

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

ÖKOLOGIE
Wie das Klimagas
CO₂ das Leben im
Meer bedroht

FEBRUAR 2011

Spektrum
DER WISSENSCHAFT
2/11

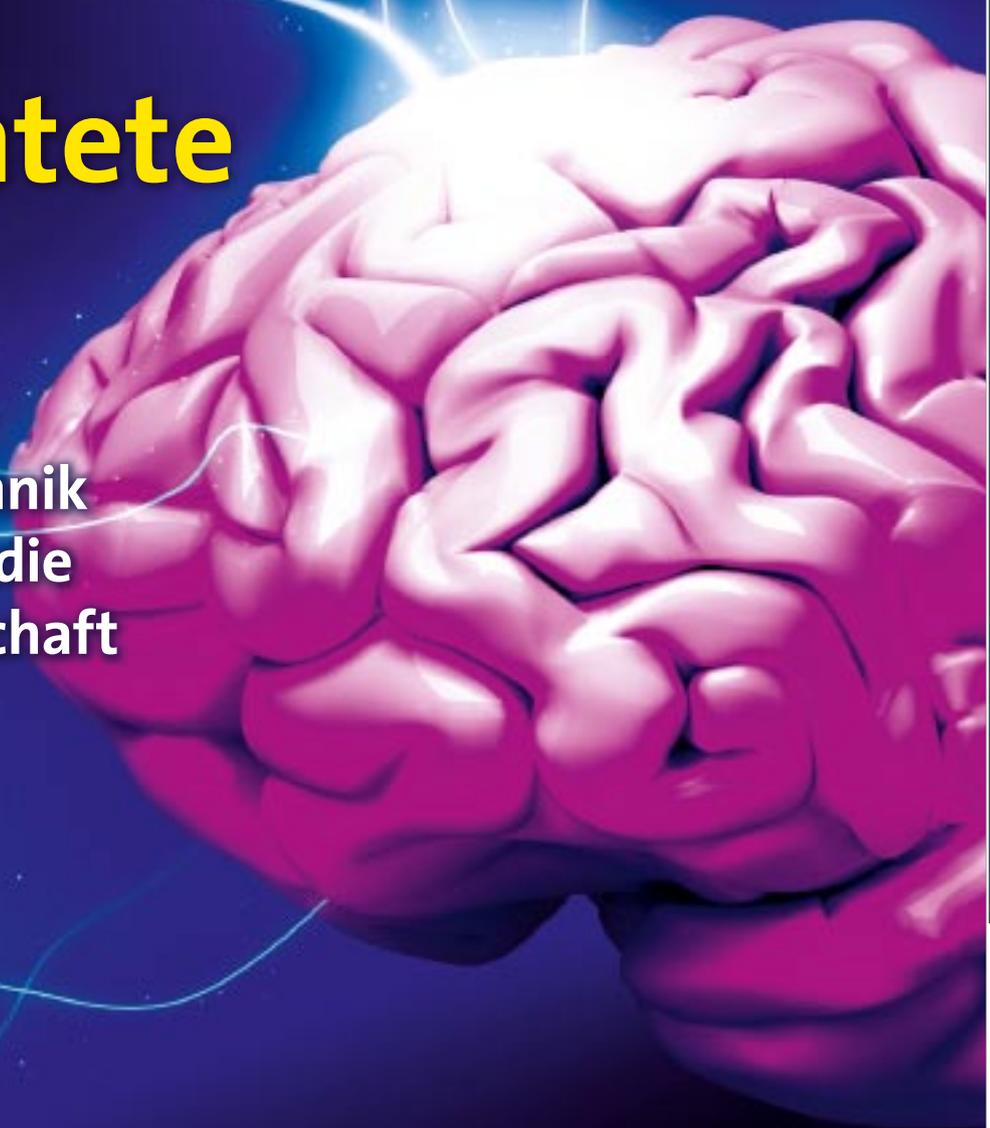
URGESCHICHTE
Rätselhafte Symbole in
Höhlenmalereien

ASTROPHYSIK
Neue Einsichten in die
Entstehung von Sternen

COMPUTER
Die Mikrochips
der Zukunft

Das erleuchtete Gehirn

Optogenetik –
eine neue Technik
revolutioniert die
Neurowissenschaft



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





Carsten Könneker
Chefredakteur
koenneker@spektrum.com

Hirnforschung mit Licht

Wenn Wissenschaftler Superlative bemühen, um die eigene Forschung zu beschreiben, sollten Journalisten besonders kritisch hinschauen. Denn viel zu häufig entpuppten sich vermeintliche Durchbrüche in der Vergangenheit als von handfesten Interessen getriebener Verkündigungsslang in Richtung Forschungsförderung. Gerade Neurowissenschaftler warteten zuletzt mit einer Reihe von »Revolutionen« auf – priesen etwa die 1995 entdeckten Spiegelneurone als biologische Basis menschlicher Kommunikation oder stießen Debatten an über Willensfreiheit und ein neues Menschenbild.

Und nun eine weitere Umwälzung, wie wir in der Unterzeile unserer Titelseite selbst texten? In der Tat geht es um etwas Großes: eine neue Technik der biologischen Grundlagenforschung, deren Erfolge oder Misserfolge in der medizinischen Anwendung man einst nüchtern bilanzieren wird. Die Rede ist von der Optogenetik. Diese innovative Methode, über die wir erstmals im Mai 2009 berichteten, ermöglicht es Wissenschaftlern, das Verhalten von Zellen durch Licht zu steuern. Indem sie Gene für lichtempfindliche Proteine gezielt in Neurone einführen, können Forscher die Hirnfunktionen frei umherlaufender Tiere in nie da gewesener Präzision untersuchen und beeinflussen. Diesen Durchbruch kürte die Fachzeitschrift »nature methods« im Dezember als wissenschaftliche Methode des Jahres 2010. Einer der beiden Forscher, die 2006 den Begriff »Optogenetik« schufen, und bis heute einer ihrer wichtigsten Vertreter ist der Psychiater Karl Deisseroth von der Stanford University. Ab S. 22 beschreibt der Mediziner, wie er aus Frust über die bis heute unzureichenden Behandlungsmöglichkeiten psychiatrisch-neurologischer Erkrankungen zu einem Pionier der neurowissenschaftlichen Grundlagenforschung wurde – und welche therapeutischen Anwendungen er für die Optogenetik ausmacht. So könnte die Methode neue Behandlungsansätze für Morbus Parkinson, Schizophrenie, Autismus, Narkolepsie und weitere Störungen liefern. Diese medizinischen Umwälzungen stehen vorerst freilich noch aus.

Eine gute Lektüre wünscht
Ihr

Carsten Könneker



NEU AM KIOSK!

Soeben erschien unser **Spezial 1/2011 »Rituale«** mit Artikeln von Axel Michaels, Wolf Singer, Volker Sommer und anderen. Themen darin: Rituale – notwendig für unser Überleben oder überflüssiges evolutionäres Erbe? • Rituale in der Wirtschaft • Neurobiologische Grundlagen • Heilung und Selbstfindung durch Trance und Ekstase • Liebes- und Familienrituale • Religiöse Rituale im Internet

AUTOREN IN DIESEM HEFT



Wie aus interstellaren Gaswolken Sterne entstehen, ist seit Langem in Lehrbüchern nachzulesen. Doch das herkömmliche Modell hat Lücken, kritisiert der Astrophysiker **Erick T. Young**, wissenschaftlicher Direktor des Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy (SOFIA). Ab S. 46 diskutiert er neue Ansätze, sie zu schließen.



Welche Rolle spielen Werte für die Wissenschaft? Eine unvermeidliche, ja sogar konstruktive, argumentiert der Philosoph **Martin Carrier** von der Universität Bielefeld in seinem Essay ab S. 66.



Nirgends gibt es so gewaltige Bergstürze wie in den Hochgebirgen des Karakorum und des Himalaja. Der Geograf **Kenneth Hewitt** von der Wilfried Laurier University in Ontario erforscht die Ursachen dieser dramatischen Abgänge – und ihre mitunter positiven Auswirkungen (ab S. 72).



