie sozusagen den Mann von der Straße?

Oechssler: Meist Studierende der Wirtschaftswissenschaften, die Grundkenntnisse haben. Wann immer es geht, setzen wir Manager, Börsenhändler oder andere Profis ein, aber die sind natürlich schwieriger zu erreichen.

Spektrum: Neuere Modelle erklären Spekulationsblasen durch den Einfluss psychologischer Faktoren auf die Entscheidungen. Sehen Sie das bei den Experimenten auch?

Oechssler: Unbedingt. Robert Shiller, der im Jahr 2000 vor einem Crash der Dot-com-Aktien und 2005 vor der Überbewertung des amerikanischen Immobilienmarkts gewarnt hat, beschreibt verschiedene Heuristiken, die zur Blasenbildung beitragen. Zwei davon untersuchen wir gezielt: die Rolle von »Stories«, die begründen, warum »diesmal alles anders« sei, und den Einfluss von Kommunikation auf Herdenverhalten.

Spektrum: Diesmal ist alles anders – beeinflusst eine so naive Überzeugung tatsächlich das Verhalten hartgesottener Investoren?

Oechssler: Wenn Sie die Aussagen von Börsenprofis kurz vor einem Crash durchforsten, finden Sie genügend Beispiele für Storys, die begründen sollen, warum die Bubble diesmal eben keine ist und deshalb auch nicht platzen kann. In der Dot-com-Blase wurde alles gekauft, was nur irgendwie mit Internet zu tun hatte, ohne dass realistische Gewinnerwartungen bestanden. Vor der momentanen Krise vertrauten alle darauf, dass Hauspreise in den USA einfach nicht auf breiter Front sinken können.

Spektrum: Wie erzeugt man Herdenverhalten im Labor?

Oechssler: Sehr einfach. Wir haben beispielsweise unsere Probanden darüber informiert, dass es manchmal Insider im Markt gibt. Auch wenn in Wirklichkeit gar keine Insiderinformationen kursierten, deuteten die Teilnehmer kleine zufällige Fluktuationen der Aktienwerte dann oft als Anzeichen für Insidergeschäfte. Das Ergebnis waren massive Trends bis hin zu Spekulationsblasen.

Spektrum: Sehen Sie Möglichkeiten, dergleichen zu verhindern?

Oechssler: Als wir uns überlegten, den Probanden Gelegenheit zu geben, sich per Chat auszutauschen, erwarteten wir eigentlich, dass es noch häufiger zu Spekulationsblasen kommen würde. Aber das Gegenteil war der Fall, die Kommunikation verhinderte die Überbewertung der Papiere.

Spektrum: Was schlagen Sie für den realen Markt als technische Maßnahme vor?

Oechssler: Die experimentelle Forschung zeigt deutlich, dass so genannte Futures und Leerverkäufe eher dazu beitragen, Blasen zu verhindern. Bei den ersten werden Aktien heute gekauft oder verkauft, aber erst zu einem festgesetzten Zeitpunkt geliefert. Letztere sind Verkäufe von Wertpapieren, die man nicht besitzt, sondern leiht, und bei denen man darauf hofft, sie zu einem späteren Zeitpunkt zu einem günstigeren Preis zurückkaufen zu können. Klingt zwar hoch spekulativ, aber im Grunde eignen sich beide Finanzinstrumente, um andere Risiken abzusichern. Und: Man kann mit diesen Instrumenten eine Blase platzen lassen, bevor sie bedrohlich wird. Ebenfalls deutlich wurde, dass zu viel Liquidität im Markt die Preise treibt. Wenn Sie alle Händler in einem Experiment mit der doppelten Menge an Cash ausstatten, dann erhöhen Sie die Preise, obwohl sich an den Fundamentaldaten der Aktien rein gar nichts geändert hat. Es ist vor allem die Aufgabe der Zentralbanken, die Liquidität zu kontrollieren. Das sollte uns eine Lehre für die Verhinderung zukünftiger Krisen sein.

Das Interview führte **Klaus-Dieter Linsmeier**.

schmilzt. Andrew Lo, Wirtschaftsprofessor am Massachusetts Institute of Technology, hat zusammen mit einem Hedgefonds-Spezialisten eine Theorie entwickelt, die das Modell der effizienten Märkte hinreichend miteinbezieht, aber zugleich berücksichtigt, dass die herkömmlichen Theorien das Marktgeschehen nicht in vollem Umfang widerspiegeln. Lo versucht eine große Synthese, die Evolutionstheorie mit der klassischen Wirtschaftstheorie und der Verhaltensökonomik verbindet. Sein Ansatz basiert – mit anderen Worten – darauf, die darwinsche Theorie der natürlichen Auslese auf Simulationen ökonomischen Verhaltens anzuwenden. Auf diese Weise will Lo neue Einsichten gewinnen, wie Märkte funktionieren. Zudem hofft er, weit genauer als bislang vorhersagen zu können, wie sich Finanzmarktteilnehmer – Individuen ebenso wie Institutionen – verhalten.

Auf ähnliche Ideen waren Ökonomen schon früher gekommen. Der Amerikaner Thorstein Bunde Veblen (1857–1929) schlug bereits 1898 vor, Wirtschaft als evolutionäre Wissenschaft zu betrachten. Und der Brite Thomas Robert Malthus (1766–1834) beeinflusste Charles Darwin sogar mit seinen Vorstellungen eines »Kampfes ums Überleben«.

In gleicher Weise, wie manche Organismen besonders befähigt sind, in einer bestimmten ökologischen Nische zu überleben, betrachtet die Hypothese der adaptiven Märkte unterschiedliche Marktteilnehmer als »Spezies«, die mit anderen um Erfolg ringen. Weiterhin geht sie davon aus, dass diese mitunter auf Intuition und Erfahrung basierende Heuristiken verwenden und manchmal durchaus irrationale Ansätze verfolgen – wie etwa den, bei Verlusten das Risiko weiter zu erhöhen. Am Markt werden sich aber ähnlich wie im Konkurrenzkampf in der Natur die objektiv erfolgreicherer Verhaltensstrategien unabhängig von deren anscheinender subjektiver Rationalität oder Irrationalität durchsetzen. Sie werden »selektiert«.

»Ökonomen leiden an einer tief sitzenden psychologischen Störung, die ich als Neid auf die Physik bezeichne«, meint Lo. »Wir wünschten uns, dass sich 99 Prozent aller ökonomischen Verhaltensweisen durch drei einfache Naturgesetze beschreiben lassen. Tatsächlich jedoch haben wir 99 Gesetze, die nur drei Prozent unseres Verhaltens erklären. Die Ökonomie ist ein zutiefst menschliches Unterfangen und sollte daher im größeren Kontext von Konkurrenz, Mutation und natürlicher Auslese – kurz: von Evolution – verstanden werden.«

Mit einem evolutionären Modell an der Hand können sich Investoren besser auf die

Situation einstellen, wenn sich die Risiken unterschiedlicher Investmentstrategien verändern. Aber der größte Vorteil dieser Simulationen ist, dass sich damit frühzeitig erkennen lässt, ob die Wirtschaft aus einem stabilem Gleichgewicht gerät. Mit diesen Erkenntnissen könnten Aufsichtsbehörden und Investoren gewarnt werden, wenn sich eine Blase entwickelt oder zu platzen droht.

Ein adaptives Marktmodell kann Informationen verwerten, wie Marktpreise sich verändern – in ähnlicher Weise, wie Menschen sich bestimmten ökologischen Nischen anzupassen vermögen. Weiterhin kann es herleiten, ob Preise des einen Tages die des nächsten Tages beeinflussen – Indiz für das von Verhaltensökonomien beobachtete »Herdenverhalten« und Anzeichen einer möglicherweise noch kaum sichtbaren Blase. Auf Basis solcher Modelle könnten Finanzaufseher ihre Regulierungen justieren und Risiken begegnen, vor denen herkömmliche Risikomodelle die Märkte nicht ausreichend zu schützen vermögen. Lo befürwortet die Einrichtung einer Institution für Kapitalmärkte, die Daten zu Risiken sammelt, die das Finanzsystem bedroht – vergleichbar Einrichtungen der Luftfahrt – und damit eine wichtige Grundlage für adaptive Markt-Modellierung liefert.

Innovation ohne Spekulation?

Letztlich sind wir Menschen Primaten, auch wenn wir einen Nadelstreifenanzug tragen und täglich große Geldmengen bewegen. Ein rationaler Investor sollte einen Zustand »ich habe von zehn Millionen Dollar acht Millionen verloren« genauso bewerten wie »ich hatte nichts und habe zwei Millionen gewonnen«. Tatsächlich aber fürchten wir wie andere Primaten Verluste weit mehr, als wir uns über Gewinne freuen können – ein evolutionäres Erbe, das motiviert, Nahrungsvorräte zu schützen und unsere Schritte sorgsam abzuwägen, um keinem Raubtier über den Weg zu laufen. Der Wirtschaftswissenschaftler Thorsten Hens von der Universität Zürich glaubt, dass sogar das Spekulieren selbst dem Menschen in den Genen steckt, denn es entspräche dem Suchen nach neuen Möglichkeiten, dem Streben nach Verbesserung. Viele Innovationen – ob Eisenbahnen, Massenproduktion oder Internet – bargen für ihre Fürsprecher ein Risiko und waren keineswegs das Ergebnis vollkommen rationalen Verhaltens. Mit anderen Worten: Ohne Spekulation gäbe es zwar weniger Crashes, laut Hens aber auch weniger Fortschritt. Offenbar ist es also eine Frage des rechten Maßes. Ob Verhaltensökonomien und Hirnforscher Anlegern helfen können, dieses zu bewahren? ◀



Gary Stix arbeitet in der Redaktion von »Scientific American«. Die Redaktion von SdW dankt Hartmut Kliemt von der Frankfurt School for Finance and Management für fachliche Beratung.

Akerlot, G. A., Shiller, R. J.: *Animal Spirits: How Human Psychology Drives the Economy and Why it Matters for Global Capitalism.* Princeton University Press, 2009.

Dueck, G.: *Abschied vom Homo oeconomicus. Warum wir eine neue ökonomische Vernunft brauchen.* Eichborn, Frankfurt am Main 2008.

Thaler, R. H., Sunstein, C. R.: *Nudge: Wie man kluge Entscheidungen fällt.* Econ, Berlin 2009.

Westerhoff, N.: *Der gefühlte Preis.* In: *Gehirn&Geist* 1-2/2009, S. 50–56.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/1005453.

1959

Möwen trinken Meerwasser

»Schon mehrfach wurde die Beobachtung gemacht, daß Meeresvögel und Meeresreptilien in anscheinend unbegrenzter Menge das salzige Meerwasser zu trinken vermögen. Man hat nun die Entdeckung gemacht, daß bei Meeresvögeln für die Salzausscheidung nicht die Niere die Hauptrolle spielt, sondern eine Drüse, welche im Kopf hinter der Nasenhöhle ihren Sitz hat. In einem Experiment gab man einer Möwe 134 cm³ Meerwasser zu trinken – innerhalb von drei Stunden hatte sie fast das gesamt Salz wieder ausgeschieden. Ihre Salzdrüsen arbeiteten mehr als doppelt so schnell wie die Nieren und schieden von dem aufgenommenen Salz ungefähr 90 % aus.« *Naturwissenschaftliche Rundschau*, 12. Jg., Heft 10, Oktober 1959, S. 390

Fit durch UV

»Beim gesunden Erwachsenen ist durch eine Serie von 8 Ultraviolettbestrahlungen innerhalb von 8 Wochen eine deutliche Verbesserung der körperlichen Leistungsfähigkeit zu erzielen. Die Bestrahlungszeiten werden so dosiert, daß nach den Bestrahlungen eine leichte Hautrötung (Erythem) auftritt. Nach Abklingen des Erythems werden der Grundumsatz, die Pulsfrequenz in Ruhe, der Energieverbrauch für eine bestimmte Arbeit gesenkt, die Kraftzunahme der Skelettmuskulatur aber erhöht.« *Die Umschau*, 59. Jg., Heft 19, 1. Oktober 1959, S. 600f



Rettung in höchster Not soll dieser Seenotsender Schiffrückigen bieten.

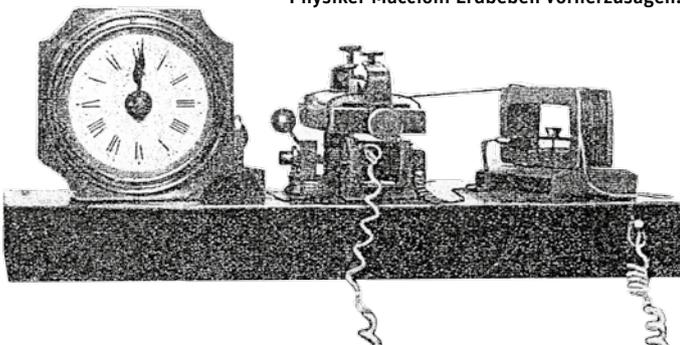
Hilfe auf hoher See

»Opfer von Schiffsunglücken oder Flugzeugabstürzen über See wird man in Zukunft mit Hilfe dieses Seenotsenders schneller auffinden und retten können. In einem wasserdichten Kunststoffgehäuse, das auch noch einen Mann über Wasser hält, befindet sich ein Sender, der sofort nach dem Auftreffen auf das Wasser automatische Not- und Peilzeichen ausstrahlt. Die Reichweite beträgt etwa 35 km. Die Lebensdauer der Batterien beträgt drei Tage.« *Populäre Mechanik*, 4. Jg., Bd. 9, Heft 4, Oktober 1959, S. 14

Erdbeben vorhersagen

»Ein italienischer Physiker Padre Maccioni hat der Akademie in Siena ein Instrument vorgelegt, das zum ersten Male das Eintreten von Erdbeben wenigstens einige Minuten im voraus anzugeben gestattet. Maccioni hat sich von der Tatsache leiten lassen, dass manche Tiere eine Art Ahnungsvermögen für Erdbeben besitzen. Auch ist bekannt, daß manche Menschen kurz vor einem Erdbeben aus dem Schlaf aufwachen, obwohl noch keinerlei Erschütterung vorliegt. Um diese Erscheinung zu erklären, denkt Maccioni, daß vor dem eigentlichen Beben elektromagnetische Wellen ausgehen, die auf das Nervensystem ihren Einfluß ausüben. Der Alarmapparat besteht aus einer elektrischen Zelle, in deren Außenstromkreis ein Galvanometerrelais und der Kohärer (eine frühe Form des Funkempfängers, *die Red.*) eingeschaltet sind. Das Relais dient zum Schließen eines starken galvanischen Elementes, in dessen Stromkreis auch eine Schreibvorrichtung, eine auf 12 arretierte Uhr und eine Alarmglocke eingeschaltet sind.« *Die Umschau*, 13. Jg., Nr. 41, 9. Oktober 1909, S. 845f

Mit seinem »Alarmapparat« versuchte der Physiker Maccioni Erdbeben vorherzusagen.



Warnung für Sonnenhungrige

»Verf. macht darauf aufmerksam, daß nach übermäßig ausgedehnten Sonnenbädern schwere Krankheitserscheinungen auftreten können. Es fanden sich bei Personen, die gelegentlich bis zu 5 Stunden täglich Sonnenbäder genommen hatten, abgesehen von Hautentzündungen, Unregelmäßigkeit und Beschleunigung der Herzaktion, stark gespan-

1909

ter Puls, verstärkte zweite Töne, in einigen Fällen Collaps infolge von Herzinsuffizienz. In andern Fällen traten auffällige Erregungen des Nervensystems zutage, bei sonst sehr gesunden, kräftigen Menschen.« *Allgemeine Medicinische Central-Zeitung*, 78. Jg., Nr. 41, 9. Oktober 1909, S. 564

Wider den Straßenstaub

»Versuche zur Bekämpfung des Straßenstaubes wurden auch in diesem Winter in Berlin angestellt. Und zwar hat man dazu »Antistaubit« verwendet, der bei der Kaligewinnung als Abfallprodukt billigst erhalten wird. Der Erfolg war im Sommer gering, im Herbst und Winter dagegen äußerst zufriedenstellend. Nach Besprengung mit diesem Mittel war die Straße staubfrei und trotz des starken Frostes nicht vereist. Durch Laboratoriumsversuche wurde nachgewiesen, daß Antistaubit keinerlei schädlichen Einfluß auf den Stampfasphalt oder das Lederzeug des Schuhwerks hat.« *Rundschau für Technik und Wirtschaft*, 2. Jg., Nr. 20, 23. Oktober 1909 S. 401

GEOMETRIE

Dieter Junkers bewegliche Polyeder

Der Geometrie-Künstler hat neben vielen anderen Dingen das Prinzip der Kaleidozyklen zu neuer Blüte erweckt.



ALLE FOTOS DES ARTIKELS (SOfern NICHT ANDERS ANGEGEBEN): CHRISTOPH PÖPPE

Von Christoph Pöppe

Wer in Hektik verfällt, hat schon verloren. Die Kette aus einem Dutzend nichtregelmäßiger Tetraeder, die Kante an Kante durch Textilscharniere verbunden sind, wirkt auf den ersten Blick ganz gefügig; aber das täuscht. Kaum versucht man, sie in eine bestimmte Form zu zwingen, wird sie widerspenstig und verweigert jede weitere Mitarbeit – bis man die Glieder, die man

schon an der richtigen Stelle fixiert hatte, wieder freigibt und damit der Unordnung aufs Neue Tür und Tor öffnet. Nach intensivem Probieren fällt plötzlich die Kette, scheinbar freiwillig, doch an den richtigen Platz; und dann ist es eine große Überraschung.

Wer es gar nicht schafft, darf den Konstrukteur per E-Mail um Hilfe bitten – aber erst »nach langem vergeblichem Bemühen«. Die Kaleidozyklen von Dieter Junker erfordern nicht nur

räumliches Vorstellungsvermögen, sondern auch Geduld.

Dieter Junker, Werbegrafiker aus Kassel, fasste 2004, mit 58 Jahren, den Entschluss, in seinem Leben doch noch etwas Sinnvolles zu tun, ließ sich zwei Lebensversicherungen auszahlen und widmet sich seitdem der Erforschung dessen, »was die Welt im Innersten zusammenhält«, im Allgemeinen und der räumlichen Geometrie, nach dem Vorbild der alten Griechen, im Besonderen.

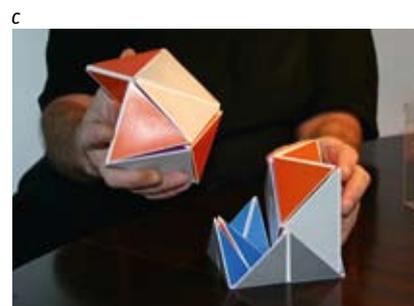
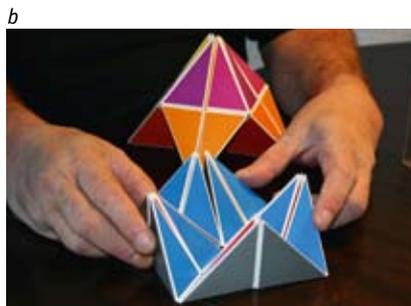
CUBE ONE: ZERLEGUNG EINES WÜRFELS

Das Spiel beginnt mit zwei Tetraedern (*a*, rötliche Farbtöne) und zwei Oktaedern der halben Kantenlänge (blau). Jeder dieser Körper ist als 16-gliedriger Kaleidozyklus realisiert. Die große Anzahl der Glieder macht die Ketten unerwartet beweglich und den Umgang mit ihnen entsprechend knifflig.

Man kann ein Oktaeder so halbieren, dass der Schnitt durch vier seiner sechs Eckpunkte geht, und das auf drei verschiedene Wei-

sen. Führt man alle drei Schnitte – in zueinander senkrechten Ebenen – aus, zerfällt das Oktaeder in acht Teile, deren neu entstandene Grenzflächen gleichschenkelig-rechtwinklige Dreiecke sind (grau in *b*). Jedes dieser Teile wird für den Kaleidozyklus nochmals entzweigeschnitten.

Das Tetraeder wird mit einem ersten Schnitt, der durch die Mittelpunkte von vier der sechs Kanten geht, halbiert. Wieder entsteht





MIT FRIEDL. GEN. VON DIETER W. JUNKER

Dieter Junker präsentiert eine seiner Kreationen (links). Der Blick in sein Atelier (rechts) zeigt ein konkaves Wackelpolyeder aus 72 gleichseitigen Dreiecken.

Entgegen einem geläufigen Vorurteil ist nämlich dieser Zweig der Mathematik durch die großen Werke der Antike keineswegs erledigt. Eines von Junkers Hauptarbeitsgebieten erblickte überhaupt erst in den 1930er Jahren das Licht der Welt. Der »Umstülp-Würfelmantel« des Schweizer Tüftlers Paul Schatz (1898–1979) ist der früheste Kaleidozyklus (Spektrum der Wissenschaft 2/1991, S. 10, und 1/2008, S. 96); in einem viel verkauften Buch haben Doris

Schattschneider und Wallace Walker das Konzept verallgemeinert und den Namen geprägt.