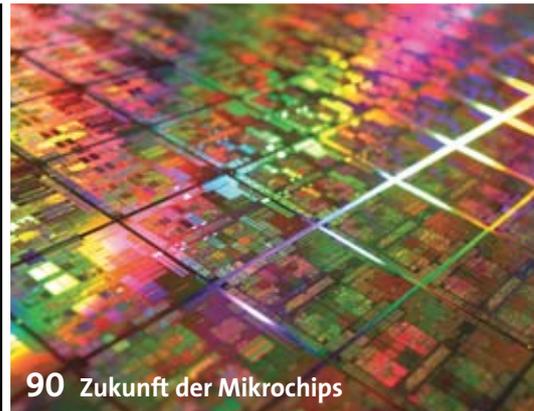
46 Sternentstehung



60 Rätselhafte Höhlenmalereien



82 Versauerung der Meere



90 Zukunft der Mikrochips

BIOLOGIE & MEDIZIN

PHYSIK & ASTRONOMIE

MENSCH & KULTUR

TITELTHEMA

► 22 Lichtschalter im Gehirn

Karl Deisseroth

Die Optogenetik ermöglicht Hirnforschern und Psychiatern, unser Denkorgan in bisher ungeahnter Detailgenauigkeit zu untersuchen

30 Maulwurf-Alarm à la Darwin

Kenneth Catania

Was lässt Regenwürmer mitunter massenhaft an die Erdoberfläche fliehen? Erst jetzt fand ein Forscher die Antwort auf diese alte Frage

34 Die vertagte Revolution

Stephen S. Hall

Noch hat sich das Versprechen des Humangenomprojekts nicht erfüllt: eine individualisierte Medizin. Setzen die Forscher auf die falsche Strategie?

► 46 Die Geburt der Sterne

Erick T. Young

Sonnen entstehen, wenn interstellare Wolken kollabieren. Doch was löst diese Ereignisse aus?

SCHLICHTING!

54 Virtuelle Welten unter dem Fußboden

H. Joachim Schlichting

Das Phänomen der spiegelnden Reflexion ist uns weniger vertraut, als wir denken. Bisweilen konkurriert es sogar mit Schattenbildern

PHYSIKALISCHE UNTERHALTUNGEN

56 Bezaubernde Bildnisse

Norbert Treitz

Die klassische Strahlenoptik mit ihren realen und virtuellen Bildern hält allerlei Überraschungseffekte bereit

► 60 Der prähistorische Kode

Kate Ravilious

In zahlreichen mehr als 30 000 Jahre alten Höhlenmalereien entdeckten Forscher mysteriöse Zeichen. Offenbar benutzten unsere Vorfahren schon damals Symbolsysteme, um Informationen zu übermitteln

ESSAY

66 Werte in der Wissenschaft

Martin Carrier

Wissenschaft soll objektiv sein, also frei von subjektiven Werten. Doch in Wirklichkeit bewegt sich alle Forschung im Spannungsfeld vieler unterschiedlicher Werte – was den Erkenntnisprozess aber nicht stören muss!

22

TITELTHEMA

Optogenetik: Hirnforschung mit Licht

ERDE & UMWELT

72 Nützliche Katastrophen

Kenneth Hewitt

Immer wieder rasen im Karakorum und im Himalaja Millionen Tonnen von Gestein zu Tal. Solche Bergstürze der Megaklasse verändern die Landschaft – und haben die Besiedlung der Hochtäler in vielen Fällen erst möglich gemacht



► 82 Ozeane in Gefahr

Marah J. Hardt und Carl Safina

Durch die Zunahme von Kohlendioxid in der Atmosphäre wird das Meer saurer. Das gefährdet Wachstum und Vermehrung der unterschiedlichsten Organismen, vom Plankton bis zu Kalmaren

TECHNIK & COMPUTER

► 90 Die Zukunft der Mikrochips

Mark Fischetti

Zahlreiche neue Ideen nähern sich der Realisierung – und werden dringend gebraucht. Denn das alte Erfolgsrezept »Miniaturisierung« stößt an seine physikalischen Grenzen

Titelmotiv: iStockphoto / Andrey Volodin [M]

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ► gekennzeichnet

SPEKTROGRAMM

- 8 Weshalb Diamant Diamant ritzt • Einzigartige Fossilien – vom Winde bewahrt • Saturnringe: Eis von Exmondern • Tumoren produzieren eigene Blutgefäße • Riesenstorch überragte Floresmenschen • Kleine Sehzentren lassen sich leichter täuschen

BILD DES MONATS

11 FEDRIGES FARBENFEUERWERK

FORSCHUNG AKTUELL

12 Kollision zweier Kleinplaneten

Astronomen entdecken Trümmer eines Asteroiden-Crashes von Anfang 2009

14 Müde Hörschnecke

Blockierter Nachschub an Botenstoffen verursacht Schwerhörigkeit

16 Blick durch die Wand

Übertragung eines Bilds durch ein lichtstreuendes Material hindurch

19 Radikale Therapie von Schlaganfällen

Das Abschalten eines Enzyms verhindert, dass Nervenzellen nach der Durchblutungsstörung absterben

21 Springers Einwürfe

Wie frei bleibt das Internet?

WEITERE RUBRIKEN

- 3 Editorial
- 6 Leserbrief/Impressum
- 98 Rezensionen
 - Louann Brizendine:* Das männliche Gehirn
 - David Baker, Tod Ratcliff:* Extreme Orte
 - Len Fisher:* Schere, Stein, Papier u. a.
- 104 Im Rückblick
 - Vom Ende der Dampflok bis zur Geburtsstunde des Geschirrspülautomaten
- 106 Vorschau

Effektiver Weg zum Klimaschutz?

Klaus S. Lackner sieht im industriellen Einsatz von CO₂-Luftfiltern Chancen, dem Treibhauseffekt entgegenzuwirken. (»Große Wäsche für das Klima«, Januar 2011, S. 70)

Dr. Peter Klamsner, Egel: Natürlich kann man durch entsprechende Filter Kohlendioxid aus der Atmosphäre oder aus dem Abgas von Kraftwerken entfernen. Ob das jemals sinnvoll und bezahlbar sein wird, ist aber eine ganz andere Frage. Der Gesamtbedarf an CO₂ für die Karbonatindustrie in Deutschland liegt bei weit über 800 000 Tonnen pro Jahr, wie in dem Beitrag dargestellt. Das ist aber keine Lösung, da das Kohlendioxid zumindest teilweise wieder freigesetzt und somit nicht langfristig der Atmosphäre entzogen wird. Insofern dient eine wirtschaftliche Nebennutzung nicht dem Klimaschutz.

Für die Kohlendioxid-speicherung eignen sich vermutlich allenfalls ehemalige Erdgaslagerstätten unterhalb des Zechsteins, da die Salzformationen dort mit ihren extrem niedrigen Permeabilitäten über geologische Zeiträume gezeigt haben, dass sie als Fallenstruktur für Erdgas ausreichend dicht

Ein mögliches Konzept gegen die globale Erwärmung wären spezielle »Waschmaschinen«, die der Atmosphäre Kohlendioxid entziehen.

sind. Insbesondere der Transport via Pipeline ist aber ein oft vernachlässigtes Problem, denn die Viskosität von Kohlendioxid bei 20 Grad Celsius und 100 Bar ist sechsmal höher als die von Methan, der Energieaufwand also höher. Zudem sind die Speicher sehr schnell gefüllt, da ein Mol CO₂ die 3,6-fache molare Masse von einem Mol Kohlenstoff hat. Das ist ein Kernproblem des *Carbon Capture, Transport and Storage* (CCTS).

Effektiver und wirtschaftlicher wäre es, den Kohlenstoff aus der Biomasse zu entziehen, nämlich durch Verkoken von Biomasse. Diese kann sich dann nicht mehr zersetzen und dabei Kohlendioxid oder Methan freisetzen. Die Verfahren dafür existieren seit Langem; Koks gast nicht mehr aus und lässt sich einfach lagern.

Nicht nur der Speiseplan zählt

Der Paläontologe Gareth Dyke erklärte, warum die Vogelvorfahren vor 65 Millionen Jahren nicht mit anderen Arten untergingen. (»Zeitgenossen der Dinosaurier«, Januar 2011, S. 30)

Dr. T. Grassl, Lübeck: Wenn sich vor 65 Millionen Jahren das Klima schlagartig, zu schnell für die evolutionäre Anpassungsfähigkeit, geändert hat, waren die Auswirkungen auf stationäre Ökosysteme dramatisch. Der Autor legt schön dar, dass sich die Vögel in ihrem Körperbau und Speiseplan deutlich unterschieden, dadurch leiten sich aber auch andere Gewohnheiten und Flugvoraussetzungen ab. Bei der Frage »Warum überlebte genau eine Art Vögel, zum Bei-

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 € 7,90 (D/A) / € 8,50 (L/Sfr. 14,-); im Abonnement € 84,00 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 69,90. Die Preise beinhalten € 8,40 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 8,40 Portomehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70). Die Mitglieder des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBio) und von Mensa e.V. erhalten 5dW zum Vorzugspreis.

Anzeigen: iq media marketing gmbh, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH, Bereichsleitung Anzeigen: Marianne Dölz; Anzeigenleitung: Katrin Kanzok, Tel. 0211 887-2483, Fax 0211 887 97-2483; verantwortlich für Anzeigen: Ute Wellmann, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2481, Fax 0211 887-2686

Anzeigenvertretung: Hamburg: Matthias Meißner, Brandstwierte 1, 6. OG, 20457 Hamburg, Tel. 040 30183-210, Fax 040 30183-283; Düsseldorf: Ursula Haslauer, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2053, Fax 0211 887-2099; Frankfurt: Thomas Wolter, Eschersheimer Landstraße 50, 60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 2424-4507, Fax 069 2424-4555; München: Jörg Bönsch, Nymphenburger Straße 14, 80335 München, Tel. 089 545907-18, Fax 089 545907-24; Kundenbetreuung Branchenteams: Tel. 0211 887-3355, branchenbetreuung@iqm.de

Druckunterlagen an: iq media marketing gmbh, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 32 vom 01.01. 2011. **Gesamtherstellung:** L.N. Schaffrath Druckmedien GmbH & Co. KG, Marktweg 42–50, 47608 Geldern

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

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

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN

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



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



Spektrum

DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. Carsten Könneker (vi.S.d.P.)

Redaktionsleiter: Dr. Hartwig Hanser (Monatshefte), Dr. Gerhard Trageser (Sonderhefte)

Redaktion: Thilo Körkel (Online-Koordinator), Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Jan Osterkamp (Spektrumprogramm), Dr. Christoph Pöppe, Dr. Adelheid Stahnke

E-Mail: redaktion@spektrum.com

Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer

Entwicklungsredaktion: Dr. Reinhard Breuer (Ltg.)

Art Direction: Karsten Kramarczik

Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Anke Heinzlmann,

Claus Schäfer, Natalie Schäfer

Schlussredaktion: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies,

Katharina Werle

Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe

Redaktionsassistent: Britta Feuerstein, Petra Mers

Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg,

Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729

Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH,

Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg;

Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg,

Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751;

Amtsgericht Mannheim, HRB 33814

Verlagsleiter: Richard Zinken

Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck

Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733

Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741,

E-Mail: service@spektrum.com

Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744

Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Markus Fischer,

Dr. Susanne Lipps-Breda, Dr. Ursula Loos, Dr. Andreas Nestke,

Claus-Peter Sesin, Dr. Michael Springer, Dr. Sebastian Vogel.

Leser- und Bestellservice: Helga Emmerich, Sabine Häusser,

Ute Park, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.com

spiel Enten (besonders gut)?« fällt nicht nur deren vielseitiger Speiseplan ins Gewicht, sondern auch etwa die Möglichkeit, kurzfristige extremere Schwankungen (etwa jahreszeitliche wie heute auch) als Zugvögel zu bewältigen.

Zurück zum Zweikampf!

Die rasante Entwicklung von Militärrobotern zieht laut P.W. Singer auch ethische Fragen nach sich. (»Der ferngesteuerte Krieg«, Dezember 2010, S. 70)

Dr. jur. Karl Ulrich Voss, Burscheid: Es ist nicht ungewöhnlich, dass Machthaber Kriegshandlungen entformalisieren oder tarnen. So können sie diese elegant aus der rechtlichen beziehungsweise demokratischen Kontrolle heraushalten. Fernwirkende oder automatisierte Waffen, Söldnersysteme, das so genannte *targeting/decapitating* und der Verzicht auf Kriegserklärungen dienen ähnlichen Interessen, sind aber alle kurzsichtig.

Schon Kant brandmarkte in seiner hellsichtigen Schrift »Zum ewigen Frieden« alle Feindseligkeiten, die ohnmächtigen Hass schüren und das wechselseitige Vertrauen in einen künftigen Frieden unmöglich machen, als »ehrlose Stratagemen«, etwa auch die Anstellung von Meuchelmördern.

Heute müsste er die Drohnen einbeziehen. Alle diese Strategien sind kurzsichtig, weil der mit einem ähnlichen Denkkapparat gesegnete Gegner nur

neue Wege ersinnen muss und wird, um die Kriegswirkung seinerseits wieder zurück zum Volk, zum eigentlichen Ressourcengeber zu tragen, etwa durch Terrorismus.

Kant plädierte dafür, dass das Volk unmittelbar über die Kriegshandlungen entscheiden sollte, und – mit einem Augenzwinkern – für die Rückkehr zum guten alten Zweikampf der Häuptlinge, wo Plan, Ausführung und rückkoppelndes Schmerzempfinden ohne jeglichen Signalverlust oder Irrtum in einer Person zusammenfallen, wo verheerende und endlose Waffengänge dann per definitionem ausgeschlossen sind.

Tier oder Sache?

Reinhard Breuer stellte unseren Umgang mit Tieren zur Diskussion. (»Warum wollen wir Tiere schützen?«, Editorial, Dezember 2010, S. 3)

Seán Fobbe, München: Es mag sein, dass Tiere seit 1990 im Sinn des bürgerlichen Rechts keine Sache mehr sind, jedoch werden die Vorschriften für Sachen auf Tiere entsprechend angewandt. Es besteht also kein praktischer Unterschied zu vorher – es handelt sich lediglich um ein (folgenloses) Bekenntnis zum Tierschutz. Auch gilt dies nur für den zivilrechtlichen Sachenbegriff; Tiere sind auch weiterhin Sachen im Sinn des Strafrechts.

Das Quälen eines fremden Tiers kann daher – damals wie heute – eine Sachbeschädigung sein. Die Betonung liegt allerdings auf »fremd«. Die wirkliche Errungenschaft des Verbots der Tierquälerei in § 17 TierSchG liegt darin, dass man auch mit Tieren, deren Eigentümer man ist oder die man »benutzen« (Tierversuch) darf, nicht verfahren kann, wie es einem beliebt. Quält man ein fremdes Tier, so sind beide Straftatbestände erfüllt.

Weniger Fleisch essen

Der Tierethiker Jörg Luy erhob fünf Forderungen, um Tiere besser zu schützen. (»Welche Rechte haben Tiere?«, Dezember 2010, S. 80)

FOLGEN SIE UNS
IM INTERNET



www.spektrum.de/facebook



www.spektrum.de/youtube



www.spektrum.de/studivz



www.spektrum.de/twitter

Gerd Zelck, Seevetal: Ich folge hier der Regel 1 des Sittengesetzes: »Was du nicht willst, das man dir tu, das füge keinem anderen zu.« Der Mensch gehört zu den Allesfressern, und ich sehe keinen sachlichen Grund dafür, auf Fleisch oder sogar auf tierische Produkte ganz zu verzichten. Auch sehe ich kein Argument, das dagegen spricht, hierfür Tiere zu halten. Für die Dauer ihres Lebens sollte aber alles so geschehen, dass sich die Tiere entsprechend ihrer Art wohl fühlen und bis zum Eintritt ihres zweckbestimmten Todes keinem Stress ausgesetzt werden.

Bei entsprechenden Diskussionen wird mir regelmäßig vorgehalten, dass dadurch die betroffenen Nahrungsmittel teurer und hierbei insbesondere arme und einkommensschwache Menschen getroffen würden. »Na und?«, kann ich da nur entgegnen, »dann soll weniger Fleisch gegessen werden.« Ein bis zweimal die Woche genügt durchaus, wirkt der Fettleibigkeit entgegen und ist dabei auch aus anderen Gründen noch gesünder.

Erratum

»Nova produziert Gammastrahlung«, Forschung aktuell, Januar 2011, S. 14
Es muss auf S. 15 heißen: »So verliert der Rote Riese von V407 Cygni pro Jahr etwas ein Zehntel der Erdmasse an den umgebenden Weltraum.«

BRIEFE AN DIE REDAKTION

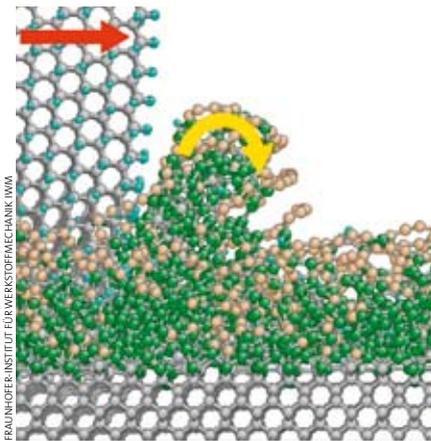
... sind willkommen! Schreiben Sie uns auf www.spektrum.de/leserbriefe oder schreiben Sie mit Ihrer kompletten Adresse an:

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

Die vollständigen Leserbriefe finden Sie ebenfalls unter www.spektrum.de/leserbriefe

MATERIALWISSENSCHAFT

Weshalb Diamant Diamant ritzt



Zwischen Diamantkristallen, die aneinander reiben (roter Pfeil), bildet sich eine amorphe Kohlenstoffschicht, die weich genug ist, um abgetragen zu werden (gelber Pfeil). Die Farben der Kohlenstoffatome repräsentieren unterschiedliche chemische Wertigkeiten.