Vielfalt der Kaleidozyklen

Aus einem regulären Tetraeder, der dreiseitigen Pyramide, die von vier gleichseitigen Dreiecken begrenzt wird, greife man eine Kante heraus. Dann gibt es genau eine Kante, die mit dieser keinen Punkt gemeinsam hat. An diese beiden Kanten füge man weitere Tetraeder an;

dabei soll die gemeinsame Kante zweier benachbarter Tetraeder als Scharnier dienen, so dass die beiden Körper gegeneinander beweglich bleiben. So bildet man beliebig lange Tetraederketten, die man zum Ring schließt.

Die beiden Scharnierkanten jedes Tetraeders stehen in zueinander senkrechten Richtungen. In dem interessanteren Fall des nichtregulären Tetraeders, dessen Kanten also verschieden lang sein dürfen, liegen diese beiden Kanten vielleicht nicht mehr rechtwinklig zueinander, auf jeden Fall aber nicht in einer Ebene. Dass ein derartig konstruierter Ring eine irgendwie einfache Gestalt annimmt, ist dadurch von vornherein ausgeschlossen.

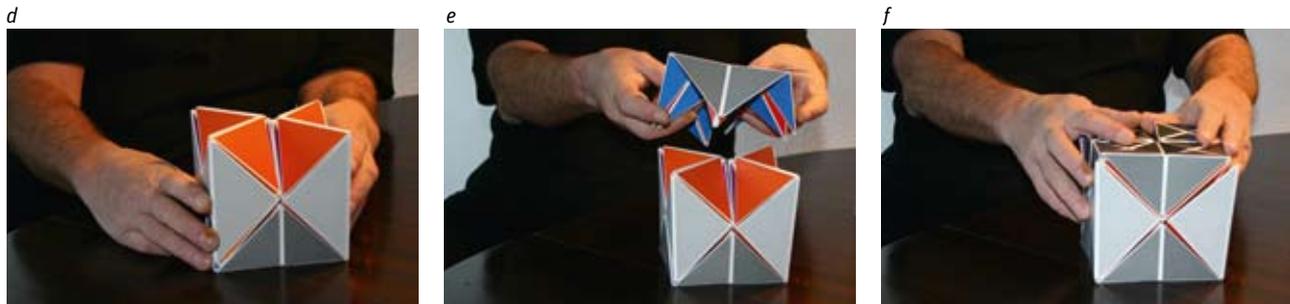
Gleichwohl kann ein Tetraederring so gelenkig sein wie ein Zirkusakrobat, der sich in einen kleinen Glaswürfel zwingt – wenn Junker ihn entsprechend konstruiert hat. Irgendein von Ebenen begrenztes räumliches Gebilde, ein »Polyeder«, in Tetraeder zu zerlegen ist nicht schwer; aber eine Zerlegung zu finden, deren Komponenten in der beschrie-

eine quadratische Schnittfläche (grau in *c*), die durch einen weiteren Schnitt nicht, wie beim Oktaeder, gevierteilt, sondern nur halbiert wird.

Durch geeignetes Umstülpen geraten die grauen Flächen des ersten Oktaeders nach außen und bilden zusammen den Boden und ein Stück der Seitenflächen eines großen Würfels (*b*). Auch die Tetraeder werden so gewendet, dass ihre grauen Flächen zu den Sei-

tenwänden des Würfels beitragen (*c* und *d*). Was sie an Platz übrig lassen, wird exakt von dem zweiten Oktaeder gefüllt, das, genau so umgestülpt wie das erste, kopfüber auf die beiden Tetraeder aufgesetzt wird (*e* und *f*).

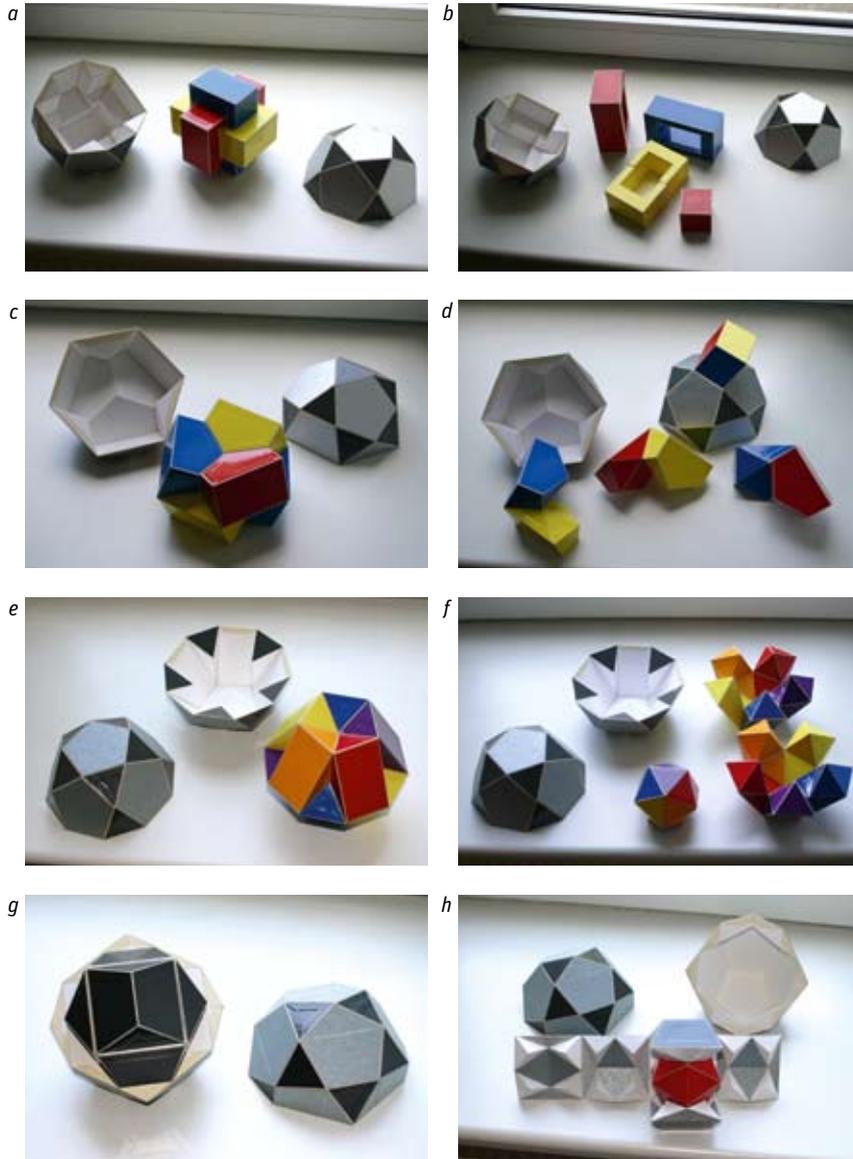
Durch Nachrechnen mit den Volumenformeln bestätigt man, dass die vier Körper in der Tat das gleiche Volumen einnehmen wie ein Würfel mit der $\sqrt{2}$ -fachen Kantenlänge.





Ein Oktaeder (links), entlang der Kanten in gewisser Weise aufgeschnitten, lässt sich öffnen, bis die Löcher die Form eines Quadrats annehmen (Kuboktaeder, rechts). Die obere Zeile zeigt für sieben Stationen auf diesem Weg die Konvexkörper, bei denen die Löcher nach außen geschlossen sind; das reguläre Icosaeder steht an fünfter Stelle, In der mittleren Zeile liegen einige Konkavkörper, darunter in der Mitte (violett und grün) Jessens orthogonales Icosaeder. In der untersten Zeile finden sich »Skelette« aus den Ebenen, die parallele Außenkanten verbinden, sowie die den Körpern einbeschriebenen Oktaeder.

DAS WANDLUNGSFÄHIGE IKOSIDODEKAEDER

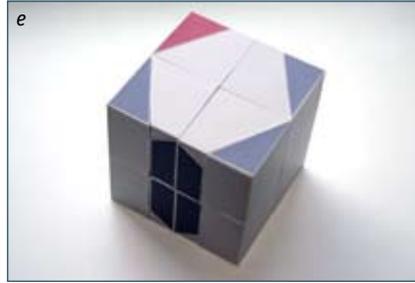
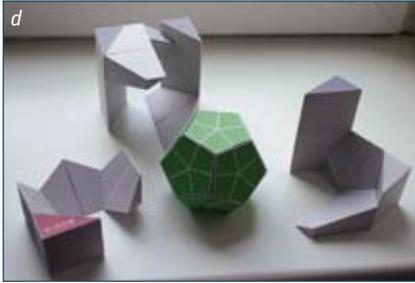
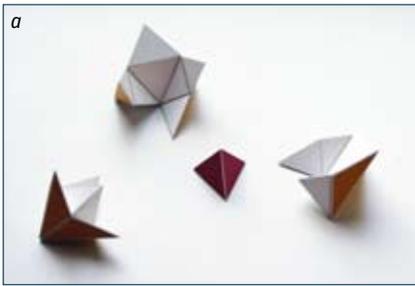


Der Körper entsteht, indem man einem Dodekaeder oder auch einem Icosaeder alle Ecken abschneidet. Dabei nimmt das Messer außer der Ecke selbst noch die Hälfte von jeder Kante weg, die von dieser Ecke ausgeht. Gewisse Eigenschaften erbt das Ikosidodekaeder von seinen »Eltern«. So sind die zwölf Eckpunkte des Icosaeders die Ecken dreier Rechtecke mit dem Seitenverhältnis des goldenen Schnitts, die sich in ihrem gemeinsamen Mittelpunkt treffen und aufeinander senkrecht stehen. Im Ikosidodekaeder finden sich diese Rechtecke »verdickt« als Quader wieder, deren drei Kantenlängen ebenfalls im Verhältnis des goldenen Schnitts zueinander stehen. Hier (*a* und *b*) sind sie als rechteckige Rahmen ausgeführt, die sich gegenseitig blockierend, ineinanderstecken (»borromäische Ringe«) und in ihrer Mitte einen Würfel umschließen, der die gleiche Kantenlänge hat wie der Ursprungskörper.

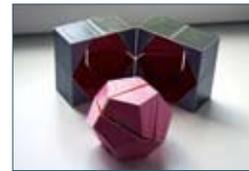
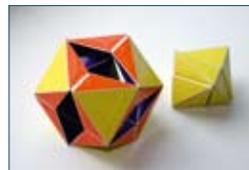
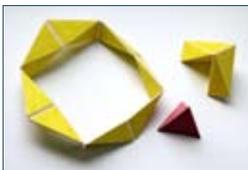
Dieselben Quader passen statt senkrecht aufeinander auch schräg liegend ins Ikosidodekaeder. Ihre Schnittmenge ist in diesem Fall nicht ein Würfel, sondern ein verzerrter Würfel, ein so genanntes Rhomboeder (*c* und *d*).

Hochkant schräg gestellt, lassen sich fünf dieser Quader in symmetrischer Weise einbauen und haben ein reguläres Icosaeder als Schnittmenge (*e* und *f*).

Schließlich kann das Ikosidodekaeder auch seine »Elternkörper«, das Dodekaeder (*g*) und darin das Icosaeder (*h*), umhüllen.



Platonische Körper nach dem Matroschka-Prinzip: Ein Tetraeder (a) steckt in einem Oktaeder (b) in einem Ikosaeder (c) in einem Dodekaeder (d) in einem Würfel (e). Die Schalen sind – entlang festgelegter Schnittebenen, mit etwas Willkür in der Auswahl derselben – so in Teile zerlegt, dass das Gebilde in jedem Stadium des Zusammenbaus ohne weitere Hilfsmittel zusammenhält.



benen Weise zu einer Kette zusammengeknüpft werden können, erfordert große Kunstfertigkeit (Kasten S. 76/77).

Ein weiteres bewegliches Polyeder ist das berühmte »Heureka-Oktaeder« (Spektrum der Wissenschaft 9/1991, S. 48), das, sinnreich aufgeschlitzt, in einem kontinuierlichen Übergang zu einem archimedischen (halbregelmäßigen) Körper, dem Kuboktaeder, aufblüht und wieder in sich zusammenfällt. Dabei tun sich Löcher auf, deren vier Eckpunkte im Allgemeinen nicht in einer Ebene liegen. Ein solches Loch kann man auf zwei verschiedene Weisen durch Dreiecke schließen: »nach außen« so, dass das Gesamtobjekt konvex wird, oder »nach innen«, wodurch eine einspringende Kante entsteht.

Dieter Junker hat für viele dieser Zwischenstadien, insbesondere das reguläre Ikosaeder, die Löcher auf beide Arten geschlossen und auf diesem Weg auch neue Raumfüllungen durch (mehr oder weniger reguläre) Ikosaeder entdeckt (Bild S. 78 oben).

Schließt man in der Position des regulären Ikosaeders die Löcher nach innen statt nach außen, so ergibt sich das »orthogonale Ikosaeder« von Børge Jessen. Der Körper ist »infinitesimal wackelig« (Spektrum der Wissenschaft 3/1992, S. 12): Eigentlich ist er gar nicht deformierbar, aber der Widerstand gegen die Deformation ist im Idealzustand gleich null und wächst erst mit zunehmender Abweichung an, mit dem Effekt, dass ein aus Papier gefertigtes Exemplar sich ein ganzes Stück zusammendrücken lässt und dann wieder zurückfedert. Manche »Korpuskel«-Konstruktionen von Eva Wohlleben (Spektrum der Wissenschaft 6/2009, S. 69) lassen sich aus Jessens Ikosaeder herleiten; Junker hat nicht nur diesen Körper analysiert, sondern auch nach dem Korpuskel-Konzept allerlei lustige Wackelkörper konstruiert.

Die Tatsache, dass acht von den zwanzig Ecken des regulären Dodekaeders zugleich Ecken eines Würfels sind, lässt sich zur Konstruktion eines Dodekaeders nutzen, das man um einen Wür-

Das Matroschka-Prinzip, verschärft: Wieder stecken die platonischen Körper ineinander, in derselben Reihenfolge wie oben; aber diesmal ist jede Schale ein Kaleidozyklus.

fel herumfalten kann. Wie Junker entdeckte, eignet sich ein Verwandter des Dodekaeders, das Ikosidodekaeder, noch besser zum Einhüllen der verschiedensten Körper (Kasten links).

Und neben vielen anderen Dingen, die hier keinen Platz mehr finden, hat Junker auch Wege gefunden, alle platonischen Körper ineinander einzuwickeln – irgendwie (Bild ganz oben) oder ganz raffiniert mit lauter Kaleidozyklen (Bild oben). ◁



Christoph Pöppe ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

Weblinks dazu finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/1005456.



🔊 Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Globaler Kollaps durch HUNGERSNÖTE ?

Nichts bedroht den Fortbestand unserer Zivilisation so sehr wie der Zusammenbruch ganzer Staaten durch plötzlichen Nahrungsmangel. Ursache solcher Hungerkrisen sind letztlich verschlechterte Umweltbedingungen.

Von Lester R. Brown

Rapide Veränderungen kommen meist ganz unerwartet. Wir sind gewohnt, bisherige Trends in die Zukunft zu extrapolieren, und in der Regel funktioniert das – doch manchmal versagt es total. Dann werden die Menschen von plötzlichen Ereignissen wie der gegenwärtigen Wirtschaftskrise einfach überrollt.

Erst recht mag der Gedanke, die gesamte Zivilisation könnte zusammenbrechen, auf den ersten Blick absurd erscheinen. Wer glaubt schon im Ernst, wir müssten eines Tages unseren gewohnten Lebensstandard völlig preisgeben? Welche Indizien sprechen für eine derart düstere Prognose – und wie sollen wir darauf reagieren? Wir haben uns so sehr an eine lange Liste höchst unwahrscheinlicher Katastrophen gewöhnt, dass wir sie pauschal mit einem Schulterzucken abtun: Gewiss, unsere Zivilisation könnte im Chaos versinken – aber die Erde könnte auch mit einem Asteroiden kollidieren!

Seit vielen Jahren befasse ich mich mit globalen Trends in Landwirtschaft, Bevölkerungsentwicklung, Umwelt und Wirtschaft sowie deren Wechselwirkungen. Alles in allem laufen die Folgen – insbesondere die davon erzeugten politischen Spannungen – auf den Kollaps von Regierungen und Gesellschaften hinaus. Dennoch habe ich mich bis vor Kurzem gegen die Idee gestäubt, Nahrungsmittelknappheit könnte nicht nur einzelne Staaten zu Fall bringen, sondern auch unsere gesamte Zivilisation.

Doch ich vermag diese Gefahr nicht mehr zu ignorieren. Da wir nach wie vor nicht im

Stand sind, die ökologischen Trends zu stoppen, welche die weltweite Nahrungsmittelproduktion untergraben – insbesondere Grundwasserabsenkung, Bodenerosion und Erderwärmung –, muss ich einen globalen Kollaps in Betracht ziehen.

Schon ein flüchtiger Blick auf die ökologischen Probleme unserer gegenwärtigen Welt erhärtet leider meine Schlussfolgerung. Wer sich mit Umweltfragen beschäftigt, beobachtet nun schon seit drei Jahrzehnten negative Entwicklungen, aber keine nennenswerte Anstrengung, auch nur einen dieser Trends umzukehren.

Wenn Staaten scheitern

In sechs der zurückliegenden neun Jahre blieb die Weltgetreideerzeugung hinter dem Verbrauch zurück und führte zu ständig sinkenden Lagerbeständen. Als 2008 die Ernte begann, reichten die weltweiten Vorräte gerade noch für 62 Tage – fast ein Rekordtief. Infolgedessen kletterten die Getreidepreise im Frühjahr und Sommer 2008 auf den höchsten je verzeichneten Stand.

Wenn die Nachfrage nach Nahrungsmitteln schneller steigt, als diese nachwachsen können, geraten die Regierungen von Ländern, die ohnehin am Rand des Chaos taumeln, durch ungehemmt steigende Nahrungspreise massiv unter Druck. Hungrige Menschen, die Getreide weder kaufen noch selbst anbauen können, gehen auf die Straße. Schon vor dem steilen Anstieg der Getreidepreise im Jahr 2008 nahm die Anzahl »scheiternder Staaten« zu (siehe die Liste auf S. 82). Ein Grund war, dass es ihnen nicht gelang, ihr Bevölkerungswachstum zu bremsen. Doch wenn sich die

In Kürze

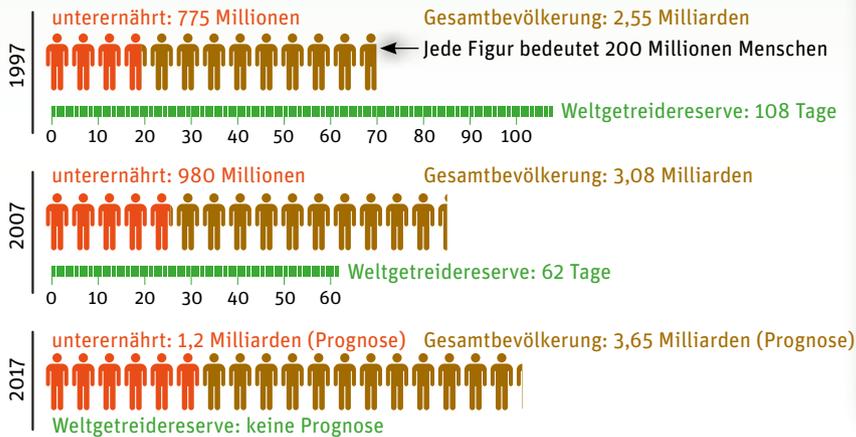
- ▶ Nahrungsmittelknappheit und dadurch erhöhte Lebensmittelpreise treiben arme Länder ins Chaos.
- ▶ Solche »gescheiterten Staaten« exportieren Krankheiten, Terrorismus, Drogen, Waffen und verursachen Flüchtlingsströme.
- ▶ **Wasserknappheit, Erosion und Klimawandel** setzen der Nahrungsmittelproduktion enge Grenzen.
- ▶ **Die Weltordnung ist bedroht**, wenn infolge dieser negativen Umweltfaktoren mehrere Staaten zusammenbrechen.



Im Dorf Dubie in der Demokratischen Republik Kongo stehen Kinder für Nahrung an. Das Foto wurde im Dezember 2005 aufgenommen.

EINE ENTWICKLUNG IN DIE FALSCHER RICHTUNG

WACHSENDER HUNGER IN DEN 70 ÄRMSTEN LÄNDERN



(QUELLEN: US DEPARTMENT OF AGRICULTURE 2008 / US CENSUS BUREAU)



Sowohl die absolute Anzahl als auch der Prozentsatz chronisch unterernährter Menschen in den 70 ärmsten Ländern der Erde nimmt zu, während die Nahrungsreserven der Welt – die restlichen Getreidebestände bei Beginn der neuen Ernte – schrumpfen.