Eigentlich sollte sich ein Stoff ja nur von einem Material bearbeiten lassen, das härter ist als er selbst. Warum lässt sich dann ein Diamant mit Hilfe anderer Diamanten schleifen? Eine grobe Erklärung des Phänomens war bereits länger bekannt: In bestimmten Ausrichtungen zur Schleifscheibe erweist sich das Kohlenstoff-Kristallgitter des zu schleifenden Diamanten als weniger widerstandsfähig als in anderen. Physiker sprechen hier von Anisotropie. Der Schleifer muss deshalb den Diamanten im richtigen Winkel zur Schleifscheibe halten. Die feinen Diamantsplitter auf der Scheibe nehmen alle möglichen Orientierungen ein, darunter auch die »härteren«, wodurch sie den Rohdiamanten bearbeiten können.

Doch was genau dabei auf der atomaren Ebene geschieht, war bislang ungeklärt. In einer Computersimula-

tion berechneten nun Materialforscher um Lars Pastewka vom Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik, dass sich an der Kontaktstelle zwischen zwei Diamantkristallen unter hohem Druck eine Schicht ungeordneter Kohlenstoffatome bildet. Diese können kurzzeitig die Atome des Kristallgitters binden und sie mitreißen. Nach und nach entsteht dabei eine Schicht aus amorphem, glasartigem Kohlenstoff, die viel weniger stabil ist. Diese Schicht bildet sich auf der »weichen« Seite des Diamanten schneller als auf der »harten«. Zum einen wird sie dann von den scharfen Diamantsplittern auf der Schleifscheibe mechanisch abgehobelt, zum anderen reagieren Kohlenstoffatome an ihrer Oberfläche mit Sauerstoff aus der Luft zu gasförmigem Kohlendioxid.

Nat. Mat. 10, S. 34–38, 2011

PALÄONTOLOGIE

Einzigartige Fossilien – vom Winde bewahrt

Der Soom-Schiefer in Südafrika ist eine außergewöhnliche Fossilagerstätte: Hier finden sich versteinerte Meeresorganismen, die andernorts auf der Welt kaum erhalten sind. Paläontologen entdeckten dort rund eine halbe Milliarde Jahre alte Überreste, bei denen sogar noch Augen, Muskeln und Eingeweide in zahllosen Details erkennbar sind. Der Grund für den Fossilienreichtum war allerdings bislang unklar.

Sarah Gabbott von der University of Leicester in England schlägt nun eine mögliche Erklärung vor. In der Kaltzeit gegen Ende des Ordoviziums vor etwa 443 Millionen Jahren war die heutige Fossilagerstätte noch ein flaches Schelfmeer, über das starke, stetige Winde vom Festland her bliesen. Sie trugen dabei feine, nährstoffreiche Lösspartikel aus dem vegetationsarmen Gletschervorland auf das

Flachmeer, vermutet Gabbott angesichts des hohen Lössgehalts im Soom-Schiefer. Diese Düngung bildete die Grundlage für vielfältiges Leben. Ähnliche Prozesse sorgen heute zum Beispiel für den ausgeprägten Artenreichtum am McMurdo-Eisschelf in der Antarktis.

Die immense Menge an nährstoffreichem Löss, die im Erdaltertum auf das Soom-Meer geblasen wurde, überdüngte dann jedoch wohl das blühende Ökosystem und ließ das Schelfmeer »umkippen«: Die ausufernde Bioproduktion führte immer wieder zu Sauerstoffknappheit und Massensterben. Unter Luftabschluss wurden die Organismen dann vom Löss bedeckt und in dicke Sedimentschichten eingebettet, um in einzigartigem Detailreichtum bis heute zu überdauern.

Geology 38, S. 1103–1106, 2010



Der Soom-Schiefer in Südafrika konserviert Organismen wie diesen Seeskorpion seit Hunderten von Millionen Jahren. Günstige Bedingungen während der Fossilisation haben sogar viele Weichteildetails erhalten.

ASTRONOMIE

Saturnringe: Eis von Exmond



Die Ringe des Saturns bestehen zu 95 Prozent aus gefrorenem Wasser. Es stammt vermutlich von den abgeschälten Eishüllen von Monden, die vor langer Zeit in den Gasriesen stürzten.

Die Ringe des Saturns sind zwar höchst dekorativ, ihre Herkunft ist jedoch bislang recht mysteriös. Vor allem ihre Zusammensetzung bereitet Planetenforschern seit Langem Kopfzerbrechen: Sie bestehen zu fast 95 Prozent aus gefrorenem Wasser, unter das sich nur wenige Staubkörner und Felsbröck-

chen mischen. Das passt nicht zur Hypothese, es handele sich dabei um Überreste von miteinander kollidierten Monden. Zeit für neue Denkansätze, dachte sich daher Robin Canup vom Southwest Research Institute in Boulder, Colorado.

Detaillierte Computersimulationen führten die Astronomin nun zu einem

Modell, das die Besonderheiten des Systems deutlich besser erklärt. Canup geht davon aus, dass in der Frühphase des Sonnensystems mehrere sehr große, eisbedeckte Monde um den jungen Gasplaneten kreisten, der damals noch stärker aufgebläht war. Ihr Modell erklärte, wie ein großer Satellit die äußere Gasatmosphäre des Saturns durchflog. Diese bremste ihn nach und nach ab – worauf er schließlich auf den Planeten stürzte.

Zuvor schälte aber die enorme Gravitation den Mond aus seiner Eishülle: Während der Fels- und Metallkern in den Saturnwolken versank, verblieb das gefrorene Wasser jeweils im Orbit. Dies geschah offenbar mehrmals, bis der Saturn kompakter wurde und sich die Bahnen der verbliebenen Begleiter stabilisierten. Übrig blieb am Ende nur einer der Riesenmonde, Titan – und viel Wassereis, aus dem sich die Ringe formten. Einiges davon dürften hindurchfliegende Brocken aufgesammelt haben, die dabei immer größer wurden. So entstanden dann kleine Monde wie Tethys, der fast komplett aus gefrorenem Wasser besteht.

Nature 10.1038/nature09661, 2010

MEDIZIN

Tumoren produzieren eigene Blutgefäße

Seit einigen Jahren setzen Krebsforscher große Hoffnungen auf Medikamente, die Tumoren von der Blutversorgung abschneiden und so aushungern sollen. Doch beobachteten Ärzte immer wieder, dass die Wirkstoffe nur begrenzte Zeit helfen. Dies könnte auch daran liegen, dass unausgereifte Krebszellen sich in Blutgefäßzellen umwandeln und so ein neues Versorgungssystem für den Tumor schaffen können, meinen jetzt zwei Forschergruppen.

Die Teams von Viviane Tabar vom Memorial Sloan Kettering Cancer Center in New York und von Ruggero

De Maria vom Istituto Superiore di Sanità in Rom verglichen zunächst das Erbgut verschiedener Zellen aus Gewebeproben von Glioblastomen – aggressiven Hirntumoren. Dabei stellten sie fest, dass die Wandzellen der Blutgefäße und der Ursprungstumor anscheinend genetisch identisch sind. Die Forscher vermuten, dass die Gefäßwände sich aus einer Art Tumorstammzelle entwickelt haben, und isolierten diese Zellen, die sich in verschiedene Zelltypen differenzieren können, aus Krebsgewebe. Als sie sie in Mäuse implantierten, bildeten sich neue Blutgefäße –

offenbar aus den verpflanzten Stammzellen.

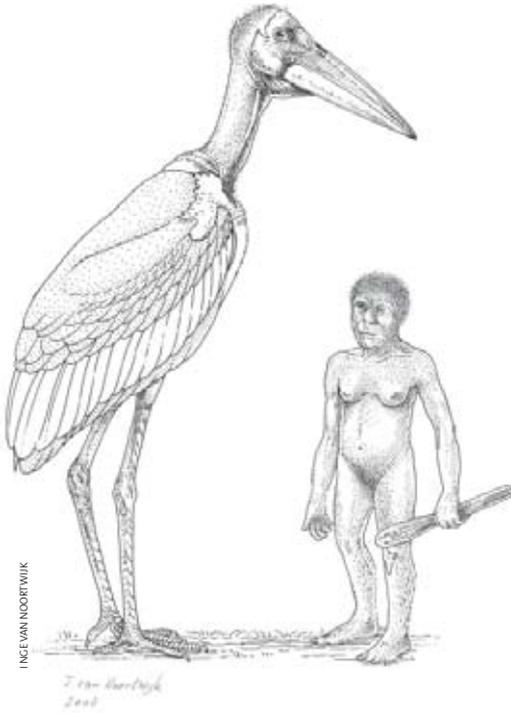
Tabar und ihre Kollegen behandelten die Zellen zudem mit dem Wirkstoff Bevacizumab, der in der Krebsbehandlung eingesetzt wird. Als Angiogenesehemmer hindert er Tumoren daran, im Körper das Blutgefäßwachstum anzuregen. In dem Experiment unterband das Medikament jedoch nicht die Umwandlung der Tumorstammzellen in Gefäßzellen. Auf diesem Weg, fürchtet Tabar, könnten Tumoren die Blockade womöglich schnell umgehen.