GETTY IMAGES / MASUYOSHICHIBA

SCHEITERNDE STAATEN

Jedes Jahr bewerten der Fund for Peace und das Carnegie Endowment for International Peace gemeinsam Länder nach zwölf Zustandsindikatoren. Die 20 nach ihren Gesamtwerten im Jahr 2007 am stärksten von einem Kollaps bedrohten Staaten sind (beginnend mit den labilsten):

- Somalia
- Sudan
- Simbabwe
- Tschad
- Irak
- Demokratische Republik Kongo
- Afghanistan
- Elfenbeinküste
- Pakistan
- Zentralafrikanische Republik
- Guinea
- Bangladesch
- Burma (Myanmar)
- Haiti
- Nordkorea
- Äthiopien
- Uganda
- Libanon
- Nigeria
- Sri Lanka

QUELLE: "THE FAILED STATES INDEX, 2008" IN: FOREIGN POLICY, JULI/AUGUST 2008

Ernährungslage weiter verschlechtert, werden ganze Nationen immer schneller zusammenbrechen. Wir sind in eine neue geopolitische Ära eingetreten. Im 20. Jahrhundert wurde die internationale Sicherheit vor allem durch Konflikte der Supermächte bedroht – heute hingegen durch scheiternde Staaten. Uns gefährdet nicht Übermacht, sondern Ohnmacht.

Ein Staat scheidet, wenn er nicht mehr fähig ist, seinen Bürgern persönliche Sicherheit, Zugang zu Nahrungsmitteln sowie grundlegende Sozialleistungen wie Bildung und Gesundheitsversorgung zu garantieren. Häufig verliert er teilweise oder ganz die Kontrolle über sein Territorium. Sobald eine Regierung ihr Gewaltmonopol einbüßt, beginnen sich Recht und Ordnung aufzulösen. Schließlich kann es im Land so gefährlich zugehen, dass Hilfsorganisationen ihre Arbeit einstellen. In Somalia und Afghanistan ist es fast schon so weit.

Scheiternde Staaten wirken sich auf die internationale Gemeinschaft destabilisierend aus, denn sie sind eine Quelle für Terrorismus, Drogen, Waffen und Flüchtlinge. Somalia, 2008 die Nummer eins auf der Liste gescheiterter Staaten, wurde zum Piratenstützpunkt. Irak, die Nummer fünf, ist eine Brutstätte des Terrorismus. Afghanistan, Nummer sieben, liefert weltweit am meisten Heroin. Flüchtlinge aus Ruanda, darunter Tausende bewaffneter Soldaten, destabilisierten nach dem Genozid von 1994 die benachbarte Demokratische Republik Kongo, Nummer sechs.

Unsere globale Zivilisation braucht ein funktionierendes Netzwerk politisch stabiler Nationalstaaten, um die Ausbreitung von Infektionskrankheiten einzudämmen, das internationale Währungssystem zu regulieren, den internationalen Terrorismus zu bekämpfen und vieles andere mehr. Wenn das System zur

Eindämmung von Infektionskrankheiten wie Polio, Sars oder Vogelgrippe versagt, gerät die ganze Menschheit in Gefahr. Brechen Staaten zusammen, steht niemand für ihre Schulden bei ausländischen Gläubigern gerade. Kollabieren hinreichend viele Staaten, bedroht ihr Sturz die Stabilität der Weltzivilisation.

Eine neue Form des Hungers

Der sprunghafte Anstieg der Weltgetreidepreise in den Jahren 2007 und 2008 – und mit ihm die Gefährdung der Ernährungssicherheit – hat eine neue, besonders beunruhigende Qualität. In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts kletterten die Getreidepreise mehrmals dramatisch. Anfang 1972 beispielsweise erkannte die Sowjetunion, dass ihre Ernte schlecht ausfallen würde, und kaufte in aller Stille den Weltweizenmarkt leer. Infolgedessen stiegen die Weizenpreise andernorts auf mehr als das Doppelte; die Preise für Reis und Mais zogen nach. Doch derartige Preisschocks waren ereignisbedingt – Dürre in der Sowjetunion, Ausbleiben des Monsuns in Indien, Ernteaussfälle durch Hitze im US-amerikanischen Maisgürtel. Darum blieb der Anstieg kurzlebig: Mit der nächsten Ernte fielen die Preise wieder auf Normalniveau.

Hingegen ist der jüngste Preisschock trendbedingt und wird sich darum ohne eine Trendwende wohl kaum legen. Auf der Nachfrageseite wirken mehrere Entwicklungen: Pro Jahr wächst die Erdbevölkerung um mehr als 70 Millionen; immer mehr Menschen streben statt Pflanzennahrung getreideintensive tierische Produkte an; und ein erheblicher Teil der US-amerikanischen Getreideernte wandert in die Produktion von Biosprit.

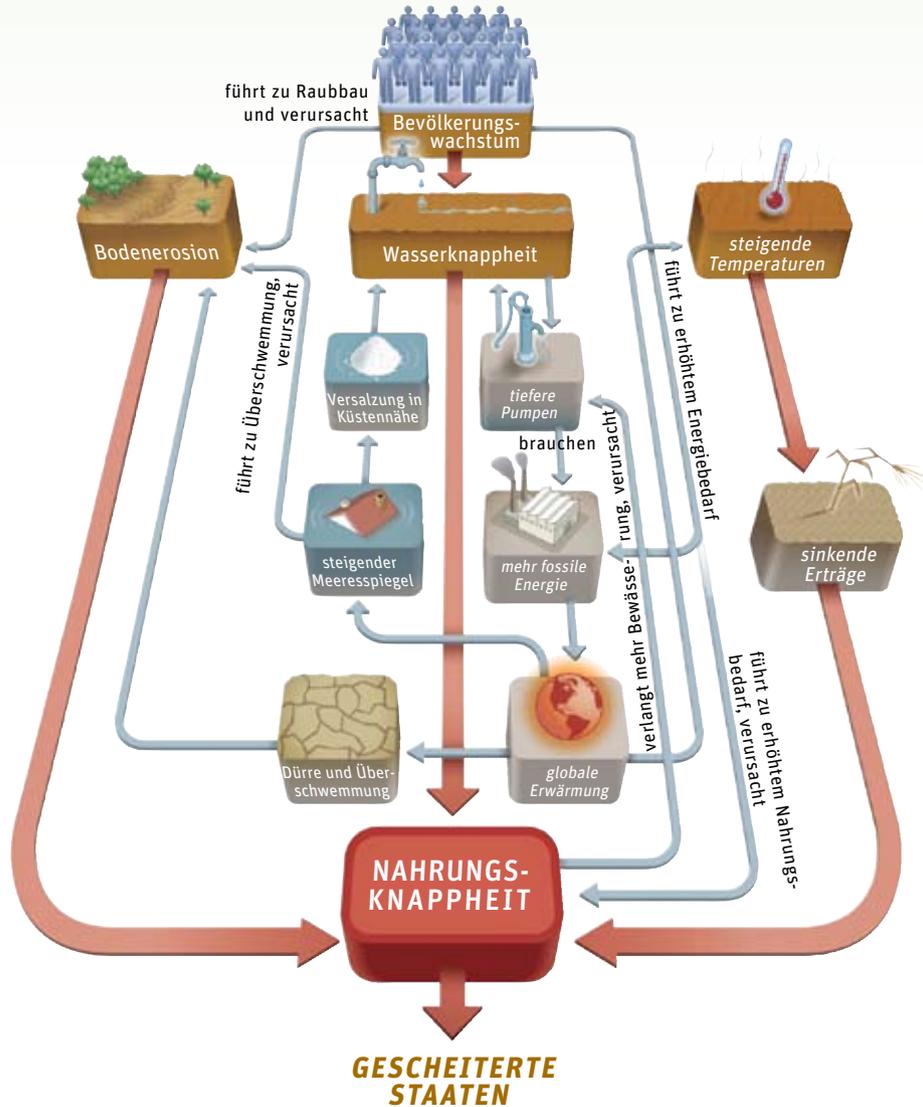
Die mit steigendem Wohlstand einhergehende Zusatznachfrage nach Getreide variiert

URSACHEN DER NAHRUNGSKNAPPHEIT

Wachsender Nahrungsmangel erweist sich als Hauptursache für den Zusammenbruch ganzer Staaten. Die Knappheit entsteht aus einem engen Netz von Wirkungen und Rückwirkungen, die sich wechselseitig verstärken. Einige der häufigsten Faktoren sind hier schematisch dargestellt. An dem heutigen Mangel sind nicht einmalige, wetterbedingte Ernteausfälle schuld, sondern vier langfristige Trends: rasches Bevölkerungswachstum, Bodenerosion, Wasserknappheit und steigende Temperaturen.

stark von Land zu Land. In Staaten mit niedrigem Einkommen wie Indien, wo Getreide 60 Prozent des Kalorienbedarfs deckt, wird pro Kopf und Tag rund ein halbes Kilogramm direkt konsumiert. In reichen Ländern wie den USA und Kanada liegt der Verbrauch pro Kopf fast viermal so hoch; allerdings werden 90 Prozent davon indirekt verzehrt – als Fleisch, Milch und Eier von Tieren, die Getreide fressen.

Mit steigendem Einkommen ärmerer Konsumenten wird der Getreidebedarf enorm zunehmen. Doch dieser künftig zu erwartende Anstieg verblasst gegenüber dem unstillbaren Hunger nach Biotreibstoff. Ein Viertel der US-Getreideernte von 2009 – genug, um bei derzeitigem Verbrauch 125 Millionen Amerikaner oder eine halbe Milliarde Inder zu ernähren – wird Fahrzeuge antreiben. Doch selbst wenn die gesamte US-Getreideernte in die Ethanol-

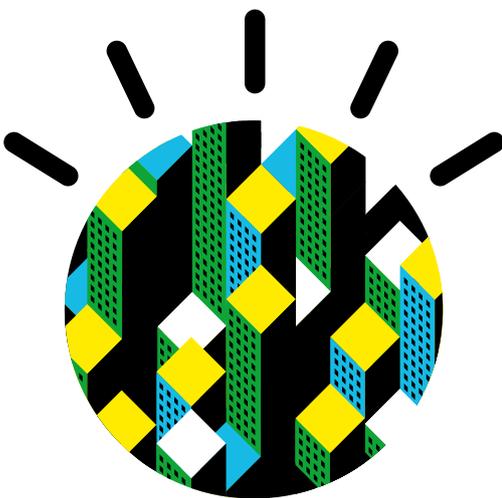


SW INFOGRAPHICS, SAMUEL VELASCO

Ideen für einen smarten Planeten

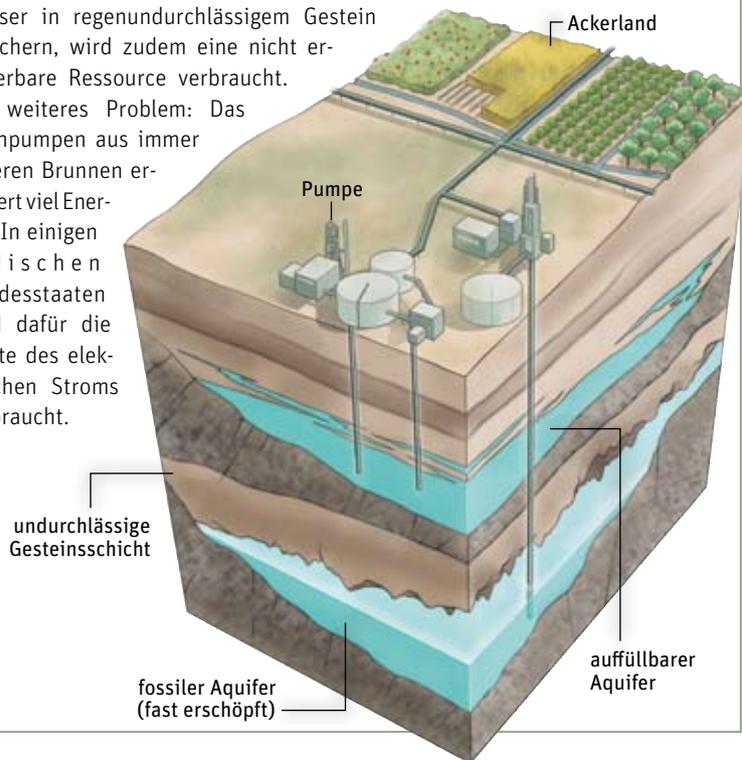
Städte, die uns das Leben leichter machen.

Bis 2050 werden 70% der Weltbevölkerung in Städten leben. Wenn die urbanen Infrastrukturen mit diesem Ansturm Schritt halten sollen, müssen wir sie intelligenter gestalten. Zum Beispiel, indem wir Städte als komplexe Ökosysteme begreifen und die Infrastrukturen für Verkehr, Wasser, Abfall, Verwaltung, Sicherheit, Energie miteinander vernetzen. Davon profitieren alle Aspekte der Lebensqualität – von sauberer Luft über staufreie Straßen bis zur Schulbildung unserer Kinder. Es ist, mit einem Wort, smart. Welchen Beitrag IBM dazu leistet, erfahren Sie unter ibm.com/think/de/city



WASSERKNAPPHEIT DURCH BEWÄSSERUNG

Die größte Belastung für die Süßwasservorräte ist die künstliche Bewässerung. Sie macht 70 Prozent des Wasserverbrauchs aus. Bewässerung ist meist unerlässlich für ertragreiche Landwirtschaft, doch viele Grundwasserleiter werden schneller leer gepumpt, als Niederschläge sie aufzufüllen vermögen. Durch Anzapfen »fossiler« Aquifere, die sehr altes Wasser in regenundurchlässigem Gestein speichern, wird zudem eine nicht erneuerbare Ressource verbraucht. Ein weiteres Problem: Das Hochpumpen aus immer tieferen Brunnen erfordert viel Energie. In einigen indischen Bundesstaaten wird dafür die Hälfte des elektrischen Stroms verbraucht.



SW INFOGRAPHICS, SAMUEL VELASCO

weit grassierende Wasserknappheit. Allein das künstliche Bewässern verbraucht 70 Prozent der globalen Süßwasservorräte. Millionen Pumpen fördern gegenwärtig mehr Wasser aus dem Untergrund, als sich durch Niederschläge auffüllen lässt. Die Folge sind sinkende Grundwasserspiegel für die halbe Weltbevölkerung – insbesondere in den drei großen Getreideländern China, Indien und USA.

Normalerweise erholen sich Grundwasserleiter wieder, doch einige der wichtigsten sind nicht erneuerbar: die »fossilen« Aquifere. Sie heißen so, weil sie sehr altes Wasser speichern, das nicht durch Niederschlag ergänzt wird. Wenn diese Reservoirs – zum Beispiel der riesige Ogallala-Aquifer unter den amerikanischen Prärien, der Saudi-Aquifer und der tiefe Grundwasserleiter unter der nordchinesischen Ebene – erst einmal erschöpft sind, laufen die Pumpen für immer leer. In Trockenregionen könnte dies überhaupt das Ende der Landwirtschaft bedeuten.

Der Grundwasserspiegel unter der nordchinesischen Tiefebene fällt derzeit rasch. Diese Region bringt mehr als die Hälfte von Chinas Weizen und ein Drittel von Chinas Mais hervor. Exzessives Pumpen hat dort die obere Grundwasserschicht so erschöpft, dass die Brunnenbauer nun den tief liegenden, nicht erneuerbaren Grundwasserleiter anzapfen müssen. Ein Bericht der Weltbank prophezeit »katastrophale Folgen für zukünftige Generationen«, falls Verbrauch und Versorgung nicht rasch wieder ins Gleichgewicht gebracht werden.

Wegen sinkender Grundwasserspiegel und versiegender Brunnen ist Chinas Weizenernte, die größte der Welt, seit ihrem Höchststand von 123 Millionen Tonnen im Jahr 1997 um acht Prozent zurückgegangen. Im selben Zeitraum nahm die chinesische Reisproduktion um vier Prozent ab. Die bevölkerungsreichste Nation der Erde muss vielleicht bald riesige Getreidemengen importieren.

Noch größeren Anlass zu Besorgnis gibt die Wasserknappheit in Indien. Dort reicht der Nahrungsmittelverbrauch kaum zum Überleben. Millionen Brunnen haben in fast allen indischen Bundesstaaten den Grundwasserspiegel abgesenkt. In der Zeitschrift »New Scientist« berichtet der britische Umweltjournalist Fred Pearce: »Die Hälfte von Indiens traditionellen, von Hand gegrabenen Brunnen und Millionen flacherer Röhrenbrunnen sind ausgetrocknet. Dies hat unter den Betroffenen eine Selbstmordwelle ausgelöst. In Bundesstaaten, in denen die Hälfte der Elektrizität zum Hochpumpen von Wasser aus Tiefen bis zu einem Kilometer verbraucht wird, erreichen Stromausfälle epidemisches Ausmaß.«

produktion ginge, würde das nur höchstens 18 Prozent des amerikanischen Treibstoffbedarfs decken. Was verbraucht wird, um den 95-Liter-Tank eines Geländewagens mit Ethanol zu füllen, könnte einen Menschen ein Jahr lang ernähren.

Wasserknappheit bedeutet Nahrungsmangel

Da Ernährungs- und Energiewirtschaft neuerdings verschmelzen, lenkt der Markt das Getreide in die Spritfabrikation um, sobald sein Wert als Nahrungsmittel unter den als Brennstoff sinkt. Diese doppelte Nachfrage führt zu einem heftigen Wettbewerb zwischen Menschen und Autos um das Getreideangebot – und zu einem riesigen politisch-moralischen Problem. Im verfehlten Bestreben, die Abhängigkeit von ausländischem Öl durch Biosprit zu verringern, gefährden die USA die Welternährung in bislang ungekanntem Ausmaß.

Wie steht es auf der Angebotsseite? Die drei erwähnten Umwelttrends – Wassermangel, Verlust der Ackerkrume und globale Erwärmung – machen es immer schwerer, das Getreideangebot der rasch wachsenden Nachfrage anzupassen. Am bedrohlichsten ist die welt-

GESCHEITERTE STAATEN BEDROHEN ALLE

Wenn eine Regierung ihren Bürgern weder Sicherheit noch andere Leistungen zu garantieren vermag, kann sich das entstehende soziale Chaos weit über die Landesgrenzen hinaus auswirken:

- Ausbreitung von Krankheiten
- Terrorismus und Piraterie
- Drogen- und Waffenhandel
- politischer Extremismus
- Gewalt und Flüchtlingsströme

Einer Weltbankstudie zufolge werden 15 Prozent der indischen Nahrungsmittel mittels Grundwasser erzeugt. Anders ausgedrückt verzehren 175 Millionen Inder Getreide, das mittels demnächst erschöpfter Brunnen produziert wird. Der fortgesetzte Schwund der Wasservorräte könnte verheerende Nahrungsengpässe und soziale Konflikte zur Folge haben.

Auch das Ausmaß des zweiten Trends – Verlust von fruchtbarem Boden – ist erschreckend. Auf etwa einem Drittel des Ackerlands erodiert der Boden schneller, als neuer entsteht. Die dünne Schicht lebenswichtiger Pflanzennährstoffe, die buchstäblich die Grundlage der Zivilisation bildet, braucht zu ihrer Entstehung geologische Zeiträume und ist doch in der Regel nur 15 Zentimeter dick. Ihr Schwund durch Wind- und Wassererosion verdammt frühere Kulturen zum Untergang.

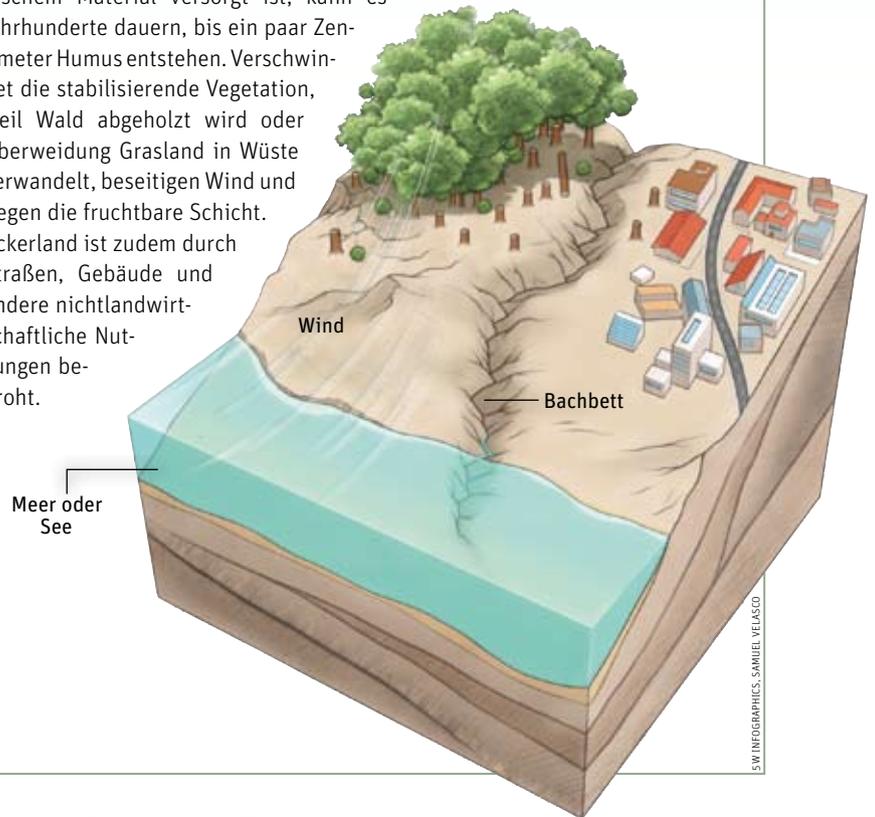
Weniger Boden, mehr Hunger

Im Jahr 2002 bewertete ein UN-Team die Ernährungssituation in Lesotho, einer kleinen, von zwei Millionen Menschen bewohnten Enklave in Südafrika. Das Fazit: »Der Landwirtschaft in Lesotho steht eine katastrophale Zukunft bevor; die Getreideproduktion nimmt ab und könnte vielerorts völlig zum Erliegen kommen, wenn nichts gegen Erosion, Verschlechterung und abnehmende Fruchtbarkeit der Böden unternommen wird.«

In der westlichen Hemisphäre deckte Haiti – einer der ersten als gescheitert eingestuft Staaten – vor 40 Jahren seinen Getreidebedarf weitgehend selbst. Doch seither hat es fast all seine Wälder und einen Großteil des Ackerbodens eingebüßt; mittlerweile muss Haiti mehr als die Hälfte seines Getreides importieren.

URBARES LAND VERSCHWINDET

Mutterboden, ein lebenswichtiger Faktor für die Ernährung der Welt, ist im Wesentlichen eine nichterneuerbare Ressource: Selbst in einem gesunden Ökosystem, das ausreichend mit Feuchtigkeit sowie organischem und anorganischem Material versorgt ist, kann es Jahrhunderte dauern, bis ein paar Zentimeter Humus entstehen. Verschwindet die stabilisierende Vegetation, weil Wald abgeholzt wird oder Überweidung Grasland in Wüste verwandelt, beseitigen Wind und Regen die fruchtbare Schicht. Ackerland ist zudem durch Straßen, Gebäude und andere nichtlandwirtschaftliche Nutzungen bedroht.



Die dritte Bedrohung der Ernährungssicherheit – global steigende Oberflächentemperatur – kann die Ernteerträge überall beeinträchtigen. In vielen Ländern werden Feldfrüchte bei für sie optimaler Temperatur angebaut; wenn es während der Wachstumsphase nur

Ideen für einen smarten Planeten

Stromnetze, die Strom sparen.

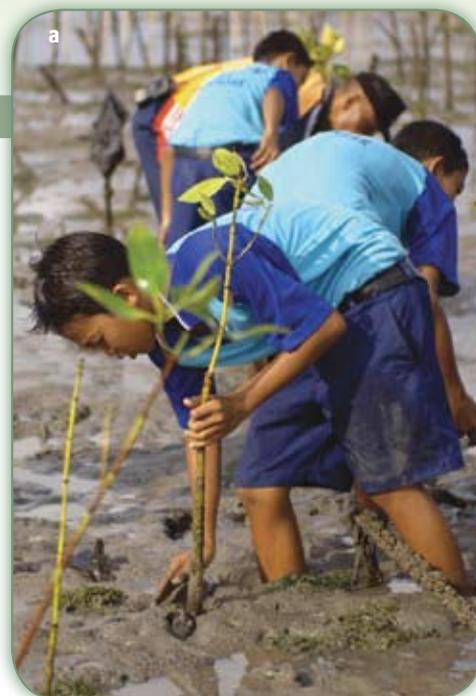
Ein beträchtlicher Teil des Stroms, den wir erzeugen, geht auf dem Weg zum Verbraucher verloren – ein Verlust, den wir uns nicht mehr leisten können. Deshalb müssen wir unsere Stromnetze intelligenter gestalten. Zum Beispiel, indem wir Einspeisung, Netzauslastung und Verbrauch mit einem integrierten System in Echtzeit erfassen und steuern. Das minimiert Verluste, erleichtert die Einbindung neuer, nachhaltiger Energiequellen und hilft den Kunden, ihren Verbrauch bewusster zu steuern. Es ist, mit einem Wort, smart. Welchen Beitrag IBM dazu leistet, erfahren Sie unter ibm.com/think/de/energy



WAS IST ZU TUN?

Plan B ist ein Leitfaden des Autors zur Korrektur der Faktoren, die unsere Zivilisation bedrohen. Der Plan besteht aus vier Komponenten: Senkung des CO₂-Ausstoßes um 80 Prozent gegenüber dem Niveau von 2006 bis zum Jahr 2020; Stabilisierung der Weltbevölkerung bei acht Milliarden bis zum Jahr 2040; Beseitigung der Armut; Restaurierung der Wälder, Böden und Grundwasserleiter auf unserer Erde. Einige der wichtigsten Maßnahmen, die zur Erreichung dieser Ziele nötig sind, werden hier illustriert.

- a) Aufforstung, um Überschwemmungen, Erosion, CO₂-Anstieg und Entwaldung aufzuhalten
- b) erneuerbare an Stelle fossiler Energien zur Erzeugung von Strom und Wärme



GETTY IMAGES / SONNY TUMBELAKA

geringfügig wärmer wird, schrumpft die Ernte. Eine von der U.S. National Academy of Sciences veröffentlichte Studie hat als Faustregel bestätigt: Für jeden Anstieg um ein Grad Celsius fällt der Ertrag von Weizen, Reis und Mais um zehn Prozent.

Wettlauf um Nahrung

In der Vergangenheit reagierte man auf den steigenden Nahrungsmittelbedarf mit wissenschaftlich-technischen Mitteln. Das bekannteste Beispiel ist die »Grüne Revolution« der 1960er und 1970er Jahre mit dem innovativen Einsatz von Dünger, Bewässerung und ertragreicheren Weizen- und Reissorten. Doch nun sind die Fortschritte der Agrartechnik bereits vielerorts Standard, und die Steigerung

der Bodenproduktivität verlangsamt sich allmählich. Zwischen 1950 und 1990 erhöhten sich die Getreideerträge pro Hektar jährlich noch um mehr als zwei Prozent und übertrafen damit das Bevölkerungswachstum. Seither sind sie auf kaum mehr als ein Prozent zurückgegangen. In manchen Ländern stagnieren sie schon; dies gilt etwa für die Reisernten in Japan und China.

Manche Fachleute sehen den Ausweg in genetisch modifizierten Nutzpflanzen. Doch leider hat bisher keine genmanipulierte Pflanze den Ertrag so drastisch gesteigert wie die Grüne Revolution mit ihrer Verdoppelung oder Verdreifachung der Weizen- und Reisernten. Das wird wohl auch so bleiben, denn durch herkömmliche Züchtungen wurden die Erträge schon weit gehend optimiert.

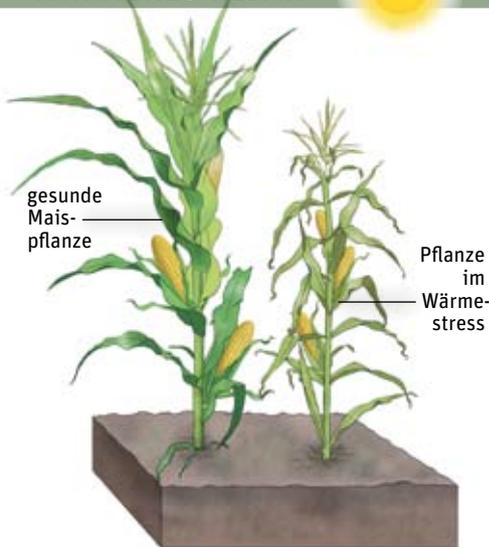
Mit dem weltweiten Schwinden der Ernährungssicherheit kommt eine gefährliche Knappheitspolitik ins Spiel: Einzelne Länder handeln aus kurzfristigem Egoismus und verschlimmern die Not von vielen. Dieser Trend setzte 2007 ein, als führende Weizenexporteure wie Russland und Argentinien ihre Ausfuhren beschränkten oder ganz aussetzten, um das heimische Angebot zu erhöhen und dadurch die Inlandspreise zu senken. Vietnam, nach Thailand der größte Reisexporteur der Welt, stoppte aus dem gleichen Grund für mehrere Monate seine Exporte. Solche Maßnahmen beruhigen vielleicht die Bewohner der Exportnationen, doch in den Importländern rufen sie Panik hervor, denn man ist auf den entsprechend verknappten Weltgetreidemarkt angewiesen.

Wegen solcher Restriktionen streben Importländer langfristige bilaterale Handelsabkommen an, um künftige Lieferungen festzu-

WÄRMERES KLIMA



SENKT ERTRÄGE



gesunde
Mais-
pflanze

Pflanze
im
Wärme-
stress

5 W INFOGRAPHICS, SAMUEL VELASCO

Die heutige Landwirtschaft ist durch ein Klimasystem geprägt, das sich in der 11000-jährigen Geschichte des Ackerbaus kaum geändert hat. Da die meisten Nutzpflanzen unter diesen stabilen Bedingungen auf maximalen Ertrag gezüchtet wurden, schrumpfen durch globale Erwärmung die Ernten. Experten schätzen, dass jedes Grad Temperaturerhöhung zehn Prozent weniger Weizen, Reis und Mais pro Hektar bedeutet.



GETTY IMAGES / DIGITAL VISION



c) elementare Gesundheitsversorgung für alle, Schwangerschafts- und Geburtshilfe sowie Familienplanung
d) Abwasser-Recycling, wie in dieser Kläranlage in Orange County (Kalifornien)



GETTY IMAGES / MARY KNOX MERRILL

WINKELZÜGE DER ERNÄHRUNGSPOLITIK

Um ihre künftige Versorgung zu sichern, handeln manche Staaten in aller Stille mit Getreide produzierenden Ländern das Recht aus, dort Landwirtschaft zu treiben. Diese Praxis verknüpft das Angebot für andere Importländer und treibt die Preise hoch. Einige Beispiele:

- **China** möchte in Australien, Brasilien, Burma (Myanmar), Russland und Uganda Land pachten.
- **Saudi-Arabien** sucht Ackerland in Ägypten, Pakistan, Südafrika, Sudan, Thailand, der Türkei und der Ukraine.
- **Indische Landwirtschaftsfirmen** streben Anbauflächen in Uruguay und Paraguay an.
- **Libyen** pachtet 1000 Quadratkilometer Land in der Ukraine im Tausch gegen Zugang zu libyschen Ölfeldern.
- **Südkorea** bemüht sich um den Kauf von Land in Madagaskar, Russland und Sudan.

schreiben. Da die Philippinen nicht mehr damit rechnen können, auf dem Weltmarkt Reis zu bekommen, schlossen sie kürzlich einen Dreijahresvertrag über 1,5 Millionen Tonnen pro Jahr mit Vietnam ab. Aus Zukunftsangst verfallen die Importländer neuerdings sogar darauf, Ackerland im Ausland zu kaufen oder zu pachten (siehe Randspalte rechts).

Trotz solcher Notlösungen unterminieren in vielen Ländern hochschnellende Preise und wachsender Hunger das soziale Gefüge. In mehreren Provinzen Thailands müssen die Dorfbewohner ihre Felder nachts mit geladener Flinte vor plündernden »Reisdieben« schützen. In Pakistan eskortiert ein bewaffneter Soldat jeden Getreidetransport. Im ersten Halbjahr 2008 wurden im Sudan 83 mit

Getreide beladene Lastwagen gekapert, bevor sie die Hilfsbedürftigen in Darfur erreichten.

Gegen die Folgen knapperer Angebote ist kein Land immun – nicht einmal die USA, die Kornkammer der Welt. Wenn China wie jüngst große Mengen Sojabohnen auf dem Weltmarkt nachfragt, muss es sie von den USA kaufen. Vielleicht werden die amerikanischen Verbraucher demnächst um die heimische Getreideernte mit 1,3 Milliarden chinesischen Konsumenten, deren Einkommen schnell steigt, konkurrieren müssen – eine alpträumhafte Vorstellung. Unter solchen Umständen könnten die Vereinigten Staaten versucht sein, den Export zu beschränken, wie sie das beispielsweise in den 1970er Jahren bei Getreide und Soja taten, als die Inlandspreise explodierten. Doch mit

Ideen für einen smarten Planeten

Supercomputer arbeiten für jedermann.

Muss wirklich jeder, der Rechenleistung benötigt, den Aufwand für ein eigenes Rechenzentrum betreiben: für Stromversorgung, Kühlung, Sicherheit – und für Reservekapazitäten, die dann doch die meiste Zeit brachliegen? Es ist an der Zeit, den Umgang mit dieser Ressource einfacher und intelligenter zu gestalten. Mit innovativen Technologien wie Cloud Computing kann man Rechenleistung heute zuverlässig und nach Bedarf punktgenau zur Verfügung stellen, wo, wann und wie sie gebraucht wird. Mit einem Wort, smart. Welchen Beitrag IBM dazu leistet, erfahren Sie unter ibm.com/think/de/cloud





Lester R. Brown ist laut »Washington Post« einer der einflussreichsten Denker der Welt. Der in Kalkutta erscheinende »Telegraph« nannte ihn den »Guru der Umweltbewegung«. Brown gründete 1974 das Worldwatch Institute und 2001 das Earth Policy Institute, das er heute leitet. Er ist Autor und Koautor von 50 Büchern. Brown erhielt zahlreiche Preise und Ehrungen, unter anderem 24 Ehrendoktorate und ein MacArthur-Forschungsstipendium.

Brown, L. R.: Plan B 3.0: So retten wir die Welt. Homilius, Berlin 2008.

Brown, L. R.: Outgrowing the Earth. The Food Security Challenge in an Age of Falling Water Tables and Rising Temperatures. W. W. Norton, Earth Policy Institute 2004.

Climate Change 2007. Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press 2007.

Diamond, J.: Kollaps. Warum Gesellschaften überleben oder untergehen. S. Fischer, Frankfurt am Main 2005.

Radermacher, F. J., Beyers, B.: Welt mit Zukunft. Überleben im 21. Jahrhundert. Murmann, Hamburg 2007.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/1005454.

China geht das nicht. Chinesische Investoren verfügen derzeit über gut eine Billion Dollar; sie kaufen fleißig die Wertpapiere, mit denen das US-Finanzministerium sein Haushaltsdefizit finanziert. Ob es den amerikanischen Verbrauchern passt oder nicht: Sie werden ihr Getreide mit chinesischen Kunden teilen müssen – egal wie hoch die Preise klettern.

Der einzige Ausweg: Plan B

Da die gegenwärtige Nahrungsmittelknappheit trendbedingt ist, müssen die dafür ursächlichen Umweltrends umgekehrt werden. Das erfordert eine radikale Abkehr vom bloßen Weitermachen wie bisher – vom »Plan A«, wie wir vom Earth Policy Institute sagen. Um unsere Zivilisation zu retten, müssen wir auf einen »Plan B« umschalten.

Nach Umfang und Dringlichkeit kommt Plan B der Mobilmachung der Vereinigten Staaten für den Zweiten Weltkrieg gleich. Er umfasst vier Teilziele: drastische Senkung der Kohlendioxidemissionen um 80 Prozent gegenüber dem Niveau von 2006 bis zum Jahr 2020; Stabilisierung der Weltbevölkerung bei acht Milliarden bis 2040; Beseitigung der Armut; Rekultivierung von Wäldern, Böden und Grundwasserleitern.

Der CO₂-Ausstoß kann durch systematisch gesteigerte Energieeffizienz und durch massive Investitionen in erneuerbare Energien gesenkt werden. Zudem müssen wir weltweit das Abholzen der Wälder verbieten, wie es mehrere Länder bereits getan haben, und Milliarden Bäume pflanzen, um atmosphärisches Kohlendioxid zu binden. Der Übergang von fossilen Brennstoffen zu erneuerbaren Energieträgern lässt sich durch eine CO₂-Steuer forcieren, die durch Minderung der Einkommensteuer kompensiert wird.

Stabilisierung der Bevölkerungszahl und Beseitigung der Armut gehen Hand in Hand. Letzteres fördert den Übergang zu kleineren Familien, und umgekehrt. Entscheidend ist Grundschulbildung für alle Kinder, Mädchen wie Jungen. Zudem gilt es, wenigstens einfachste Gesundheitsversorgung auf Dorfebene zu garantieren, damit die Menschen darauf vertrauen, dass ihre Kinder das Erwachsenenalter erreichen. Alle Frauen brauchen Zugang zu Schwangerschaftsbetreuung, Geburtshilfe und Familienplanung.

Der vierte Baustein, das Wiederherstellen der natürlichen Ökosysteme und Ressourcen, umfasst eine weltweite Initiative gegen sinkende Grundwasserspiegel durch Steigern der Wasserproduktivität – durch maximales Nutzen jedes einzelnen Wassertropfens. Es gilt, auf effizientere Bewässerungssysteme umzustellen sowie auf Nutzpflanzen, die weniger

Wasser brauchen. In einigen Ländern bedeutet das mehr Weizen und weniger Reis. Zudem müssen Betriebe und Kommunen mehr als bisher ihr Wasser wiederaufbereiten.

Zugleich brauchen wir eine weltweite Initiative zur Bodenerhaltung. Dazu gehört Terrassieren des Ackerlands, Pflanzen von Bäumen als Schutzgürtel gegen Winderosion sowie eine möglichst schonende Bodenbearbeitung, bei der die Ackerkrume nur oberflächlich gelockert wird und die Pflanzenreste zur Humusbildung auf dem Feld bleiben.

Unsere vier aufeinander bezogenen Ziele sind nicht neu. Separat werden sie seit Jahren diskutiert. Es gibt ganze Institutionen, die sich einigen davon widmen, etwa die Weltbank zur Bekämpfung der Armut. Und in einigen Teilen der Welt wurden zumindest bei einem Ziel deutliche Fortschritte erzielt: Mit der Verbreitung der Familienplanung stabilisiert sich die Bevölkerungszahl.

Viele Entwicklungsexperten lobten die vier Ziele von Plan B, solange sie nicht zu viel kosten. Andere sahen darin humanitäre Ziele – politisch korrekt und moralisch angemessen. Nun zeichnet sich eine dritte, weitaus stärkere Begründung ab: Das Erreichen dieser Ziele ist nötig, um den Kollaps unserer Zivilisation zu verhindern. Die von uns dafür veranschlagten Kosten betragen weniger als 150 Milliarden Euro jährlich – ein Sechstel der derzeitigen Militärausgaben weltweit. Im Endeffekt ist Plan B der neue Sicherheitssatz.

Die Zeit wird knapp

Plan B muss ausgeführt werden, und zwar rasch. Die Welt rast auf politische und natürliche Kippunkte zu. Können wir die Kohlekraftwerke rechtzeitig abschalten, um zu verhindern, dass die Eisdecke Grönlands schmilzt und unsere Küsten überflutet? Können wir die CO₂-Emissionen schnell genug reduzieren, um die asiatischen Gletscher zu retten? Ihr Schmelzwasser speist in der Trockenzeit die Ströme Indiens und Chinas – und versorgt Hunderte Millionen Menschen. Können wir das Bevölkerungswachstum bremsen, bevor Länder wie Indien, Pakistan und Jemen durch den Mangel an Wasser, auf das sie zur Bewässerung ihrer Felder angewiesen sind, zusammenbrechen?

Man kann den Ernst unserer Lage gar nicht übertreiben. Jeder Tag zählt. Die Natur setzt die Termine, die Natur misst die Zeit. Doch wir Menschen sehen nicht, wie viel Uhr es ist.

Die Geisteshaltung, die uns in diese Klemme gebracht hat, wird uns keinen Ausweg weisen. Wir müssen unbedingt umdenken und anders handeln, um zu überleben. ◀

BIG BROTHER

mit Sehschwäche

Ob es den Datenkraken wirklich gibt, der die Datenspuren aller Menschen verfolgt und sie damit bis ins Letzte ausspioniert, bleibt das Geheimnis der Geheimdienste. Aber wenn er existiert, hat er die größten Schwierigkeiten, seine Dossiers in Ordnung zu halten.

Von Simson L. Garfinkel

Vor einigen Jahren kaufte ich mir auf dem Weg zum Flughafen bei Starbucks einen Latte macchiato, parkte meinen Wagen und bestieg ein Flugzeug nach Großbritannien. Acht Stunden später landete ich in Heathrow, kaufte mir eine Prepaidkarte für mein Handy und wollte gerade eine U-Bahn-Fahrkarte nach London bezahlen, als meine Kreditkarte mich im Stich ließ und jede weitere Mitarbeit verweigerte.

Erst nach meiner Rückkehr in die USA klärte sich das merkwürdige Versagen auf. Offenbar hatten die beiden Einkäufe in kurzer Folge an weit entfernten Stellen – Kaffee hier, Handykarte dort – im Computer meiner Kreditkartengesellschaft irgendein Programm zur Verhinderung von Betrug aktiviert. Dieses hatte dann versucht, mich anzurufen, nur meinen Anruflinienanrufer erreicht und daraufhin meine Kreditkarte gesperrt.

Geärgert hat mich weniger der kriminalistische Übereifer des Computers als vielmehr seine Dämlichkeit. Ihm hätte doch klar sein müssen, wer da in England meine Karte benutzte, nämlich ich selbst. Er konnte doch wissen, wann und wohin ich geflogen war; schließlich hatte ich mein Flugticket mit derselben Karte bezahlt. Sollten alle diese Daten nicht miteinander verknüpft sein?