Nature 468, S. 824–828, 2010;

Nature 468, S. 829–833, 2010

PALÄONTOLOGIE

Riesenstorch überragte Floresmenschen



Der Riesenmarabu *Leptoptilos robustus* überragte mit 1,8 Meter Größe den Floresmenschen deutlich.

Auf der indonesischen Insel Flores lebte vor einigen zehntausend Jahren nicht nur der kleinwüchsige Floresmensch (*Homo floresiensis*), sondern auch eine riesige Storchenart, die mit 1,8 Meter Körpergröße die des »Hobbits« deutlich übertraf. Darauf deuten die imposanten Vogelfußknochen hin, die Hanneke Meijer vom Naturhistorischen Museum im niederländischen Leiden und Rokus Due vom Nationalen Zentrum für Archäologie in Jakarta während ihrer Ausgrabungsarbeiten in der Liang-Bua-Höhle auf Flores entdeckt haben.

Die 20 000 bis 50 000 Jahre alten fossilen Überreste von *Leptoptilos robustus*, einem zu den Marabus zählenden Riesenvogel, sind ungewöhnlich groß und schwer. Die Stärke der Knochenwände lässt die Forscher vermuten, dass der Storchgigant sich überwiegend zu Fuß fortbewegte. Überreste von Flügelknochen fehlen bislang aber noch, weshalb noch nicht

klar ist, ob er überhaupt fliegen konnte.

Im gleichen Höhlenabschnitt, in dem Meijer und Due *L. robustus* ausgruben, waren im September 2003 die Überreste des Floresmenschen gefunden worden, der nur einen Meter groß wurde. Daneben existierten auf Flores – das stets vom asiatischen Festland abgeschnitten war – auch Zwergelentzen, Riesenratten und überdimensionierte Eidechsen. Die typische Floresfauna bestätigt damit die Inseltheorie der Evolutionsbiologen, nach der sich Tierarten auf isolierten Eilanden zu Zwerg- oder Riesenformen entwickeln. Auf Flores sind alle diese Arten freilich längst ausgestorben. Schuld daran könnte ein Vulkanausbruch vor etwa 12 000 Jahren gewesen sein, vermuten die Forscher – die gefundenen Fossilien lagen unter einer dicken Ascheschicht begraben.

Zool. J. Linn. Soc. 160, S. 707–724, 2010

HIRNFORSCHUNG

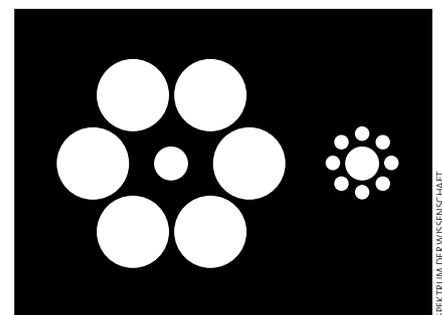
Kleine Sehzentren lassen sich leichter täuschen

Wie sehr sich jemand durch eine optische Illusion in die Irre führen lässt, hängt offenbar auch von der Größe seines Sehzentrum im Gehirn ab. Das zeigte ein Experiment von Neuroforschern um Samuel Schwarzkopf vom University College London. In ihrer Studie konfrontierten sie 30 Versuchspersonen mit Bildkarten, auf denen das Größenverhältnis zwischen verschiedenen Kreisen eingeschätzt werden sollte. Dabei wirkten einige davon größer, als sie tatsächlich waren. Bei manchen Probanden wirkte diese Illusion besonders ausgeprägt. Der anschließende Hirnscan im Computertomografen offenbarte: Probanden mit einem sehr kleinen primären Sehzentrum, auch V1 genannt, unterlagen der Täuschung

stärker als solche mit einem umfangreicheren V1.

Bei den beiden getesteten Illusionen – der Ebbinghaus- sowie der Ponzo-Täuschung – verführt die Umgebung zur Fehlinterpretation des anvisierten Objekts. Möglicherweise erklärt dies auch den neuen Befund, so die Forscher: Je umfangreicher V1, desto größer auch der Teil davon, der einem bestimmten Ausschnitt des Gesichtsfelds zugeordnet ist – und desto mehr Neurone beteiligen sich an der Verarbeitung des Gesehenen. Zugleich nimmt der Einfluss der umliegenden V1-Bereiche ab, was die Wahrnehmung schärft und die Probanden für den irreführenden Kontext der Kreise unempfindlicher macht.

Nat. Neurosci 10.1038/nn2706, 2010



Bei der Ebbinghaus-Täuschung erscheinen die zentralen Kreise verschieden groß – obwohl sie sich gar nicht unterscheiden.

Aktuelle Meldungen und Hintergründe finden Sie unter

spektrumdirekt.de



FOTO: JUSTIN MARSHALL, QUEENSLAND BRAIN INSTITUTE (QBI)

FEDRIGES FARBENFEUERWERK

Sie tanzen vor kritischem Publikum. Darum präsentieren männliche Lawes-Strahlenparadiesvögel (*Parotia lawesii*) ihren Zuschauerinnen neben kunstvollen Schrittfolgen auch ein wahres Feuerwerk an Farben auf der Brust. Die Federn der auf Neuguinea heimischen Vögel weisen für diesen Zweck eine einzigartige Struktur auf: Die in den »Seitenästen« abzweigenden Hakenstrahlen sind wie Bumerangs gebogen und reflektieren die einfallende Strahlung in unterschiedlichen Wellenlängen, je nach Winkel des einfallenden Lichts. So sorgen mal die zentralen Abschnitte für Gelb- und Orange-töne, mal die gebogenen Enden für schillerndes Blau. Am Waldboden mit seinen stark unterschiedlichen Lichtverhältnissen können die Freier so dramatische Farbspektakel bieten – und beispielsweise die schillernden Gefieder von Kolibris oder die Schuppen von Schmetterlingen weit in den Schatten stellen.

ASTRONOMIE

Kollision zweier Kleinplaneten

Stoßen Asteroiden manchmal zusammen? Bisher gab es nur für die ferne Vergangenheit Hinweise auf derartige Kollisionen. Kürzlich aber entdeckten Astronomen die Trümmer eines Asteroiden-Crashes, der erst Anfang 2009 stattfand.

VON THORSTEN DAMBECK

Im Januar 2010 stießen US-Astronomen bei der Suche nach erdnahen Asteroiden auf ein seltsames Himmelsobjekt. Wegen seines auffälligen Schweifs hielten sie es zunächst für einen Kometen. Gegen diese Auffassung sprach jedoch von Beginn an das Fehlen einer so genannten Koma. Diese diffuse Gaswolke bilden Kometen noch vor dem Schweif, wenn sie sich auf ihren elliptischen Umlaufbahnen der Sonne nähern. Inzwischen haben zwei Forschergruppen um David Jewitt von der University of California in Los Angeles (UCLA) und Colin Snodgrass vom Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung in Katlenburg-Lindau (MPS) unabhängig voneinander erkannt, dass es sich bei dem Objekt namens P/2010 A2

in Wahrheit um einen Trümmerhaufen handelt – entstanden bei der Kollision zweier Asteroiden (*Nature* 467, S. 814 und 819).

Millionen große und kleine Gesteinsbrocken umkreisen die Sonne zwischen den Bahnen von Mars und Jupiter. Vermutlich kommt es in dem dichten Gedränge dort immer wieder zu Kollisionen. Dafür spricht beispielsweise die Existenz ganzer Asteroidenfamilien, deren Mitglieder auffallend ähnliche Umlaufbahnen haben – weshalb Astronomen sie als Bruchstücke zusammengestoßener und dabei zerborstener Asteroiden deuten. Rund 50 solche Verbände sind bekannt. Auf größere Kollisionen weisen auch diffuse Staubbänder hin, die das Sonnensystem durchziehen und vor knapp zwei Jahrzehnten von einem Infrarotsatelliten entdeckt wurden.

Solche Indizien betreffen lange vergangene Ereignisse, die Zehntausende bis Milliarden von Jahren zurückliegen.

Die Trümmer des im Januar 2010 entdeckten Asteroiden-Crashes bilden einen Schweif, der eine rätselhafte x-förmige Struktur enthält. Dieses mit dem Weltraumteleskop Hubble aufgenommene Detailbild zeigt links als hellen Fleck den Überrest eines der beiden kollidierten Kleinplaneten.

Der Zusammenprall, den die zwei Forschergruppen nun analysiert haben, datiert dagegen nach den Rekonstruktionen beider Teams auf Anfang 2009.