Die meisten Leute unterstellen vermutlich, sie seien es. Hollywoodfilme wie »Staatsfeind Nummer Eins« oder die »Jason-Bourne«-Trilogie haben in uns die Vorstellung gefestigt, geheime Organisationen hätten direkten Zugang zu allen Datenbanken, in denen wir registriert sind, und könnten mit wenigen Tastendrücken unser Leben in allen Einzelheiten nachverfolgen.

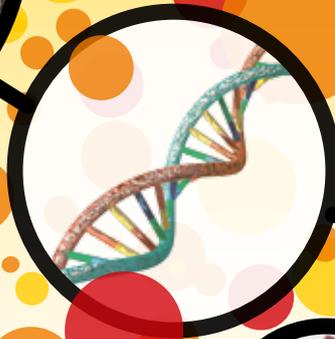
Mit der von Horst Herold, dem damaligen Präsidenten des deutschen Bundeskriminalamts, vorangetriebenen »Rasterfahndung« auf der Suche nach den Terroristen der RAF in den 1970er Jahren geriet das Thema erstmals in die öffentliche Diskussion. Seitdem tobt der Streit zwischen den Datensammlern und den Datenschützern. Erstere sehen in der »Datenfusion«, dem Sammeln und Zusammenfassen von Daten der unterschiedlichsten Herkunft, nichts weiter als ein Mittel, um die Informationen, die man ohnehin hat, besser zu nutzen. In den Augen der Letzteren bedroht Datenfusion die Freiheit der Bürger, denn sie verwendet die Informationen zu anderen Zwecken als denen, die ihre Erfassung rechtfertigten. Genau das hat das deutsche Bundesverfassungsgericht mit seinem aus Anlass der Volkszählung 1983 formulierten Recht auf informationelle Selbstbestimmung für unzulässig erklärt.

Ähnlich kontrovers verlief die Diskussion in den USA. Zugleich mit einem Datenschutzgesetz (dem *Privacy Act*) verfügte der amerikanische Kongress 1974 die Schaffung einer Bundesbehörde, des *Federal Parent Locator Service*, der durch Datenfusion säumige Unterhaltsschuldner mitsamt deren Arbeitgebern – zur Gehaltspfändung – ausfindig macht und ihnen eine breite Palette öffentlicher Leistungen, insbesondere einen Reisepass, vorenthält.

Der Name »Datenfusion« erscheint in der Fachliteratur erstmals 1984 in zwei Artikeln aus der Forschungsabteilung des Waffen- und Raumflugzeugherstellers Lockheed Martin. Dabei sollten Informationen von Sensoren auf einem Schlachtfeld mit denen aus Datenbanken und anderen Quellen in Echtzeit kombiniert und für menschliche Analysten aufbereitet werden. Datenfusion wird auch

In Kürze

- ▶ **Datenfusion**, die Zusammenführung persönlicher Daten aus verschiedenen Quellen, ist allen Verfechtern des Datenschutzes ein Dorn im Auge. Allem Anschein nach wird sie bisher nur in sehr begrenzten Bereichen praktiziert, in den USA in Spielkasinos und bei der Vollstreckung von Unterhaltsansprüchen.
- ▶ Datenfusion ist schwer, weil Datenbanken von Fehlern durchsetzt sind und Koinzidenzen ohne jede Bedeutung häufig vorkommen. Mit **neuen Algorithmen** gelingt es, einige dieser Probleme zu überwinden; ob aber der gesellschaftliche Nutzen die Beschädigung der Privatsphäre aufwiegen kann, bleibt unklar.



Eine immense Fülle an Daten aus verschiedenen Quellen kann durch Datenfusion zu einem einzigen Profil zusammengeführt werden.

betrieben in der Genomforschung, der Marktforschung und vor allem im Kampf gegen den Terror: Das Department for Homeland Security, die nach dem Terroranschlag vom 11. September geschaffene zentrale Sicherheitsbehörde, hat für mehr als 250 Millionen Dollar 58 Zentren zur Datenfusion aufgebaut. Die deutsche Regierung begründet die zurzeit heftig diskutierte Vorratsdatenspeicherung ebenfalls mit der Terrorabwehr.

»Der Schlüssel für das Aufspüren von Terroristen ist die Suche nach Aktivitätsmustern, die auf terroristische Verschwörungen hinweisen, ausgehend von aktuellen Beispielen und früheren terroristischen Angriffen«, schrieben 2006 Konteradmiral John Poindexter und Robert L. Popp von der Forschungsagentur Darpa des amerikanischen Verteidigungsministeriums. Sie argumentieren, sowohl der Bombenanschlag auf das World Trade Center von 1993 als auch der in Oklahoma City 1995 wären zu verhindern gewesen, hätte die Regierung kommerzielle Datenbanken danach durchsucht, wo und wann Personen, die keine Landwirtschaft betreiben, große Mengen von Düngemitteln gekauft hätten. Nur hätte dafür die Regierung in beispiellosem Ausmaß auf die Computer der Düngemittelhändler ebenso wie auf die Verzeichnisse der Landwirte und ihrer Beschäftigten zugreifen müs-

sen. Jeder einzelne Kauf – und damit jede Person – im Land wären ohne einen konkreten Verdacht zu überprüfen gewesen. Unter anderem deshalb stoppte der Kongress das Forschungsprogramm von Poindexter und Popp, das *Total Information Awareness Project*, im Jahr 2003.

Was nicht bedeutet, dass die amerikanische Regierung keine Datenfusion mehr betriebe. Die offizielle Mauer der Geheimhaltung ist nicht geeignet, die Besorgnis der Freiheitsverfechter zu zerstreuen. Die Behörden wahren weitgehend Stillschweigen über die Einzelheiten ihrer Aktivitäten, um den Bösewichten keine Hinweise zu geben, wie man durch die Maschen des Schlepptetzes schlüpfen kann.

Datenfusion zur Terrorbekämpfung?

In der ganzen Diskussion gehen alle Beteiligten wie selbstverständlich davon aus, dass Systeme zur Datenfusion tatsächlich funktionieren. Die Wirklichkeit ist davon weit entfernt.

Eines der technischen Hindernisse ist die Qualität der Daten. Viele der Informationen in Datenbanken wurden ursprünglich für rein statistische Zwecke erfasst und taugen daher nicht für automatisierte Urteile mit möglicherweise strafrechtlichen Konsequenzen.

Ein Programm zur Aufdeckung von Sozialbetrug glich die Gehaltslisten des amerikani-

FUSION UND KONFUSION

Um einen Eindruck davon zu bekommen, wie viel Information über eine einzelne Person im Netz auffindbar ist, bestellte ein Mitarbeiter des »Scientific American« bei einer Internetfirma, die Personendaten sammelt, für 80 Dollar einen Bericht über sich selbst, einschließlich Einträgen über Straftaten, Grundschulden und Insolvenzverfahren. Darin fanden sich zahlreiche Schreibfehler und Verwechslungen mit Namensvettern, die ganz woanders leben. Bei vielen von ihnen war eine Grundschuld eingetragen, bei keinem allerdings eine Vorstrafe – zum Glück. In dem Bericht fand sich kein Anzeichen für Identitätsraub: Niemand hatte sich fälschlich für den Mitarbeiter ausgegeben. Vielen anderen Menschen geht es nicht so gut.

HINTERGRUND MIT KREISEN: MELISSA THOMAS; EINZELBILDER: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

SPIELE DER ERWACHSENEN

Die Casinos in Las Vegas haben die Datenfusion vorangetrieben, weil sie auf vielfältige Weise abgezockt werden. Das Bild zeigt verschiedene Beispiele, die auf wahren Geschichten beruhen.

Viele Automatenspieler gewinnen weniger Punkte, als für den kleinsten Gewinn erforderlich ist. Ein Angestellter und seine Zimmergenossen sammeln diese nicht eingelösten Punkte und lassen sich den Gewinn auszahlen. Die Suche in verschiedenen Datenbanken zeigt, dass die Adresse des Gewinners mit der des Angestellten übereinstimmt. Der Betrug fliegt auf.

Ein MIT-Student und Experte im Kartenzählen versucht, sich mit leicht verändertem Namen und Geburtsdatum ins Kasino zu schleichen. Die Datenbank des Kasinos hält ihn auf.

Überwachungskameras spüren beim Roulette einen Betrüger auf. Beim Abgleich seiner Polizeiakte mit der Datenbank der Angestellten entdeckt das Kasino, dass der Betrüger dieselbe Telefonnummer wie der Croupier hat.

Bei einer Lotterie zieht ein Angestellter ein Los und vergibt den Preis. Bei der Prüfung der Daten der Gewinnerin fällt auf, dass sie dieselbe Adresse hat wie der ziehende Angestellte: Sie sind Geschwister.

VERBORGENE DATEN

Text- und andere Computerdateien enthalten typischerweise »Metadaten« wie das Entstehungsdatum, den Namen des Verfassers und den Computertyp, manchmal auch noch die vorige Version des Dokuments einschließlich der abfälligen Bemerkung, die der Verfasser in der Endversion vorsichtshalber gestrichen hat – eine Fundgrube für Ermittler und Journalisten.

Nur sind diese Metadaten manchmal falsch. Zwei frei erhältliche Analyseprogramme für Metadaten, angewandt auf frühere Fassungen dieses Artikels, behaupteten, der Autor habe OpenOffice auf einem Rechner mit Windows XP verwendet. In Wirklichkeit, so Garfinkel, war es Microsoft Office 2008 auf einem Mac. Nebenbei lieferte die Analyse die Auskunft, dass Garfinkel wirklich hart an dem Artikel gearbeitet hat. Eine vorläufige Fassung trug die Versionsnummer 139.

Die Redaktion von »Scientific American«

schen Gesundheitsministeriums (*Department of Health and Human Services*) mit den Listen der Sozialhilfeempfänger in Washington und Umgebung ab. Es fand ungefähr 1000 Übereinstimmungen; nach eingehender Überprüfung erwiesen sich jedoch drei Viertel der Betroffenen als unschuldig. Am Ende standen die wenigen Erfolge in keinem Verhältnis zu den Kosten der Datensammlung, der Ausbildung des Personals und der Eliminierung falscher Treffer. Roger Clarke von der Australian National University in Canberra hat das 1994 in einem Artikel ausgeführt.

Viele Leute meinen, ein Programm zur Datenfusion, das einen großen terroristischen Anschlag im Planungsstadium aufdeckt und verhindert, sei jeden Preis wert. Leider sieht es so aus, als sei ein solches Programm überhaupt um keinen Preis zu bekommen. Poindexter, ein ehemaliger Marineoffizier, verglich die zu lösende Aufgabe mit der Suche nach einem feindlichen U-Boot im Meer. Das ist eine gewaltige Unterschätzung. Die Weltmeere sind zwar riesig, aber nicht unermesslich: Jeder Punkt in ihnen lässt sich eindeutig durch seine Tiefe unter dem Meeresspiegel, geografische Länge und Breite kennzeichnen. Dagegen haben Datenozeane keine Koordinaten. Obendrein verdoppelt sich ihr Volumen, im Gegensatz zu dem der echten Weltmeere, alle paar Jahre. Sie sind zum größten Teil nicht kartiert; die Daten verteilen sich über Millionen einzelner Computer, viele davon sind verborgen oder den Behörden nicht bekannt.

Datenfusion ist schwierig, weil wir in Daten aus zahllosen Quellen ertrinken, jede davon mit ihrem eigenen Maß an Reichhaltigkeit und Korrektheit. Das Problem besteht nicht darin, Daten zu bekommen, sondern aus ihnen klug zu werden.

Ein Blick auf den Speicher eines beliebigen Computers illustriert das Problem. Zwischen 1995 und 2005 habe ich mir mehr als 1000 gebrauchte Festplatten über eBay, in kleinen Computerläden, bei Tauschaktionen und aus dem Sperrmüll besorgt. Im Januar 2003 haben Abhi Shelat, heute Computerwissenschaftler an der University of Virginia, und ich einen Artikel über die Ergebnisse unserer Untersuchung veröffentlicht.

Fatale Datenreste

Etwa ein Drittel der Festplatten war nicht mehr verwendbar, ein weiteres Drittel war gründlich gelöscht worden. Das letzte Drittel aber erwies sich als reichhaltige Fundgrube an persönlichen Daten: E-Mail-Nachrichten, Aufzeichnungen, Kontoauszüge. Eine der Festplatten hatte in einem Geldautomaten gesteckt und enthielt Tausende von Kreditkartennummern, eine andere in der Kasse eines Supermarkts; alle bargeldlosen Zahlungen ihres letzten Arbeitstags waren noch auffindbar. Beide waren vor dem Verkauf gelöscht worden, aber eben nicht so gründlich, dass ich sie nicht mit polizeüblichen – und mittlerweile allgemein verfügbaren – Mitteln hätte lesbar machen können.

KEVIN BROWN, MONOLITHIC STUDIOS



Manchmal wissen die Besitzer gar nicht, was sie für digitale Krümel auf ihrer Festplatte lassen. Der so genannte BTK-Mörder Dennis Rader beging zwischen 1974 und 1991 zehn Morde in Wichita (Kansas) und Umgebung, ohne gefasst zu werden. Nach jahrelangem Schweigen schickte er im März 2004 einen Brief an die Tageszeitung »The Wichita Eagle«, in dem er ausführlich über seine früheren Verbrechen berichtete, und eine Diskette mit einer Microsoft-Word-Datei an eine lokale Fernsehstation. Diese Datei enthielt aber, wie jede Word-Datei, Hilfsinformationen wie zum Beispiel Datum und Uhrzeit der letzten Änderung und in diesem Fall auch den Namen, unter dem sich der Benutzer am Computer angemeldet hatte. Über diese Metadaten ließ sich nicht nur eine Verbindung zum Computer in einer Kirche am Ort herstellen, sondern auch erschließen, dass die Person, die ihn benutzt hatte, der Vorsitzende des Kirchengemeinderats war. Das war der Mörder.

Wie findet man das Wichtige?

Hat man eine große Menge Daten, muss man zunächst das Wichtige vom Belanglosen trennen – und dazu benötigt man Information, die nicht in den Daten selbst enthalten ist. Ein Beispiel: In vielen der Festplatten, die ich ab 1995 analysierte, fanden sich Texte aus einer elektronischen Zeitung, den »Island Hopper News«. Das erschien mir zunächst sehr seltsam. Dann stellte sich heraus, dass es sich um eine Demodatei handelte, die Microsoft damals zusammen mit dem Programm Visual Studio 6.0 verbreitete. Hätte ich das nicht bemerkt, hätte ich leicht falsche Schlüsse über die früheren Besitzer der Festplatten ziehen können.

Es gibt nur einen Weg, Fehler dieser Art zuverlässig zu vermeiden. Man gewinne aus einem repräsentativen Querschnitt aller digitalen Dokumente der Welt eine Liste der häufig vorkommenden; darunter sind insbesondere gängige Softwarepakete und deren Zubehördateien. Wenn zwei Computer eine dieser Dateien gemeinsam haben, darf das als bedeutungslos gelten. Um eine solche Liste anzulegen, muss man nicht etwa Millionen von Dateien Bit für Bit vergleichen. Spezielle Programme errechnen zu jeder Datei einen so genannten »Hash« oder auch »Fingerabdruck«, eine kurze Folge von Bits, welche die jeweilige Datei in der Praxis eindeutig kennzeichnet. Zwei der verbreitetsten Hash-Algorithmen sind MD5 und SHA-1; sie liefern Fingerabdrücke der Länge 128 beziehungsweise 160 Bit. Es genügt dann, an Stelle der Dateien selbst deren Fingerabdrücke zu vergleichen.

Gefördert mit Mitteln des amerikanischen Justizministeriums erwirbt die National Soft-

WIE DIE DATENFUSION FUNKTIONIERT

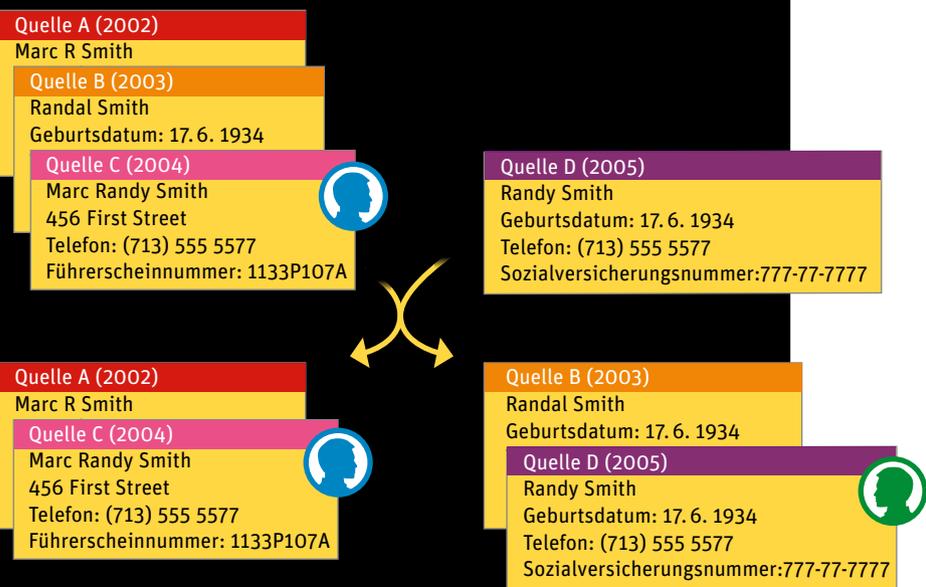
Ein ursprünglich für Casinos entwickelter Algorithmus zur Datenfusion kann auch mit unvollständiger und mehrdeutiger Information umgehen.



Die Datei mit den Führerscheinnummern (A) und eine andere Datenbank (B) enthalten verschiedene Informationen; das System nimmt also vorerst an, es handele sich um verschiedene Personen.



Eine dritte Quelle (C) enthält Daten, die in den beiden anderen auftauchen: die Führerscheinnummer in der einen, die Telefonnummer in der anderen. Das System ordnet sie jetzt ein und derselben Person zu.



Eine vierte Quelle (D) enthält nun ein Geburtsdatum, das mit dem in Quelle B übereinstimmt, aber eine von Quelle A abweichende Sozialversicherungsnummer. Das weist darauf hin, dass es sich tatsächlich um zwei Personen handelt, die denselben Nachnamen und dieselbe Telefonnummer haben. Daraus schließt das System, dass es sich um Vater und Sohn handelt.

IDENTITÄTSRAUB

(MISSBRÄUCLICHE NUTZUNG
PERSONENBEZOGENER DATEN)

Viele Mitarbeiter des »Scientific American« hatten schon unter milden Formen von Identitätsraub zu leiden. Das war zwar beunruhigend; aber die Folgen hielten sich in Grenzen, weil die Datenbanken weit gehend voneinander isoliert sind. Mit zunehmender Datenfusion könnte die Verfälschung einer einzigen Information die gesamte digitale Identität einer Person infizieren.

➤ Kürzlich sperrte die Bank einer Mitarbeiterin die Kreditkarte, nachdem ungewöhnliche Transaktionen festgestellt worden waren, darunter einige, welche die Kundin selbst nicht vorgenommen hatte. Wer die Kreditkartennummer missbraucht hatte, bleibt ein Rätsel.

➤ Eine andere Kollegin erhielt zu ihrer Verwunderung von ihrer Anlageberaterfirma die Aufforderung, die Änderung ihrer Adresse zu bestätigen. Die neue Adresse war aber gar nicht ihre. Der Anlageberater, noch neu in der Firma, spielte den Unschuldigen; die Kundin rief daraufhin die Polizei. Es stellte sich heraus, dass der Berater nach ungenutzten Konten suchte, die er dann von einem Kollegen abräumen ließ.

➤ Ein dritter Mitarbeiter bekam plötzlich Mahnungen von seiner Handyfirma. Offenbar hatte jemand anders unter seinem Namen einen Vertrag abgeschlossen. Es dauerte ein ganzes Jahr, das Problem zu lösen und die alte Kreditwürdigkeitseinstufung wiederzubekommen.

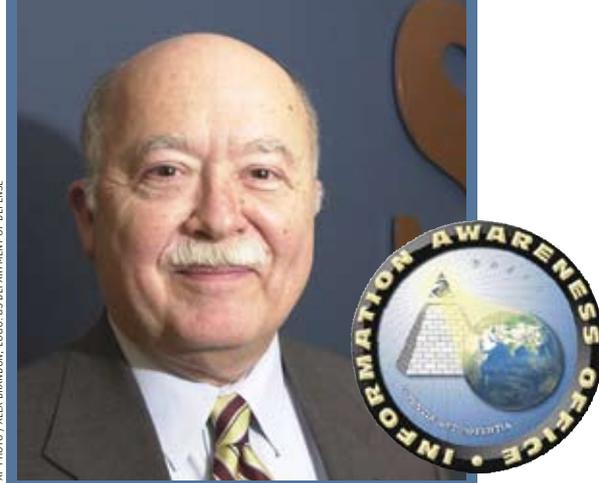
ware Reference Library am Normeninstitut NIST (National Institute of Standards and Technology) Software von Hunderten von Firmen und erzeugt für jede Datei einen Hash. Die so erzeugte Datenbank enthält heute mehr als 46 Millionen Einträge. Mit ihrer Hilfe können Ermittlungsbehörden schnell und zuverlässig alle Dateien aussortieren, die von Softwarefirmen stammen und deshalb unbedenklich ignoriert werden können, wie die »Island Hopper News«. Andere Bundesbehörden halten Datenbanken mit elektronischen Fingerabdrücken von Dateien bereit, die gerade nicht belanglos sind: Programme, wie sie Computerhacker verwenden, oder Kinderpornografie.

Hash-Datenbanken sind zweifellos nützlich, aber in ihrem Anwendungsbereich begrenzt. Um diesen zu erweitern, habe ich eine Technik namens *Cross Drive Analysis* entwickelt. Aus Tausenden von Dateien, die über beliebig viele Festplatten, USB-Sticks oder sonstige Medien verteilt sein können, extrahiert dieses Verfahren charakteristische Elemente wie E-Mail-Adressen oder Kreditkartennummern und gewichtet sie nach der Häufigkeit ihres Auftauchens. Man kann nämlich davon ausgehen, dass ein solches Merkmal umso unwichtiger ist, je öfter es vorkommt. Wenn dagegen eine E-Mail-Adresse oder Kreditkartennummer in nur zwei von Tausenden Festplatten vorkommt, dann spricht vieles dafür, dass diese beiden etwas miteinander zu tun haben.

Bob, Rob oder Robert

Ein weiteres Problem für die Datenfusion ist das der Identitätsklärung (*identity resolution*). In der elektronischen Welt gibt es Dutzende von Leuten mit gleichem Namen, und ein und dieselbe Person kann unter Dutzenden von Namen erscheinen. In einer Datenbank steht Konteradmiral Poindexter als John Marlan Poindexter, in einer anderen als J.M. Poindexter und in der dritten vielleicht falsch geschrieben als Pointexter. Ein anderer Mensch könnte in der einen Datenbank mit dem Vornamen Robert erscheinen, in einer anderen mit Rob und in einer dritten mit Bob. Ein und derselbe arabische Name wird in Marokko als Haj Imhemed Otmane Abde-raqib in lateinischen Schriftzeichen wiedergegeben, im Irak dagegen als Hajj Mohamed Uthman Abd Al Ragib.

Erst die Identitätsklärung macht Datenfusion möglich. Bemerkenswerterweise wurde die Entwicklung der zugehörigen Verfahren maßgeblich durch die Casinos in Las Vegas vorangetrieben (Bild S. 92). Nach den Gesetzen des Staates Nevada müssen Casinos näm-



JOHN POINDEXTER, ehemaliger Sicherheitsberater von Präsident Ronald Reagan, scheiterte 2003 mit dem Projekt, eine zentrale Datenbank für die Suche nach Terroristen aufzubauen.

lich Personen am Spielen hindern, die sich selbst für spielsüchtig erklärt haben. Da aber Spielsucht eine Krankheit ist, versuchen selbst Leute, die ihren Namen freiwillig auf eine Sperrliste gesetzt haben, diese Sperre zu umgehen, indem sie ihren Namen ändern oder ein paar Ziffern in ihrem Geburtsdatum austauschen. Darüber hinaus möchte sich das Kasino natürlich vergewissern, ob der Gast, der soeben große Beträge am Blackjack-Tisch gewinnt, und der Kartengeber nicht unter einer Decke stecken.

Dementsprechend haben Casinos die Entwicklung einer Technik namens NORA (*non-obvious relationship analysis*, Analyse nicht offensichtlicher Beziehungen) finanziert. Sie wendet Verfahren der Identitätsklärung auf Datenbanken der Kreditkartengesellschaften, öffentliche Verzeichnisse und die Übernachtungsdaten des kasinoeigenen Hotels an. Ein NORA-System könnte zum Beispiel entdecken, dass die Frau des Kartengebers beim Blackjack früher im selben Haus wie der Spieler wohnte, der soeben 100 000 Dollar kassiert hat. In den 1990er Jahren entwickelte der Software-Ingenieur Jeff Jonas ein System zur Identitätsklärung, das mit Schreibfehlern, Mehrdeutigkeiten und unsicheren Angaben zurechtkommt. Ausgehend von den Daten stellt das Programm Hypothesen auf und revidiert sie, sobald neue Informationen zur Verfügung stehen (Bild S. 93). Damit das System überhaupt funktionieren kann, muss es so programmiert sein, dass es niemals die ursprünglichen Daten mit den daraus abgeleiteten Schlussfolgerungen verwechselt.

Jonas verkaufte das Programm und seine Firma 2005 an IBM. Seitdem hat IBM eine weitere Komponente namens *anonymous resolution* (anonyme Identitätsklärung) hinzugefügt: Zwei Organisationen können feststellen, ob ein und dieselbe Person in den Datenbanken beider Seiten verzeichnet ist, ohne dazu die übrigen Namen preiszugeben. Dazu



AP PHOTO

DENNIS RADER, auch bekannt als der **BTK-Mörder**, verriet sich durch Metadaten in einem Microsoft-Word-Dokument, das er an einen Fernsehsender schickte.

werden kryptografische Hashes an Stelle der Klarnamen verglichen.

Hashes, *cross drive analysis*, *anonymous resolution* und ähnliche Verfahren verhindern immerhin, dass die persönlichen Daten von Millionen Unbeteiligten im Klartext verarbeitet werden. Aber sie können die grundsätzliche Kritik der Datenschützer nicht entkräften. Schließlich verwenden alle diese Systeme nach wie vor persönliche Daten für andere Zwecke als die, für die sie ursprünglich erfasst wurden. Außerdem machen sie die verdachtsunabhängige Schleppnetzjagd von der Ausnahme zur Regel. Immerhin liefern diese Systeme deutlich weniger falsche Treffer als die in den 1980er Jahren entwickelten. Der Zeitpunkt ist abzusehen, zu dem der gesellschaftliche Nutzen der Datenfusion die Beeinträchtigung der Privatsphäre überwiegt – wie immer man beides quantifizieren mag.

Vergnügen oder Verbrechen?

Wie gut arbeiten nun Fusionssysteme wirklich? Die Qualität der Daten bleibt ein großes Problem. Die drei großen Kreditauskunfteien der USA, vergleichbar der deutschen Schufa, sammeln Daten über jeden, der ein Bankkonto eröffnet oder einen Kredit in Anspruch nimmt. Einmal im Jahr darf jeder Amerikaner bei diesen Firmen den *credit report* über seine Person kostenfrei abrufen. Wer das tut, wird mit großer Wahrscheinlichkeit in jedem dieser Berichte Fehler und Ungereimtheiten finden. Die können jahrelang in den Archiven schlummern, ohne viel Schaden anzurichten. Gefährlich wird es erst, sobald irgendein neuemodischer Algorithmus zu viel in diese Ungereimtheiten hineinliest.

Aber selbst wenn die Daten völlig korrekt sind, können durch Datenfusion entdeckte Beziehungen bedeutsam oder auch reine Koinzidenzen sein, die ebenso unausweichlich auftreten wie das Ereignis, dass unter ungefähr 30 Menschen in einem Raum zwei am selben

Tag Geburtstag haben. Vielleicht planen die vier Leute, die sich jede Woche für eine lange Autofahrt treffen, ja wirklich ein Verbrechen. Oder sie gehören einfach zum selben Sportverein und fahren gemeinsam zu ihrem allwöchentlichen großen Spiel.

Die Erwartungen der Gesellschaft an die Datenfusion sind in der Tendenz übertrieben. Wenn sich Terroristen geschickt unter die Bevölkerung mischen, tun sich Computer ebenso schwer, sie aufzuspüren, wie menschliche Ermittler. Die meisten Systeme zur Datenfusion verfügen über eine Art Regler zur Empfindlichkeitseinstellung: Ein bisschen zu weit nach links, und das System landet keine echten Treffer mehr; ein bisschen zu weit nach rechts, und es produziert zu viele Fehlalarme. Wie soll man den Regler einstellen? Wenn das System jeden dritten Flugpassagier für verdächtig erklärt, findet es mit großer Wahrscheinlichkeit auch einen echten Terroristen. Es wird aber zugleich den Luftverkehr lahmlegen und die Gesetzeshüter überfordern.

Wenn ein Programm zur Datenfusion nicht wie gewünscht arbeitet, dann ist es vielleicht schlecht programmiert; oder es leidet unter einem Mangel an Daten und würde bessere Ergebnisse liefern, wenn ihm nur noch mehr Datenbanken zugänglich wären. Ein gut funktionierendes System dagegen würde mit mehr Material höchstwahrscheinlich noch wesentlich mehr leisten. Einerlei wie gut es funktioniert, seine Entwickler und Betreiber finden immer gute Gründe, nach noch mehr Daten zu gieren – zum Entsetzen nicht nur der Datenschützer, sondern auch derjenigen, die die Rechnung zahlen. Roger Clarke kam in seiner Arbeit von 1994 zu dem Schluss, dass die Abwägung »des staatlichen Interesses an sozialer Kontrolle gegen das Interesse der einzelnen Bürger am Schutz vor unangemessener Einmischung stets zu Gunsten des Staates ausgeht«.

Was die öffentliche Debatte über die Datenfusion für mich als Wissenschaftler frustrierend macht, ist die Tatsache, dass so wenige Fakten über die tatsächlich verwendeten Datenfusionssysteme an die Öffentlichkeit gelangen. Das erinnert an die Kryptografiedebatte der 1990er Jahre, als die US-Regierung argumentierte, es gebe gute Gründe, die Anwendung der Kryptografie einzuschränken; aber bereits die öffentliche Diskussion dieser Gründe stelle eine Bedrohung der nationalen Sicherheit dar. Ich fürchte, eine ähnliche Debatte braut sich angesichts der Anwendung der Datenfusion durch die Regierung zusammen, ganz zu schweigen von den Anwendungen dieser mächtigen Technologie in Wirtschaft und Politik. Diese Debatte muss dringend geführt werden – aber in der Öffentlichkeit. ◀



Simon L. Garfinkel schlägt eine Brücke zwischen der akademischen Welt, dem Journalismus und der Industrie. Er ist Computerwissenschaftler an der Naval Postgraduate School in Monterey (Kalifornien); zu seinen Forschungsinteressen zählen Computerkriminalistik, Sicherheit, Datenschutz und terroristische Angriffe. Garfinkel gründete eine Firma für Computersicherheit und besitzt mehrere entsprechende Patente.

Clarke, R.: Computer Matching by Government Agencies: the Failure of Cost/Benefit Analysis as a Control Mechanism. In: Information Infrastructure & Policy 4(1), S. 29–65, März 1995. Online unter www.anu.edu.au/people/Roger.Clarke/DV/matchCBA.html.

Garfinkel, S.: Database Nation: The Death of Privacy in the 21st Century. O'Reilly, Sebastopol (Kalifornien) 2000.

Garfinkel, S.: Forensic Feature Extraction and Cross-Drive Analysis. Digital Investigation 3, Supplement 1, S. 71–81, September 2006. Online unter www.dfrws.org/2006/proceedings/10-Garfinkel.pdf.

Jonas, J.: Threat and Fraud Intelligence, Las Vegas Style. In: IEEE Security & Privacy 4(6), S. 28–34, November/Dezember 2006. Online unter <http://jeffjonas.typepad.com/IEEE.Identity.Resolution.pdf>.

Garfinkel, S., Spafford, G.: Web Security & Commerce. O'Reilly, Sebastopol (Kalifornien) 1997.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/1005455.

Bye-bye, Brille!

Fehlsichtigkeit lässt sich durch eine Bearbeitung der Hornhaut mit dem Laser dauerhaft korrigieren.

Von Christian Tack

Das menschliche Auge ist eine derart ausgefeilte Konstruktion, dass Charles Darwin es als Beispiel für die perfekten Resultate der natürlichen Selektion wählte. Unser optischer Apparat ist ideal dazu geeignet, durch Lider und Pupille den Lichteinfall zu regulieren, vor allem aber ein scharfes Abbild der Umgebung zu liefern. Denn die gekrümmte Hornhaut des Augapfels, die zudem Schutz gibt, sowie die über Bänder und Muskeln in ihrer Form verstellbare Linse brechen die einfallenden Lichtstrahlen so, dass diese in der Ebene der Netzhaut ihren Brennpunkt haben.

Für viele Menschen ist dies reine Theorie. Liegt der Brennpunkt vor der Retina, nehmen sie weiter entfernte Objekte und Strukturen nur verschwommen wahr (Kurzsichtigkeit, Myopie), im umgekehrten Fall sieht man in der Nähe schlecht (Weitsichtigkeit, Hyperopie). Bei unregelmäßig gewölbter Hornhaut existieren sogar mehrere Brennpunkte in unterschiedlichen Ebenen (Astigmatismus).

Herkömmlicherweise wird der Strahlengang des Auges durch zusätzliche Linsen korrigiert, getragen als Brille oder Kontaktlinse. Seit Ende der 1980er Jahre gibt es aber auch die Option, die Lichtbrechung des Gesamtapparats durch einen Schliff der Hornhaut, genauer gesagt ihrer Stroma genannten Licht brechenden Schicht einzustellen. Ultrakurze Pulse eines Excimer-Lasers, der ultraviolette Licht mit 192 Nanometer Wellenlänge generiert, erhitzen schlagartig das Gewebe, das lokal verdampft. Um dabei Wärmeschäden in benachbartem Gewebe zu vermeiden, springt der Laserstrahl auf der Hornhaut hin und her.

Das erste Verfahren dieser Art ist die Photorefraktive Keratektomie (PRK). Zwar wächst nach der Behandlung die oberste, hauchdünne Zellschicht der Hornhaut wieder nach. Der Laser trifft aber zunächst auf das schmerzempfindliche Epithel.

Dieses Problem vermeidet die Lasek (*Laser Epithelial Keratomileusis*), die direkt auf dem Stroma angewendet wird. Hier wird die dünne Epithelschicht zunächst kreisförmig mit einem Rundmesser (Mikrotrepan) eingeschnitten und dann mit einem Spatel beiseitegeschoben. Die Laserbehandlung erfolgt auf der Oberfläche der darunterliegenden, dicksten Schicht der Hornhaut, dem Stroma. Die Epithelschicht wird anschließend zurückgeschoben und verheilt innerhalb weniger Tage.

Da schmerzleitende Nerven innerhalb des Epithels und zwischen Epithel und Stroma verlaufen, wurde die Lasik (*Laser In Situ Keratomileusis*) entwickelt. Der Chirurg schneidet mit einem Mikrokeratom quer zur Sehachse tief in die Hornhaut und klappt anschließend den so entstandenen Deckel (Flap) auf. Das Epithel wird also nur im Bereich des Schnitts verletzt; das nun frei liegende Stroma enthält keine Schmerzrezeptoren. Der Laser entfernt dort Gewebe, und der Deckel wird zurückgeklappt. Er haftet von selbst, so dass sich die Veränderung der Stromaoberfläche auf die Hornhautoberfläche durchprägt. Die Schnittstelle verheilt in den nächsten Tagen, allerdings wächst der Flap nicht wieder an.

Vor jeder Operation müssen die Augenparameter exakt vermessen und eine genaue Diagnose des Sehfehlers erstellt werden. Das verbessert nicht nur das Resultat, es hilft auch, Komplikationen zu vermeiden. Wäre beispielsweise die Hornhaut nach dem Eingriff dünner als 250 Mikrometer, würde sie dem Augeninnendruck nachgeben und sich nach außen wölben (Ektasie). Auch die Pupillenweite kann eine Kontraindikation darstellen, denn der Durchmesser der gelaserten Zone sollte größer sein als der Pupillendurchmesser. Wenn sich die Pupille bei Dunkelheit über diesen Bereich hinweg vergrößerte, würde Licht durch den nicht korrigierten Bereich auf die Netzhaut fallen, was ein verwischtes Sehen zur Folge hätte.

Doch im Normalfall kann Kurzsichtigkeit bis zu minus zehn Dioptrien durch ein Abflachen der Hornhaut behandelt werden. Die Grenze der Korrektur beträgt bei Weitsichtigkeit plus drei Dioptrien, denn der Chirurg muss die Krümmung der Hornhaut verstärken, indem er im Randbereich Gewebe entfernt.

Die einzelnen Arbeitsschritte folgen einem festgelegten Muster, das auf den Sehfehler abgestimmt ist, meist aber »nur« eine standardisierte Linsenform in das Stroma fräst. Erst beim so genannten *Wavefront guided Lasik* tastet ein zweiter Laser vor der Operation die Oberfläche der Hornhaut ab und erstellt eine Karte, die dann den Excimer-Laser steuert. Dieses Verfahren arbeitet auf 0,05 Mikrometer genau.

Meist sind trockene Augen die Folge der Operation. Dagegen helfen Tränenersatzmittel, die auch Entzündungen vorbeugen. Zudem treten bei PRK und Lasek in den ersten Tagen häufig starke Schmerzen auf. Den diesbezüglichen Vorteil der Lasik erkaufte man sich mit einem Risiko: Ein starker Schlag etwa bei einem Unfall kann den Flap auch noch nach Jahren verschieben. Andere Nebenwirkungen wie Infektionen und Entzündungen kommen kaum vor und können durch eine gute Nachsorge kontrolliert werden. Treten jedoch schwer wiegende Komplikationen auf, mag dies sogar eine Hornhauttransplantation erfordern.

In der Entwicklung sind Verfahren, die statt der Kombination aus Operationsmesser und Excimer-Laser einen Femtosekundenlaser als einziges Arbeitsgerät einsetzen. Damit lässt sich präzise in der Hornhaut selbst schneiden. Beim Flex genannten Verfahren wird zuerst in zwei Schnitten mit diesem Laser Stroma abgetrennt, dann erst ein vergleichsweise kleiner Schnitt durch das Epithel angelegt und das Gewebe herausgezogen; bei Intracore bleibt das Epithel unversehrt, und der Operateur legt mit dem Femtosekundenlaser Schnitte in das Stroma, die dessen Brechkraft ändern. Bislang lassen sich mit letzterem Verfahren nur Korrekturen um maximal eine Dioptrie ausführen. Für Altersweitsichtigkeit hat es bereits die Zulassung erlangt.

CHRISTIAN TACK ist freier Wissenschaftsjournalist in Heidelberg.

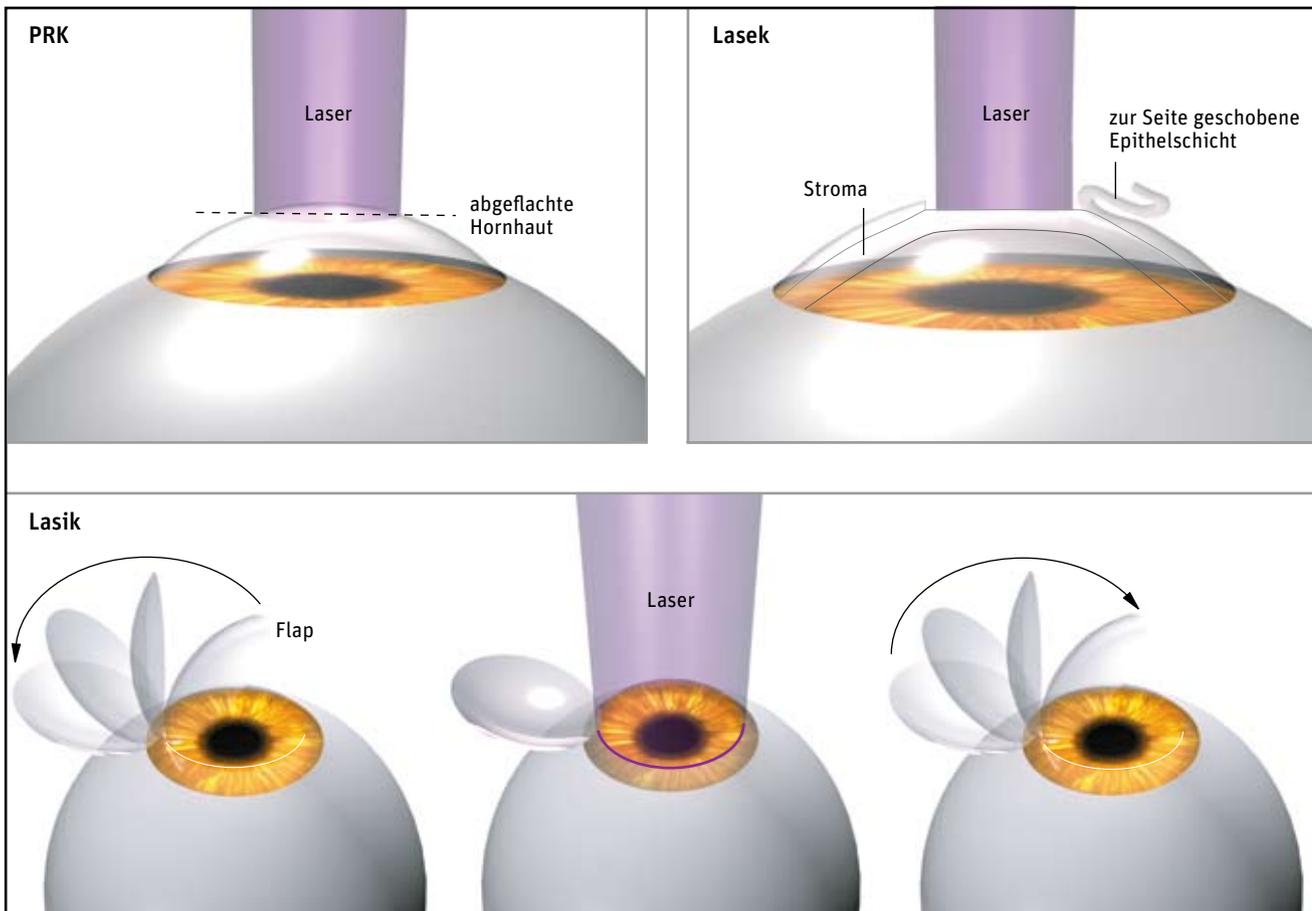
WUSSTEN SIE SCHON?