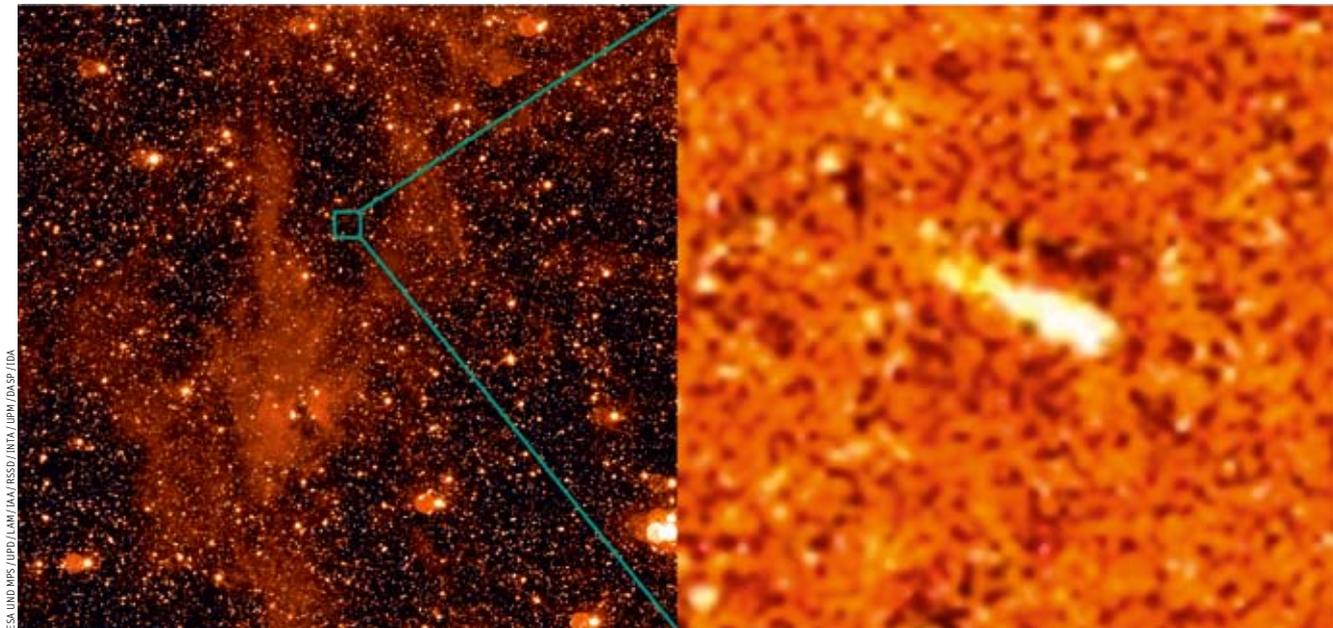
Jewitt und seine Kollegen verfolgten die Entwicklung des Schweifs von P/2010 A2 fünf Monate lang mit dem Hubble-Weltraumteleskop. Schon auf den ersten hoch aufgelösten Fotos entdeckten sie ein punktförmiges Objekt mit rund 120 Meter Durchmesser. Es befand sich etwa dort, wo der Kometenkern zu erwarten wäre.

Bei genauer Betrachtung jedoch zeigte sich eine Unstimmigkeit. »Der Kern erschien fast abgetrennt von der Staubwolke«, sagt Jewitts Kollegin Jessica Agarwal, die am Forschungszentrum der Europäischen Raumfahrtagentur ESA im niederländischen Noordwijk die Bilder ausgewertet hatte. Den Lichtpunkt interpretieren die Forscher deshalb inzwischen als das größte Fragment einer Asteroidenkollision.

Auf den zugehörigen Mutterkörper prallte damals offenbar ein mehrere Meter dicker Felsbrocken mit hoher Geschwindigkeit. Er selbst wurde dabei pulverisiert. Der getroffene Asteroid blieb dagegen erhalten. Von ihm wurde nur ein Teil – knapp ein Sechstel seines Volumens – abgesprengt und als Trümmerwolke mit rund 370 000 Tonnen Gesamtmasse ins All geschleudert.



NASA/ESA UND DAVID JEWITT, UCLA



ES UND MPS / JORD / LAN / JAA / PRESS / INTA / JPN / DASP / IDA

Indem die Forscher analysierten, wie stark der Lichtdruck der Sonnenstrahlung die Bahnen der Trümmerstücke im sichtbaren Schweif beeinflusst hat, konnten sie die Größe der Körner ermitteln. Diese bestehen demnach aus Partikeln zwischen einem Millimeter und zweieinhalb Zentimeter Durchmesser. Die kleineren Körner bewegen sich am schnellsten und haben sich deshalb am weitesten vom Kollisionszentrum entfernt. Größere Brocken dürften noch in der Nähe des Hauptfragments umherschwirren; einzelne von ihnen sind auf den Hubble-Fotos erkennbar.

Kometensonde mit besserem Blickwinkel

Innerhalb des Staubs lassen sich faserartige Strukturen ausmachen, und an der Schweifspitze erscheint ein seltsames x-förmiges Muster. Über die Ursache dieser Verdichtungen rätseln die Forscher noch.

Im kommenden Sommer sollen die Beobachtungen mit Hubble fortgesetzt werden, das dank seiner hohen Auflösung den detailliertesten Blick auf das Objekt bietet. Das Weltraumteleskop hat jedoch ein Handicap: Da die Bahnebenen von Erde und P/2010 A2 fast zusammenfallen, sind die Form und Länge des Schweifs aus seinem Blickwinkel

nicht so gut erkennbar. Kleinere Fernrohre auf Satelliten, die sich weiter entfernt im All aufhalten, können deshalb Informationen liefern, die Hubble entgehen. Das gilt etwa für die europäische Sonde Rosetta, die seit sechs Jahren zum Kometen Tschurjumow-Gerasimenko unterwegs ist. Im vergangenen Frühjahr befand sie sich bereits weit jenseits der Umlaufbahn des Mars. Da ihre Bahnebene zudem um zehn Grad gegen diejenige von P/2010 A2 geneigt ist, bot sich der Raumsonde ein günstigerer Blickwinkel als dem Weltraumteleskop. Das machten sich Snodgrass und seine Kollegen zu Nutze.

Rosettas OSIRIS-Kamera, von neun europäischen Forschungseinrichtungen unter deutscher Leitung entwickelt, hat außer einem Weitwinkel- auch ein Teleobjektiv. Dieses ist mit 72 Zentimeter Brennweite und neun Zentimeter Öffnung etwa so leistungsfähig wie ein kleineres Amateurfernrohr. Die OSIRIS-Fotos und weitere Aufnahmen von der Erde aus erlaubten, die dreidimensionale Gestalt von P/2010 A2 zu ermitteln. Demnach ist dessen Form untypisch für den Schweif eines Kometen.

»Da diese Himmelskörper quasi kontinuierlich Gas und Staub ausstoßen, hat ihr Schweif normalerweise eine aufgefächerte Form«, so Snodgrass. »Der geradlinige Schweif von P/2010 2A deu-

Dieses Foto des Objekts P/2010 A2 hat das Kamerasystem OSIRIS der europäischen Raumsonde Rosetta im März 2010 aufgenommen.

tet dagegen auf die Entstehung durch ein einzelnes, kurzzeitiges Ereignis hin.« Die MPS-Forscher sehen deshalb in dem Objekt – ebenso wie ihre UCLA-Kollegen – die Trümmerwolke eines Zusammenpralls, den sie sogar präziser eingrenzen können, als das mit den Hubble-Daten möglich ist. Demnach fand die Kollision am 10. Februar 2009 statt – plus/minus fünf Tage.

Obwohl heute der Asteroidengürtel erheblich leerer ist als in der Frühzeit des Sonnensystems, scheinen also immer noch Kollisionen vorzukommen. Der Zusammenstoß der beiden Kleinplaneten war der erste, den Astronomen zeitnah beobachten konnten.

P/2010 A2 liegt an der Nachweisgrenze der robotischen Teleskope, die routinemäßig den Himmel nach Asteroiden durchmustern. Da künftig mehrere empfindlichere Instrumente in Betrieb gehen sollen, ist zu erwarten, dass ähnliche Funde alltäglicher werden. Insbesondere das Large Synoptic Survey Telescope, das zum Ende der Jahrzehnts in Chile seine Arbeit aufnehmen und einmal pro Woche den kompletten

Südhimmel fotografieren soll, dürfte große Fortschritte bringen.

Nicht alle Wissenschaftler sind allerdings von dem Crash-Szenario bei P/2010 2A überzeugt. So hält Alan Harris vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Berlin auch eine andere Entstehung des Schweifs für vereinbar mit den vorliegenden Daten: Der Mutterkörper könnte von der eigenen Zentrifugalkraft auseinander-

gerissen worden sein, weil er zu schnell rotierte.