► **Feine Muskeln ziehen die elastische Linse** des Auges auseinander, um Gegenstände zu fokussieren. Mit zunehmendem Alter verliert diese jedoch an Flexibilität, so dass nahe Objekte nicht mehr rangezoomt werden können. Mit 45 Jahren leidet nahezu jeder Mensch unter dieser Altersweitsichtigkeit. Sie stabilisiert sich in den nächsten 10 bis 20 Jahren, wenn die Linse einfach sämtliche Elastizität verliert. Eine Vorsorge ist nicht möglich.

► **Nach Schätzung** von Mike P. Holzer, Oberarzt und Leiter des Bereichs Refraktive Chirurgie an der Augenklinik der Universität Heidelberg, werden deutschlandweit etwa 60 000 bis 80 000 Laseroperationen pro Jahr durchgeführt – etwa drei Viertel davon mit der Lasik.

► **Auch wenn die Lasik** in vielen Werbematerialien als modernstes Verfahren dargestellt wird, sind alle drei Verfahren etabliert und werden erfolgreich angewendet. Gerade bei einer verhältnismäßig dünnen Hornhaut kann noch eine Behandlung mit den oberflächlichen Verfahren (PRK und Lasek) möglich sein, weil sie die Hornhaut nicht durch einen tiefen Schnitt destabilisieren. Zudem sollten Patienten aus Berufsgruppen mit einem hohen Verletzungsrisiko wie Polizisten oder Kontaktsportler die Lasik aus dem im Text genannten Grund vermeiden.

► **Auch stärkere Sehfehler** lassen sich chirurgisch beheben. Dafür müssen allerdings mikrochirurgische, invasive Verfahren angewendet werden, die künstliche Linsen in den Augapfel implantieren.



Um scharf zu sehen, muss der optische Apparat des Auges Lichtstrahlen exakt auf die Netzhaut (Retina) fokussieren. Bei Kurzsichtigkeit konvergieren die von weit entfernten Objekten ausgehenden Strahlen jedoch vor ihr, bei Weitsichtigkeit liegt der Brennpunkt naher Objekte hinter der Retina. Alternativ zu Brille und Kontaktlinse – also zusätzlichen Linsensystemen – modifizieren laserchirurgische Verfahren die Brechkraft des optischen Apparats durch Veränderung der Hornhautkrümmung: Abflachung beziehungsweise Herausarbeiten einer stärker gewölbten Kontur korrigieren Kurz-

beziehungsweise Weitsichtigkeit. Bei der Photorefraktiven Keratektomie (PRK) arbeitet der Chirurg direkt auf dem Augapfel, bei der Lasek wird zunächst die schmerzempfindliche Epithelschicht abgehoben. Bei der Lasik-Behandlung wird die Hornhaut bis in das unter dem Epithel liegende Stroma horizontal eingeschnitten. So entsteht ein als Flap bezeichneter Deckel von acht Millimeter Durchmesser. Er wird zur Seite geklappt, und der Laser kann nun Gewebe nach einem computerberechneten Muster in weniger als 60 Sekunden abtragen. Zum Schluss wird der Flap zurückgelegt.



GE GLOBAL RESEARCH EUROPE

»Ich starte gern bei null«

Welcher Wissenschaftler würde nicht davon träumen, ein Forschungszentrum aufzubauen? Dr.-Ing. Carlos Härtel ist Mitbegründer des europäischen Forschungszentrums von General Electric (GE) in Garching bei München und seit 2007 dessen Leiter.

Carlos Härtel, geboren 1963, hat von 1983 bis 1989 Maschinenbau an der RWTH Aachen und der Technischen Universität München studiert und am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt in Göttingen promoviert. Anschließend leitete er eine Forschungsgruppe am Institut für Fluidmechanik der ETH Zürich, wo er sich 1999 habilitierte. Von 2001 bis 2003 arbeitete Härtel am Forschungszentrum der Alstom AG in Dättwil bei Zürich und wechselte 2003 zu General Electric, um das europäische Global Research Center in Garching bei München mit aufzubauen. Seit 2007 ist er dessen Leiter. In sechs Laboren forschen dort 150 Mitarbeiter über die Nutzung alternativer und erneuerbarer Energiequellen, Fertigungstechnologien für Faserverbundwerkstoffe, Sensorik und Messtechnik sowie bildgebende Verfahren für die medizinische Diagnostik.

Spektrum der Wissenschaft: General Electric hat sein europäisches Forschungszentrum auf dem Campus der Münchner Universitäten errichtet, sozusagen auf der grünen Wiese, denn dieses Hochschulareal entstand selbst erst ab den 1990er Jahren. War das ein leichter Start?

Carlos Härtel: 2003 waren wir tatsächlich nur zu viert und logierten während der Bauzeit im Gründungszentrum der TU hier in Garching. 2004 zogen wir dann mit etwa 20 Mitarbeitern um. Das war schon merkwürdig, so ein großes Gebäude, fast menschenleer. Inzwischen arbeiten bei uns rund 150 Forscher und Entwickler.

Spektrum: In den USA, China und Indien gibt es weitere GE-Forschungszentren – wie reiht sich der Münchner Benjamin in diesen Reigen ein?

Härtel: Wir mussten von Anfang an beweisen, dass wir die Investition wert sind, und für laufende Projekte des Konzerns Entwicklungsarbeit leisten. Mittlerweile gehen viele Impulse auch von uns aus. Wir entwickeln neue Technologien und geben sie an die Geschäftsbereiche weiter, die sie in Produkte umsetzen. Ein aktuelles Beispiel betrifft die Restwärmennutzung in Kraftwerken, die mit Gasmotoren Strom erzeugen. Dort entsteht

viel Abwärme, doch bei relativ niedrigen Temperaturen, weshalb sie in der Regel ungenutzt bleibt. Mit einer neuen Technologie können wir daraus zusätzlichen Strom gewinnen. Eine erste Anlage wird demnächst in Feldversuchen erprobt.

Spektrum: Wie kommen solche Projekte zu Stande?

Härtel: Wir greifen Trends auf – in diesem Beispiel Energieeffizienz – und entwickeln Technologien, die zu bestehenden oder geplanten Produkten und Dienstleistungen des Konzerns passen. In Regensburg hat beispielsweise GE Aviation 2008 ein Entwicklungszentrum für Triebwerkskomponenten eröffnet, das später zu einem Produktionsstandort ausgebaut werden soll. Dort wird ein von uns entwickeltes Verfahren eingesetzt, um Turbinenschaufeln aus einer Titan-Aluminium-Legierung zu fertigen.

Spektrum: Und was war da die Leistung des Zentrums?

Härtel: Wir wollten das so genannte Schleudergießen für diese Anwendung nutzbar machen, also einen Guss, bei dem Metallschmelzen durch Zentrifugalkraft in die Formen gedrückt werden. Der Vorteil ist, dass man damit zähflüssige Schmelzen und komplizierte Gussformen verwenden kann. Unsere For-



Zwei Wissenschaftler überprüfen Messwerte an einer Solartestzelle von General Electric. Zum Schutz vor der hohen UV-Strahlung tragen sie spezielle Anzüge.

GENERAL ELECTRIC ist ein US-amerikanischer Mischkonzern mit Hauptsitz in Fairfield, Connecticut. Die Geschäftsbereiche erstrecken sich über viele Branchen von der Industrie über Dienstleistungen und Medien bis hin zu Finanzen. Der Umsatz des Konzerns mit Produktionsstätten in 32 Ländern lag 2009 bei 182,5 Milliarden Dollar. GE beschäftigt rund 300 000 Menschen in über 100 Ländern. Zum Konzern gehören vier Forschungszentren im US-Bundesstaat New York, in Bangalore (Indien), Shanghai (China) und in Garching bei München. Das deutsche Forschungszentrum ist mit seinen 150 Mitarbeitern das kleinste des Konzerns, Bangalore mit rund 4200 Wissenschaftlern das größte. Seit der Gründung des deutschen Forschungszentrums 2004 hat GE rund 100 Millionen Euro in den Aufbau des Zentrums und in Forschungsarbeiten investiert.

scher haben dann mit Kollegen von GE Aviation die optimale Zusammensetzung der Legierung ermittelt und Schmelztemperatur, Drehgeschwindigkeit der Zentrifuge sowie Ablauf des Gussvorgangs aufeinander abgestimmt.

Spektrum: Welche Rolle spielen Sie als Leiter des Forschungszentrums?

Härtel: Ich sehe mich vor allem als Bindeglied zwischen allen beteiligten Gruppen. Ein wichtiger Teil meiner Aufgaben ist zudem der Kontakt zu Kunden – oftmals große Unternehmen aus der Strombranche, der Luft- und Raumfahrt oder der Öl- und Gasindustrie –, zu den Verantwortlichen der GE-Geschäftsbereiche und zu den Partnern im Ministerium und bei den Projektträgern. Für ein Projekt zum Kaltgasspritzen haben wir kürzlich erstmals eine Förderung vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie erhalten. Das ist für uns ein Meilenstein im langfristigen Auf- und Ausbau des Zentrums. Ganz wichtig ist der Kontakt zu Wissenschaftlern.

Spektrum: Rührt daher die Wahl des Standorts vor den Toren von München?

Härtel: Wir wollten die Nähe zu erstklassigen Forschern und zum wissenschaftlichen Nachwuchs. GE ist Teil des Forschungsstandorts Deutschland und

möchte diese Rolle noch ausbauen. Da muss ich immer auf dem Laufenden sein und eine enge Abstimmung mit Auftraggebern und Forschungspartnern gewährleisten. Außerdem bin ich in vielen Gremien im technischen Umfeld aktiv, auf nationaler wie auch europäischer Ebene. Etwa 20 Prozent meiner Arbeitszeit beansprucht der Betrieb des Zentrums.

Spektrum: Zu Beginn Ihrer Karriere haben Sie mehrere Jahre an der ETH Zürich geforscht. Anschließend waren Sie bei Alstom zunächst im Forschungszentrum, später im Servicegeschäft. Wo ist der rote Faden in Ihrer Biografie?

Härtel: Ein wiederkehrendes Element meines Lebens ist sicher, dass ich gerne bei null starte, um dann etwas voranzutreiben. Das war in Zürich so, dann bei Alstom, wo ich an der Leistungssteigerung von Gasturbinen gearbeitet habe; und als das Unternehmen andere Prioritäten setzte, habe ich dort ein neues Team im Service aufgebaut. Zu GE wechselte ich, um in Garching das Labor für alternative Energien aufzubauen. Manchmal musste ich mir auch selbst Mut machen, etwa als ich die Hochschulkarriere aufgab – und damit ja auch eine sichere Pfründe – und mich als Projektmitarbeiter bei Alstom zunächst wieder einreihen musste.

Spektrum: GE ist ein amerikanisches Unternehmen. Merkt man das in Garching?

Härtel: Wir arbeiten wahrscheinlich etwas anders als ein vergleichbares deutsches Unternehmen. Inwieweit das amerikanischer Stil oder einfach der Stil von GE ist, vermag ich nicht zu beurteilen. Unsere Kollegen stammen fast ausschließlich aus Europa, die allermeisten davon aus dem Ausland. Bei ihrer Einstellung war es ein wichtiges Kriterium, wie gut sie sich mit der Arbeitskultur hier identifizieren können. Wir arbeiten interaktiv und häufig in virtuellen Teams, die sich aus Mitarbeitern mehrerer Forschungszentren zusammensetzen. Still im Kämmerchen vor sich hin zu tüfteln, das ist hier eher unüblich. Die enge Teamarbeit und die globale Vernetzung kommen aber den meisten jungen Absolventen und Wissenschaftlern sehr entgegen.

Spektrum: Was tun Sie, um mal abzuschalten?

Härtel: Nichts. Meine Tochter sagt immer, ich sei ein Mensch ohne Hobbys. Ich fürchte, sie hat Recht. Mein Beruf und meine Familie füllen mich vollkommen aus. ◀

Das Interview führte die Münchner Wissenschaftsjournalistin **Katrin Nikolaus**.

BOTANIK

Klein, aber oho

Der erotische Reiz der Pollen ist begrenzt, der ästhetische dagegen erheblich.

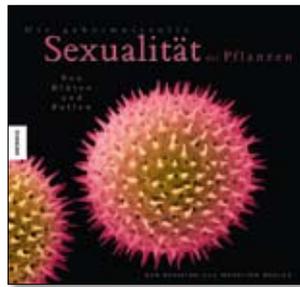
Lassen Sie sich von dem leicht reißerischen Titel nicht beirren: Die Sexualität der Pflanzen ist zwar der Aufhänger, aber nicht die eigentliche Botschaft dieses Buchs. Und vom versprochenen »Geheimnis« werden Sie ebenfalls nicht viel finden.

Dieses Werk ist ein Lobgesang auf das Kleine, exemplarisch dargestellt am Pollen. Ein Künstler und eine Wissenschaftlerin haben sich zusammengetan, um uns das Leben und die Schönheit dieser winzigen Organismen im Wortsinn nahezubringen. Rob Kessler, der Fotograf, ist Kunstprofessor am Central Saint Martin's College of Art and Design, Madeline Harley, die Textautorin des ersten Teils, Leiterin der Abteilung für Pollenkunde am botanischen Garten »Kew Gardens«, beide in London.

Mehr als zwei Seiten Text hintereinander findet man im gesamten Buch nur sehr selten. Bilder oder ganze Bildstrecken mit fantastischen Pollenaufnahmen, Großaufnahmen von Blüten, Blütenteilen oder Blüten mit bestäubenden Insekten dominieren das Werk.

Im ersten Teil führt uns Madeline Harley in die sexuelle Fortpflanzung bei Blütenpflanzen ein, beginnend bei Aufbau und Struktur der Blüte, insbesondere der Sexualorgane (Staubblätter und Stempel), über Entwicklung und Aufbau des Pollens bis hin zu dessen Verwendung bei Klima- und Vegetationsforschung und in der Pflanzensystematik. Erst danach geht sie auf die geschlechtliche Vermehrung bei Pflanzen ein und auf deren diverse Methoden zur Vermeidung von Selbstbestäubung. Nach einigen Abschnitten über Tiere als Bestäuber, Koadaption und Lockmittel (Geruch und Pollen) wird ganz zum Schluss, fast en passant auf den letzten anderthalb Seiten, die eigentliche Befruchtung beschrieben.

Im zweiten Teil »Abbildung des Unsichtbaren« macht Rob Kessler mit dem Leser eine kleine Reise durch die Geschichte der Pflanzenillustrationen, insbesondere der Abbildung von Pollen, die bereits Ende des 17. Jahrhunderts, kaum dass die nötigen optischen Hilfsmittel erfunden waren, mit Nehemiah Grew (1641–1712) begann. Pflanzenmaler wie die Brüder Ferdinand (1760–1826) und Franz Bauer (1758–1840) und Botaniker wie Carl Julius von Fritzsche



gefärbt, gelegentlich unterbrochen von Gedichten oder Zitaten. Sogar die Textseiten sind häufig passend zum Bild Ton in Ton gestaltet.

Die eigentliche Attraktion des Buchs sind die wunderschönen Aufnahmen von Rob Kessler. Dabei stechen besonders die meisterlich eingefärbten Fotos der Pollen hervor, während die Makroaufnahmen von Blüten und deren Teilen nicht immer überzeugen können. Die nach rein ästhetischen Gesichtspunkten ausgewählten elektronenmikroskopischen Aufnahmen laden ein zum Erkunden der Detailfülle der Pollenkörner.

Leider können Text und Aufbau des ersten Teils – immerhin über die Hälfte des Buchs – mit der Qualität der Abbildungen nicht mithalten. Madeline Harley will derart viel erläutern, dass gegen ihre erklärte Absicht beinahe der Stoff eines Lehrbuchs zusammengekommen ist – nur nicht so gut strukturiert. An manchen Stellen wird Wissen vorausgesetzt, das erst später erklärt

(1808–1871) haben erstaunlich viele der kleinsten Pollendetails erkannt und gezeichnet, die wir heute mit hochtechnischen Methoden wie der Elektronenmikroskopie neu sehen. Besonders am Herzen liegt Rob Kessler die Zusammenarbeit und gegenseitige Inspiration von Künstlern und Botanikern, die zu Beginn des 20. Jahrhunderts durch die Fortschritte der fotografischen Technik einen Einbruch erlitt, aber in letzter Zeit wieder vermehrt aufgeblüht ist.

Der dritte und letzte Teil ist ganz der kontemplativen Betrachtung gewidmet. In doppelseitigen Bildkombinationen präsentiert uns Rob Kessler Blüten und zugehörige Pollen, jeweils zur Blüte passend ein-



Die Kätzchen der Schwarzerle *Alga glutinosa* setzen ihren Pollen frei. Oben im Bild die letztjährigen weiblichen Zapfen

wird, Abbildungshinweise fehlen oder sind unvollständig. Die Größe der elektronenmikroskopisch abgebildeten Pollenkörner bleibt unklar, da die Nachvergrößerung der Bilder nicht angegeben ist. Warum Harley alle Fachausdrücke nur auf Lateinisch verwendet, leuchtet trotz langer Vorbemerkung nicht ein. Das Glossar am Ende schickt den Wissbegierigen in einen Irrgarten aus Querverweisen.

Während die Vermeidung von Selbstbefruchtung ziemlich detailliert dargestellt ist, muss man sich die Methoden, wie die Bestäubung stattfindet, aus diversen Abschnitten zusammensuchen. Der Unterschied zwischen Pollen und Sporen wird auf weniger als einer Seite erklärt, wofür auf die Schnelle noch auf den Generations-

wechsel bei Kryptogamen eingegangen werden muss. Wie ein Fremdkörper im Gesamttext wirkt ein Kapitel über das (Sozial-) Leben der Honigbiene, als Unterkapitel zu »Wie Selbstbestäubung vermieden wird«. Hätte ich nicht schon vor der Lektüre des Buchs gewusst, wie die sexuelle Fortpflanzung bei Blütenpflanzen funktioniert – ich hätte es auch danach nicht verstanden.

Alles in allem hinterlässt das Buch einen zwiespältigen Eindruck: Die Texte sind interessant, und aus jeder Zeile spürt man die Begeisterung und Faszination der Autoren für diese Kleinstorganismen namens Pollen. Andererseits ist der Text denkbar schlecht strukturiert und für botanisch unerfahrene Leser nicht geeignet. Gerne hätte man die

Abbildungen in einem reinen Fotoband versammelt gesehen, um daneben einen richtig guten einführenden Text zum Thema zu lesen.

Geheimnisvoll ist das alles nicht besonders, aber wunderschön anzuschauen.

Frank Thommen

Der Rezensent ist Diplombiologe und arbeitet als IT Support Engineer beim Europäischen Laboratorium für Molekularbiologie (EMBL) in Heidelberg.

Rob Kessler, Madeline Harley

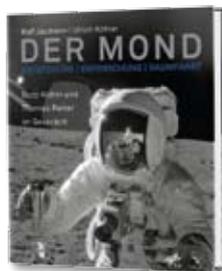
Die geheimnisvolle Sexualität der Pflanzen
Von Blüten und Pollen

Aus dem Englischen von Dagmar Mallett.
Knesebeck, München 2008.
263 Seiten, € 49,95

WELTRAUMFORSCHUNG

40 Jahre danach

Das Jubiläum der ersten Mondlandung und das internationale Jahr der Astronomie sind Anlass für diesen fantastischen Band um Erforschung und Eroberung des Erdtrabanten.



Der Mond ist zwar trocken und grau, dieses Buch aber keineswegs. Die Autoren sind Wissenschaftler des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) und schreiben doch besser als viele Leute, deren Beruf das Schreiben ist.

Man ist versucht, es in einem Rutsch durchzulesen – aber das erste Kapitel sollte man zunächst besser überschlagen. Da spricht über mehr als 40 Seiten Deutschlands erfahrenster Raumfahrer Thomas Reiter, mittlerweile DLR-Vorstandsmitglied für Raumfahrtforschung und -entwicklung, mit dem Apollo-11-Astronauten Buzz Aldrin. Was die beiden an Wissen über die Mondfahrt stillschweigend voraussetzen, hat der Leser erst am Ende des Buchs erworben. Zudem ist der Dialog nicht ganz ausgeglichen, zu sehr merkt man Reiter seine Bewunderung für den Kollegen an. Seine eigenen Erfahrungen lässt er eher beiläufig einfließen und übernimmt mehr die Rolle eines Interviewers.

Entgegen der Reihenfolge »Entstehung, Erforschung, Raumfahrt« im Untertitel beginnt der Hauptteil mit dem »Wettrennen der Roboter«. Wie auch bei den vorigen Meilensteinen der Raumfahrt hatte zunächst die Sowjetunion die Nase vorn. Doch unter dem Druck von Präsident Kennedys Order, noch

vor dem Jahr 1970 Astronauten zum Mond und heil wieder nach Hause zu bringen, wendete sich das Blatt sukzessive mit jeder weiteren unbemannten amerikanischen Sonde, die zuerst hart, dann weich auf der Oberfläche aufsetzte, dort Proben nahm und analysierte, alles mit dem Ziel, das Terrain für die ersten Astronauten zu erkunden. Was dann, ein halbes Jahr vor Ablauf von Kennedys Frist, auch tatsächlich gelang.

Die Autoren begleiten das gesamte Unterfangen so lebendig und detailreich, dass der Leser fast das Gefühl hat, dabei zu sein. Alles wird in den technischen und wissenschaftlichen Kontext der Epoche gesetzt, und der Fassettenreichtum macht die Erzählung sehr lebendig. Trotz der vielen Erläuterungen, beispielsweise von den Funktionsweisen der Raumfahrzeugkomponenten oder der wissenschaftlichen Instrumente, bis hin zu geologischen Grundlagen und Ergebnissen, ist der Text auch für den Nichtfachmann erhellend und sehr gut lesbar. Von unerklärten Fachbegriffen wie »Alpha-Rückstreu-Spektrometer« oder »Klinopyroxenkristalle« mag man sich beim Lesen nicht aufhalten lassen, nicht einmal für einen schnellen Blick ins Geologie-Glossar am Ende des Buchs (wo ausgerechnet diese Begriffe nicht erklärt sind).

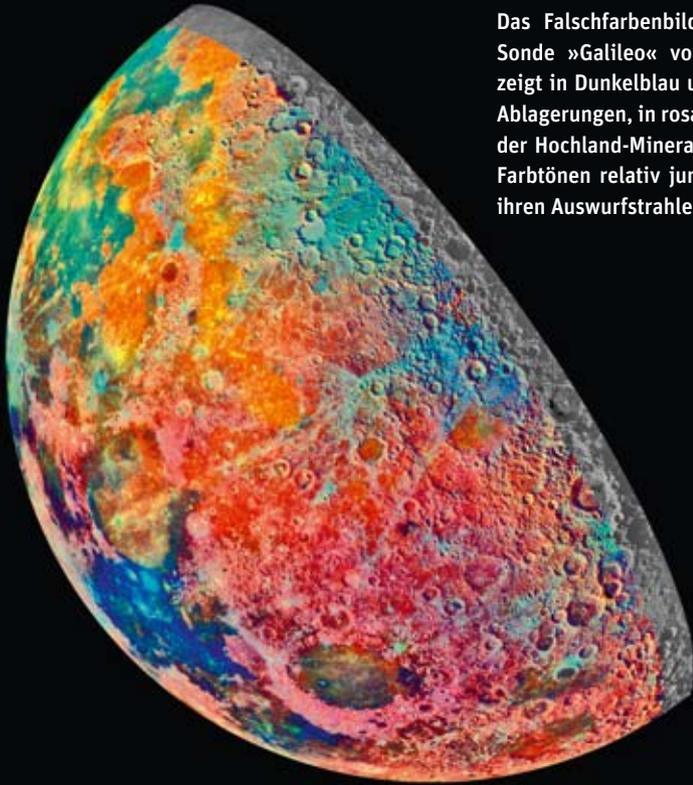
Bei der reichhaltigen, hervorragenden und großformatigen Bebilderung stört auch nicht besonders, dass aus dem Text heraus nicht auf sie verwiesen wird. Nur den »Schrägblick von Lunar Orbiter 2 auf die Terrassen des Kraters Copernicus«, der »seinerzeit von der Presse als »Foto des Jahrhunderts« gefeiert« wurde, sucht man vergebens (siehe zum Beispiel [http://en.wikipedia.org/wiki/Copernicus_\(lunar_crater\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Copernicus_(lunar_crater))). Allem Anschein nach wurde dieses Bild den – für meinen Geschmack – eindrucksvolleren Apolloaufnahmen geopfert.

Jaumann und Köhler lassen sämtliche Apolloflüge in angemessenem Umfang lebendig werden, ohne je die wissenschaftlichen Aspekte der Missionen zu vernachlässigen. Und deren gab es mehr, als man denkt. Noch heute offenbaren neue Analysemethoden weitere Fakten. So wurden erst 2008 im Kristallgitter der von Apollo 15 eingesammelten »grünen Gläser« Wassermoleküle entdeckt, die darauf schließen lassen, dass der Mond ursprünglich nicht so trocken war wie bisher vermutet.

Die Erforschung des Mondes hat auch zur Klärung seines Ursprungs beigetragen: Er entstand wohl in der Frühphase des Sonnensystems als Folge der Kollision der Erde mit einem etwa marsgroßen Planeten. Daher trägt er auch Informationen über die ursprüngliche Erde in sich, eines der Hauptar-

Alle rezensierten Bücher können Sie in unserem Science-Shop bestellen

direkt bei: www.science-shop.de
per E-Mail: shop@wissenschaft-online.de
telefonisch: 06221 9126-841
per Fax: 06221 9126-869



Das Falschfarbenbild (aus Aufnahmen der Sonde »Galileo« vom 8. Dezember 1992) zeigt in Dunkelblau und Orange vulkanische Ablagerungen, in rosa Farbtönen Variationen der Hochland-Mineralogie und in hellblauen Farbtönen relativ junge Einschlagkrater mit ihren Auswurfstrahlen.

gumente der Autoren, warum seine Erforschung wieder mit mehr Nachdruck verfolgt werden sollte: »Die entwickelnde und sich verändernde Erde verkörpert das eine Extrem planetarer Körper – der Mond bildet das andere. Der Mond wird deswegen und eben wegen seiner Nähe ein Ziel der Raumfahrt bleiben und ist für die Zeit nach der

Raumstation das nächste logische Betätigungsfeld der Menschen im Weltraum.«

Das sehen sogar manche Beteiligte von damals anders. So sagte der inzwischen 79-jährige Apollo-11-Astronaut Aldrin jüngst im NASA-TV anlässlich des Jubiläums, man solle vielmehr alle Kräfte auf den Flug zum Mars konzentrieren, ohne Umweg über eine

bemannte Mondstation. Nun ja; als Aldrin als zweiter Mensch überhaupt seinen Fuß auf den Mond setzte, war die technische Errungenschaft noch weit wichtiger als die wissenschaftliche. Bei den »goldenen Missionen« Apollo 14 bis 17 sah dies ganz anders aus, wie die Autoren belegen.

Aldrins Kollege James Lovell (Apollo 8 und 13) betont an gleicher Stelle den Leuchtturmcharakter der Raumfahrt: »Eine Marsmission ist eine Mission, die die Menschen wieder beflügeln kann.« Dem halten Jaumann und Köhler am Schluss ihres Buchs eine Parallele aus der Geschichte entgegen: »Heinrich der Seefahrer, Magellan und Kolumbus haben die Meere vermessen, sind entlang der Kontinente gesegelt und haben die Küsten auf ersten Karten festgehalten. Doch erst Darwin und Humboldt haben mit ihrer akribischen wissenschaftlichen Detailarbeit unser Weltbild nachhaltig verändert.«

Dieses Buch stammt eindeutig nicht von den Abenteurern, sondern von den Wissenschaftlern – Planetengeologen in diesem Fall. Trotzdem ist es richtig spannend.

Oliver Dreissigacker

Der Rezensent (Jahrgang 1966) arbeitet als freier Wissenschaftsjournalist in Mannheim. Die Mondlandungen zählen zu seinen ersten Fernseherlebnissen.

Ralf Jaumann, Ulrich Köhler

Der Mond

Entstehung – Erforschung – Raumfahrt

Fackelträger, Köln 2009. 320 Seiten, € 49,95

SOZIALPHYSIK

Soziologie mit physikalischen Mitteln

Mark Buchanan versucht, die Wechselwirkungen der Menschen wie die von Atomen und Molekülen zu beschreiben – mit gemischtem Erfolg.

Man stelle sich eine größere Zahl von Personen vor, zwischen denen es nicht die geringsten Unterschiede gibt. Alle haben den gleichen Charakter, das gleiche Temperament, die gleiche Intelligenz und verfügen über das gleiche Wissen, die gleichen Fähigkeiten und das gleiche Investitionsgeschick. Jede von ihnen bekommt 1000 Dollar in die Hand gedrückt und darf sie am Aktienmarkt anlegen. Wenn obendrein das Steigen und Fallen der Aktienkurse völlig zufallsabhängig ist, was passiert dann?

Die beiden Physiker Jean-Philippe Bouchaud und Marc Mézard haben das vor einiger Zeit am Computer simuliert und sind dabei zu einem erstaunlichen Ergebnis gekommen: Die meisten Investoren gewinnen oder verlieren kleine Summen, manche gehen bankrott, doch einige wenige können den großen Reibach machen. Diese Reichen haben die besten Chancen, immer reicher zu werden; denn viel Kapital eröffnet die Möglichkeit zu vielfältigen Investitionsstrategien.



In den Augen des amerikanischen Physikers und Wissenschaftsjournalisten Mark Buchanan demonstriert dieses Simulationsexperiment nicht nur, dass die Einkommensschere sich zwangsläufig umso weiter öffnet, je mehr der ökonomische Bereich seiner Eigendynamik überlassen wird, sondern auch, dass die besonderen Charaktereigenschaften und Fähigkeiten eines Menschen in bestimmten Situationen für sein Schicksal ziemlich belanglos sind: Die in der Realität zu beobachtenden Unterschiede zwischen Arm und Reich treten in der Simulation selbst dann auf, wenn die simulierten Menschen sämtlich demselben Klon entstammen. Zur Erklärung dieses Phänomens muss man auf charakterliche Unterschiede nicht zurückgreifen.

Immer dann, wenn größere Anzahlen von Menschen in Interaktion geraten, entstehen durch einfache Rückkopplungseffekte

fekte komplexe Muster der Selbstorganisation. Diese ständig wiederkehrenden, quasi naturgesetzlichen Muster zu erforschen ist nach Buchanan die Aufgabe einer neuen Wissenschaft, die er »Sozialphysik« nennt. Sie behandelt in ihren Analysen die Akteure in der gesellschaftlichen Welt wie Atome und Moleküle und macht sowohl Anleihen bei Physik und Mathematik als auch bei der Soziologie, der Sozialpsychologie und der Wirtschaftswissenschaft.

Buchanan lehnt allerdings vehement die von vielen neoklassischen Ökonomen nach wie vor verfochtene Auffassung ab, der Mensch (»Homo oeconomicus«) strebe vollkommen rational nach der Maximierung seines Nutzens und habe für seine Mitmenschen keinen Gedanken übrig. Heftig beschimpft er den Wirtschaftswissenschaftler Gary Becker (Nobelpreis 1992), der in Anwendung dieses Konzepts auf das Sozialverhalten behauptet, ein Mensch würde immer dann ein Verbrechen begehen, wenn er nach sorgfältiger Kosten-Nutzen-Analyse zu dem Schluss gelangt, dass sich die Sache für ihn lohnen würde. Derartige Erklärungsansätze, so Buchanan, ersetzen Menschen aus Fleisch und Blut durch Pseudosubjekte ohne Körper, Geschichte und Gesellschaft und übersehen obendrein, dass es nicht in erster Linie Individuen, sondern Gruppen sind, die miteinander konkurrieren und gegeneinander kämpfen – und dass Menschen ihrer eigenen Gruppe gegenüber völlig anders eingestellt sind als fremden Gruppen

gegenüber. Obendrein spreche vieles für die Annahme der Evolutionspsychologie, dass das menschliche Gehirn dazu bestimmt sei, mit den Anforderungen einer Welt der Jäger und Sammler zurechtzukommen, sich aber schwer damit tue, kompliziertere Berechnungen durchzuführen oder statistische Wahrscheinlichkeiten einigermaßen korrekt einzuschätzen.

Buchanan verdeutlicht seine Kritik an einem aussagekräftigen Beispiel. Im Jahr 1987 erschien in einer Ausgabe der »Financial Times« eine Anzeige für ein ungewöhnliches Preisrätsel. Um daran teilzunehmen, brauchte man sich bloß eine Zahl zwischen 0 und 100 auszudenken und sie dann einzusenden. Es sollte derjenige gewinnen, dessen Zahl dem Wert von zwei Dritteln des Durchschnittswerts aller eingeschickten Zahlen am nächsten kam.

Wären nun sämtliche Teilnehmer völlig willkürlich vorgegangen, hätte sich als Durchschnittswert 50 ergeben – und es wäre am sinnvollsten gewesen, auf die 33 zu setzen. Wenn man aber unterstellt, dass alle Teilnehmer absolut rational wählten, ergäbe sich ein extrem kleiner Wert. Am Ende gewann allerdings der Spieler, der auf die 13 getippt hatte.

Zwischen den Modellen der ökonomischen Spieltheorie und dem tatsächlichen Alltagsverhalten besteht also eine beträchtliche Diskrepanz, und ein besseres Modell ist nicht einfach zu finden: Sind nämlich die Versuchspersonen einigermaßen

clever und verfügen sie über Vorerfahrungen mit dem Spiel, so schaffen sie es zu erraten, was in den Köpfen ihrer Gegenspieler vor sich geht (Spektrum der Wissenschaft 2/1998, S. 16, 5/2003, S. 14, und 2/2008, S. 76).

Buchanan erhebt den Anspruch, mit seiner Sozialphysik Wesentliches zur Erklärung etlicher elementarer Phänomene beitragen zu können – von der Entstehung von Modetrends, Gerüchten, Verkehrsstaus, Börsencrashes und Revolutionen bis hin zu Altruismus, Moral und Gott. Diesem ehrgeizigen Anspruch wird er im Großen und Ganzen gerecht. Es gelingt ihm allerdings nicht, historischen Ereignissen wie dem Zusammenbruch des sowjetischen Imperiums auf den Grund zu gehen. Man kann Buchanan auch vorwerfen, zu Übervereinfachungen zu neigen und sich mitunter zu wenig um Details zu kümmern.

Gleichwohl ist sein Werk eines der originellsten und aufschlussreichsten Bücher der letzten Zeit.

Frank Ufen

Der Rezensent ist freier Wissenschaftsjournalist in Marne.

Mark Buchanan

Warum die Reichen immer reicher werden und Ihr Nachbar so aussieht wie Sie

Neue Erkenntnisse aus der Sozialphysik

Aus dem Englischen von Birgit Schöbitz.
Campus, Frankfurt am Main 2008. 262 Seiten,
€ 24,90

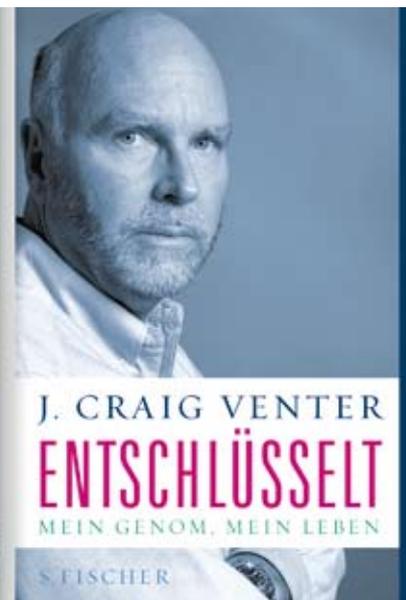
www.fischerverlage.de

»Dank dem aggressiven und abgebrühten Craig Venter kann die Welt die Partitur des menschlichen Genoms lesen.«
Time Magazine

»Mister Genom« erzählt sein Leben

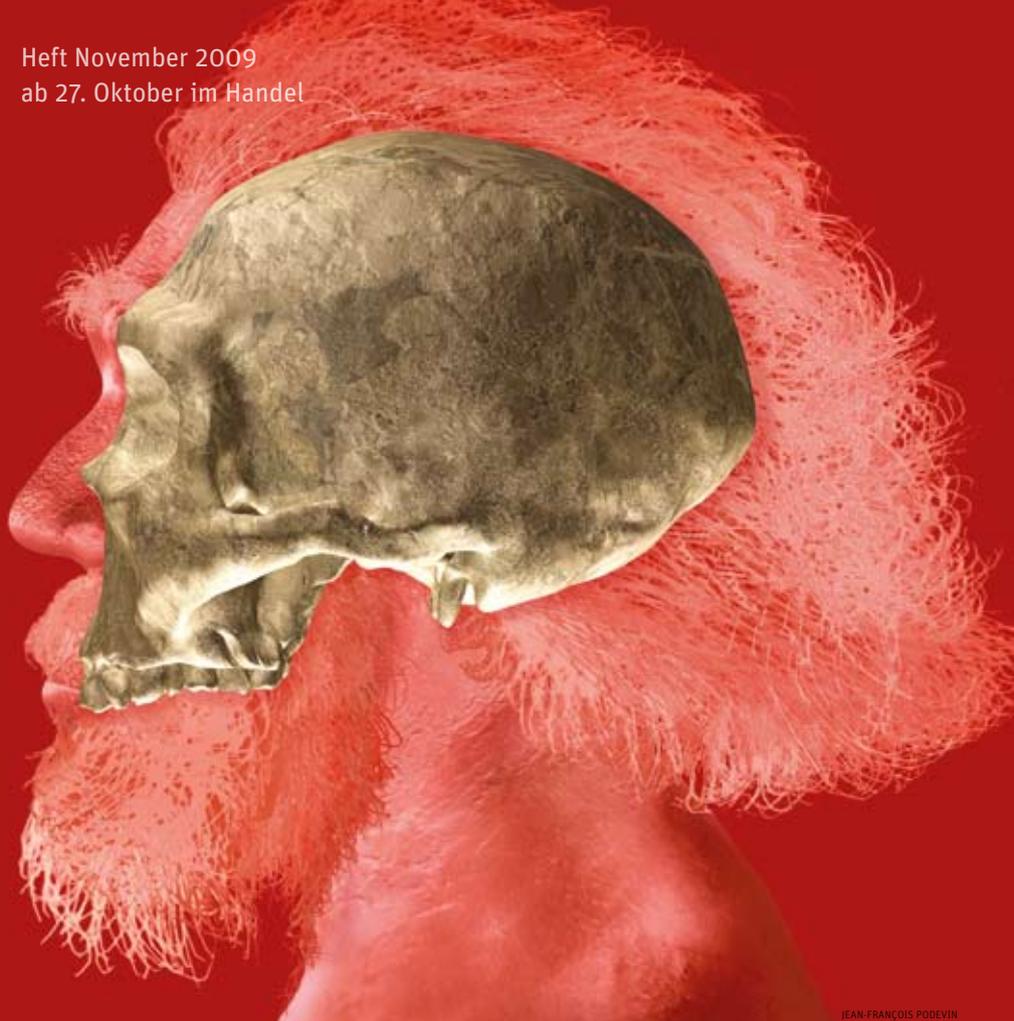
Erfolgreich, gehasst, bewundert: Craig Venter, der Mann, der als Erster das menschliche Genom entschlüsselt hat. Sein eigenes Genom diente ihm als Forschungsmaterial. In seiner Autobiographie erzählt er, wie er vom unauffälligen Studenten zum Militärarzt mit Einsatz in Vietnam wurde und Mitte der 1980er Jahre seine Chance sah und ergriff: das Sequenzieren von Genomen. Unabhängig und stets provozierend, verkörpert er einen neuen Typus von Wissenschaftler.

576 Seiten, gebunden, € (D) 24,95, sFr. 42,90 (UVP) Ein Buch von S. FISCHER



Neandertaler gegen *Homo sapiens*

Warum starb der Neandertaler aus? Hat ihn der moderne Mensch verdrängt? Noch immer gibt das Verschwinden unserer engsten Verwandten Rätsel auf



JEAN-FRANÇOIS PODEVIN

WEITERE THEMEN IM NOVEMBER

Schnelle Bits

Winzige magnetische Bereiche, die auf Nanodrähten hin- und herrasen, haben das Potenzial, fast alle Arten bisheriger Datenspeicher zu ersetzen

Kampf gegen das Aids-Virus

Warum das Immunschwächevirus HIV so schwer auszutricksen ist

Möchten Sie stets über die Themen und Autoren eines neuen Hefts auf dem Laufenden sein?

Wir informieren Sie gern per E-Mail – damit Sie nichts verpassen!

Kostenfreie Registrierung unter:

www.spektrum.com/newsletter



JEN CHRISTIANSEN

ERDE 3.0

Phosphor wird knapp

Die Phosphatvorkommen für Dünger reichen nur noch wenige Jahrzehnte. Dann droht ein Kollaps der Landwirtschaft

Die beiden Seiten des Mondes

Warum unterscheidet sich die Vorderseite des Erdtrabanten so stark von der uns abgewandten Rückseite? Jetzt gibt es eine neue Theorie, die das erklären könnte



SMITHSONIAN INSTITUTION / CHIP CLARK