Dies ist theoretisch jedenfalls möglich. Wenn unregelmäßig geformte Asteroiden Sonnenlicht absorbieren, werden sie lokal erwärmt. Die erhitzte Stelle sendet dann Infrarotstrahlung aus, während das Objekt sich weiterdreht. Daraus resultiert unter Umständen ein dauerhafter Rückstoß, durch den sich die Rotation um die eigene Achse stetig

beschleunigt. Aus lockerem Material bestehende Körper können der wachsenden Zentrifugalkraft auf Dauer nicht widerstehen. Und so werden Teile von ihnen ins All geschleudert. »Dieser Effekt gilt auch als Erklärung für Asteroiden mit einem sie umkreisenden Mond«, erläutert Harris.

Thorsten Dambeck ist promovierter Physiker und als Wissenschaftsautor in Heidelberg tätig.

NEUROWISSENSCHAFT

Müde Hörschnecke

Eine bislang rätselhafte Form erblicher Schwerhörigkeit können Wissenschaftler nun erklären: Die Übertragung der Schallsignale von der Cochlea an den Hörnerv ist gestört, weil der Nachschub an den nötigen Botenstoffen stockt.

VON TOBIAS MOSER, NICOLA STRENZKE UND ELLEN REISINGER

Damit wir etwas hören, müssen die mechanischen Schwingungen des Schalls in Nervenimpulse umgewandelt werden, die das Gehirn verarbeiten kann. Das geschieht an Sinneszellen, den »inneren Haarzellen«, in der Hörschnecke des Innenohrs. Jede von ihnen bildet mit bis zu 30 Hörnervenzellen so genannte Synapsen: Kontaktstellen zwischen Neuronen, an denen das Signal über chemische Botenstoffe weitergeleitet wird. Mechanische Schwingungen in der Hörschnecke durch eintreffenden Schall lenken das Haarbündel der Haarzelle aus, die daraufhin an den Synapsen den Botenstoff Glutamat freisetzt. Dieser erregt die Hörnervenzelle und bringt sie dazu, ein Aktionspotential – einen elektrischen Impuls – an das Gehirn zu senden.

Jede Haarzelle kann in der Hörnervenzelle, mit der sie über eine Synapse verbunden ist, hunderte Aktionspotenziale in der Sekunde auslösen. Selbst bei völliger Stille kommt dieses »Feuern« nicht zum Erliegen. Auch dann erzeugen die Hörnervenzellen unermüdlich bis zu 100 elektrische Impulse pro Sekunde – eine noch nicht völlig verstandene Besonderheit unseres Hörsinns.

Man vermutet, dass für jedes Aktionspotential mindestens ein mit dem Botenstoff Glutamat beladenes Membranbläschen (Vesikel) seinen Inhalt freisetzen muss. Entsprechend groß ist der Bedarf an Nachschub. Wenn wir etwas hören, müssen pro Sekunde mehrere hundert etwa 50 Nanometer (milliardstel Meter) große Vesikel in der Haarzelle zur Synapse befördert werden. Bei Schallreizung verschmelzen sie dort an der »aktiven Zone« mit der Außenmembran und schütten das enthaltene Glutamat in den synaptischen Spalt aus. Das leere Bläschen wird schließlich wieder in die Zelle aufgenommen. All dies geschieht auf einer sehr kleinen Fläche von weniger als einem Quadratmikrometer – und zwar je nach Hörsituation über mehrere Stunden hinweg.

Was ermöglicht diese einzigartige logistische Leistung der Haarzellsynapsen? Eine auffallende Besonderheit ist schon länger bekannt: Sie enthalten ein synaptisches Band (*synaptic ribbon*). Dieser ungefähr 0,3 Mikrometer große Komplex aus verschiedenen Molekülen kann eine große Zahl von Vesikeln binden. Vermutlich trägt er so dazu bei, dass auf engem Raum sehr viele Frei-

setzungenstellen für die Bläschen existieren – 10 bis 15 pro aktiver Zone. Außerdem vermuten Neuroforscher, dass er eine Rolle bei der raschen Nachlieferung gefüllter Vesikel spielt.

Taub trotz intaktem Innenohr

Strukturell ähnliche Bändersynapsen gibt es auch in der für das Sehen wichtigen Netzhaut. Dort aber rollt der Nachschub an Vesikeln längst nicht so schnell. Deshalb reicht die Anwesenheit des synaptischen Bands allein als Erklärung für den hohen Umsatz an Botenstoffen in den aktiven Zonen der Haarzellen nicht aus. Diese verfügen im Unterschied zu den Fotorezeptoren und Neuronen der Netzhaut allerdings über das kürzlich entdeckte Protein Otoferlin. Seine Rolle beim Hören ist deshalb nun Gegenstand intensiver Forschung weltweit.

Otoferlin enthält mehrere so genannte C2-Domänen, mit denen Proteine Kalziumionen binden und sich an Membranen heften. Es wurde bei der Untersuchung einer erblichen Schwerhörigkeit entdeckt, die auftritt, wenn ein Kind von beiden Elternteilen eine defekte Version des entsprechenden

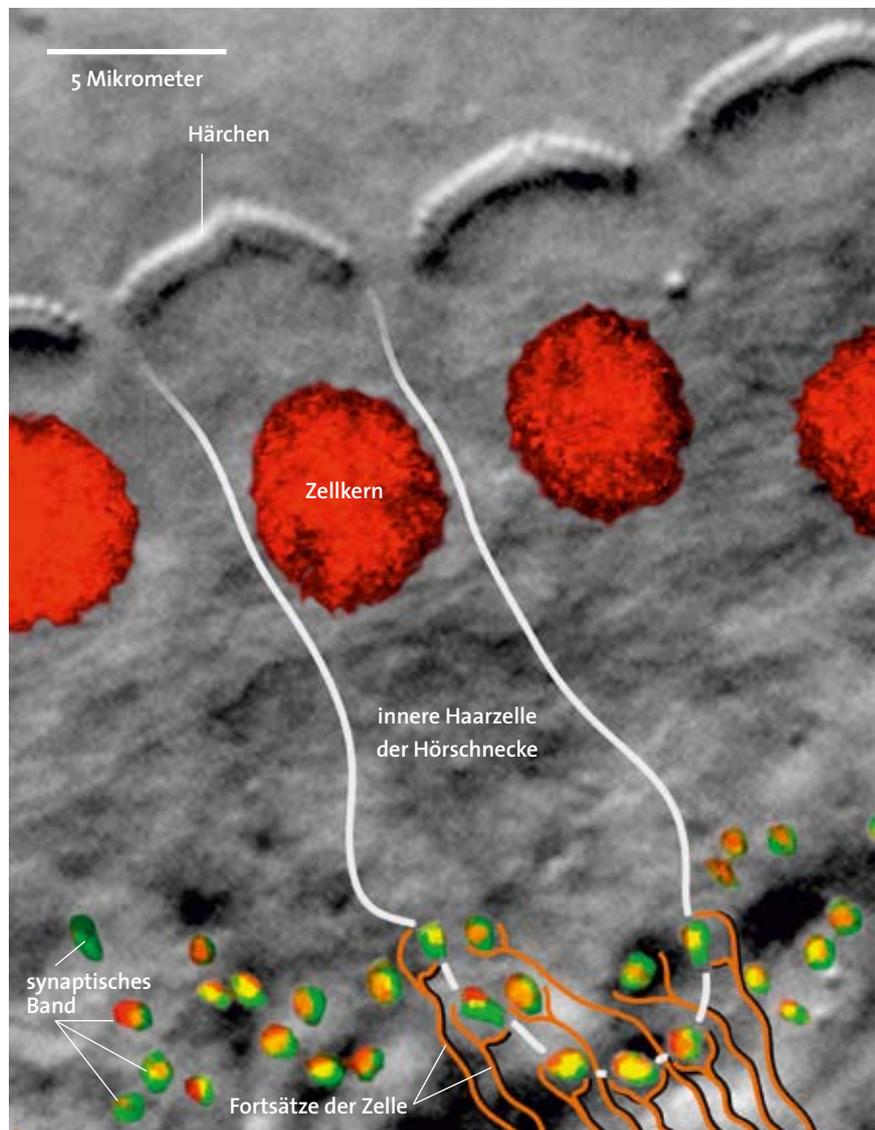
Gens geerbt hat. Die Betroffenen hören von Geburt an so schlecht, dass die meisten nicht sprechen lernen. In den Industrieländern erhalten sie deshalb heutzutage frühzeitig eine Innenohrprothese, ein Cochlea-Implantat.

Hörtests bei diesen Personen liefern ungewöhnliche Resultate. Im Unterschied zu den meisten Innenohr-schwerhörigen ist zum Beispiel die elektrische Erregung der Haarzellen und die aktive Verstärkung der Schallwellen im Innenohr nicht gestört – zumindest im ersten Lebensjahr. Offenbar werden die Sinneszellen durch akustische Reize sehr wohl elektrisch erregt, doch ruft dies keine Aktionspotenziale in den nachgeschalteten Neuronen hervor. Dies deutet darauf hin, dass die inneren Haarzellen, ihre Synapsen oder der Hörnerv nicht richtig funktionieren.

Tatsächlich sind schon länger Erkrankungen des Hörnervs mit vergleichbaren Befunden bekannt. Zu ihnen zählen insbesondere die so genannten auditorischen Neuropathien. Sie äußern sich häufig in einer raschen Ermüdung des Hörsinns. Damit die Patienten einen Ton längere Zeit wahrnehmen, muss seine Lautstärke ständig erhöht werden.

Auch die Otoferlin-Erkrankung wurde zunächst den auditorischen Neuropathien zugerechnet. Doch dann zeigte sich, dass Otoferlin in der Maus primär in den inneren Haarzellen vorkommt, unter anderem auf synaptischen Vesikeln. Schalteten Forscher das zugehörige Gen aus, waren die Tiere taub. Als Grund erwies sich eine nahezu komplette Blockade der Freisetzung von Glutamat an den Bändersynapsen der Haarzellen solcher Knockout-Mäuse. Damit hatte sich erstmals eine synaptische Übertragungsstörung als Ursache menschlicher Schwerhörigkeit herausgestellt. Anscheinend spielt Otoferlin als Kalzium bindendes Protein eine Schlüsselrolle bei der von Kalzium abhängigen Ausschüttung des Neurotransmitters – so die Vermutung.

Die Knockout-Maus taugte jedoch nur bedingt dazu, die Funktion dieses Proteins und den genauen Mechanis-

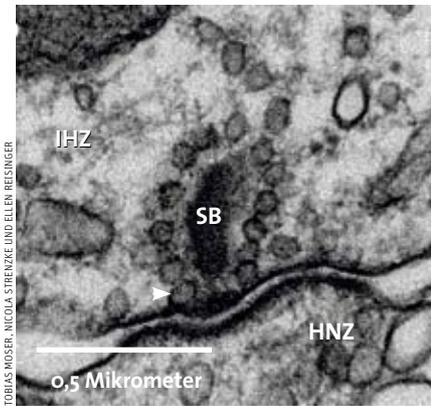


Ausschnitt aus einer menschlichen Hörschnecke mit lichtmikroskopisch abgebildeten inneren Haarzellen. Die weiße Linie deutet den Umriss einer solchen Zelle exemplarisch an. Die Härchen sind zu einer Struktur angeordnet, die einer geschweiften Klammer ähnelt. Der Zellkern ist rot gekennzeichnet, die Bändersynapsen wurden mit Fluoreszenzmarkern eingefärbt: Das synaptische Band erscheint rot; die Botenstoffrezeptoren der Hörnervenzelle leuchten grün. Die Fortsätze der Hörnervenzelle, die mit den Haarzellen in Kontakt stehen, sind schematisch in Orange eingezeichnet.

mus der mit ihm assoziierten menschlichen Schwerhörigkeit zu ergründen; denn ihre Haarzellsynapsen setzen fast kein Glutamat mehr frei. Die Gruppe von Ulrich Müller am Scripps Research Institute in La Jolla (Kalifornien) erzeugte deshalb Mäuse, bei denen nur eine Aminosäure in einer C2-Domäne des Proteins ausgetauscht ist. Die inneren Haarzellen der Tiere enthalten somit Otoferlin, das allerdings leicht ver-

ändert ist und in geringerer Menge vorliegt. Unter diesen Umständen sind ihre Vesikel, wie Versuche mit Zellkulturen ergaben, sehr wohl in der Lage, normal mit der Zellmembran zu verschmelzen und Glutamat freizusetzen. Trotzdem zeigte sich in Tests eine ähnlich starke Schwerhörigkeit wie bei der Knockout-Maus.

Mit umfassenden physiologischen und morphologischen Untersuchun-



TOBIAS MOSER, NICOLA STRENZKE UND ELLEN REISINGER

Die elektronenmikroskopische Abbildung zeigt die Synapse zwischen einer inneren Haarzelle (IHZ) und einer Hörnervenzelle (HNZ). An dem dunkel gefärbten synaptischen Band (SB) sitzen zahlreiche mit Neurotransmittern gefüllte Vesikel. Ein Bläschen, das an die präsynaptische Membran grenzt, ist mit einer Pfeilspitze markiert.

gen suchten wir nach einer Erklärung für diesen scheinbaren Widerspruch. Eine Störung der Synapsenstruktur konnten wir ausschließen: Die verschiedenen Klassen der Vesikel und das synaptische Band unterscheiden sich nicht von denen normaler Mäuse. Stattdessen stießen wir auf eine andere einleuchtende Ursache der Hörmüdung: Durch den punktuellen Defekt im Otoferlin-Gen verlangsamt sich die Nachlieferung freisetzungsbereiter Vesikel. Die Haarzellen enthalten deshalb nicht mehr genug davon, um auf akustische Reize angemessen zu reagieren – zumal sie ja auch bei völliger Stille fortlaufend Glutamat ausschütten.

Für diese Deutung spricht, dass die Hörnervenzellen etwas stärker feuerten, wenn wir den zeitlichen Abstand zwischen den Schallsignalen verlängerten. Anscheinend konnten sich während der ausgedehnten Pausen freisetzungsbereite Vesikel an der Synapse ansammeln, die dann eine stärkere Reaktion auf den nächsten Reiz ermöglichten.

Die veränderte C2-Domäne unterscheidet sich biochemisch und strukturell kaum vom normalen Protein. Deshalb sollte die Mutation die Wechselwirkungen von Otoferlin mit Kalzium und der Vesikel- oder Zellmembran nicht beeinträchtigen. Am ehesten

scheint eine gestörte Interaktion mit anderen Proteinen denkbar. Die verzögerte Nachlieferung der Vesikel könnte also davon, von einer verminderten Otoferlin-Menge oder von beidem herühren.

Die hohen Anforderungen des Hörens machen die Vesikel-Logistik in der Synapse von Haarzellen komplex und damit störanfällig. Probleme können nicht nur beim Nachliefern der Bläschen auftreten, sondern auch bei ihrem Verschmelzen mit der Zellmembran und ihrer Wiederaufnahme in die Zelle. In der Tat konnten wir in Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe von Wayne Frankel von den Jackson Laboratories in Bar Harbor (Maine) in einem Mausmodell kürzlich eine andere Form von Schwerhörigkeit auf ein gestörtes Recycling der Vesikel zurückführen.

Tobias Moser ist Professor für auditorische Neurowissenschaften in der Abteilung Hals-Nasen-Ohrenheilkunde der Universitätsmedizin Göttingen. Die Medizinerin **Nicola Strenzke** und die Biochemikerin **Ellen Reisinger** leiten dort die Nachwuchsgruppen für systemische Hörphysiologie beziehungsweise Molekularbiologie der Neurotransmission im Innenohr.

OPTIK

Blick durch die Wand

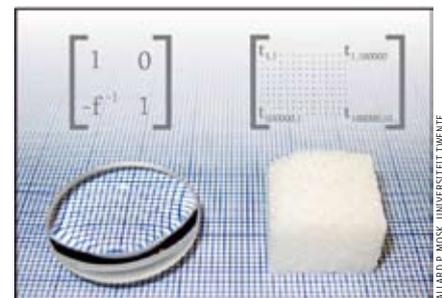
Französischen Forschern ist es erstmals gelungen, ein Bild durch ein lichtstreuendes Material hindurch zu übertragen.

VON MANUELA KUCHAR

Wer hätte nicht schon einmal gerne durch eine Wand gespäht, um zu erfahren, was dahinter vor sich geht? Auch für Ärzte wäre es äußerst praktisch, durch eine dicke Gewebeschicht einfach »hindurchsehen« zu können, ohne schneiden oder eine Kamera einführen zu müssen. Das scheint auf den ersten Blick unmöglich: Materialien wie Rigipsplatten oder biologisches Gewebe lassen zwar einen Teil des einfallenden Lichts hindurch, doch wird

jedes Photon beim Passieren des Mediums viele Male gestreut. Auf der anderen Seite kommt deshalb kein erkennbares Bild an. Stattdessen sieht man nur ein scheinbar zufälliges Intensitätsmuster.

Nun aber ist Wissenschaftlern um Sylvain Gigan am Langevin-Institut in Paris das Kunststück gelungen, aus einem solchen Muster das ursprüngliche Bild wiederherzustellen. Dabei nutzten sie aus, dass auch Streuprozesse deter-

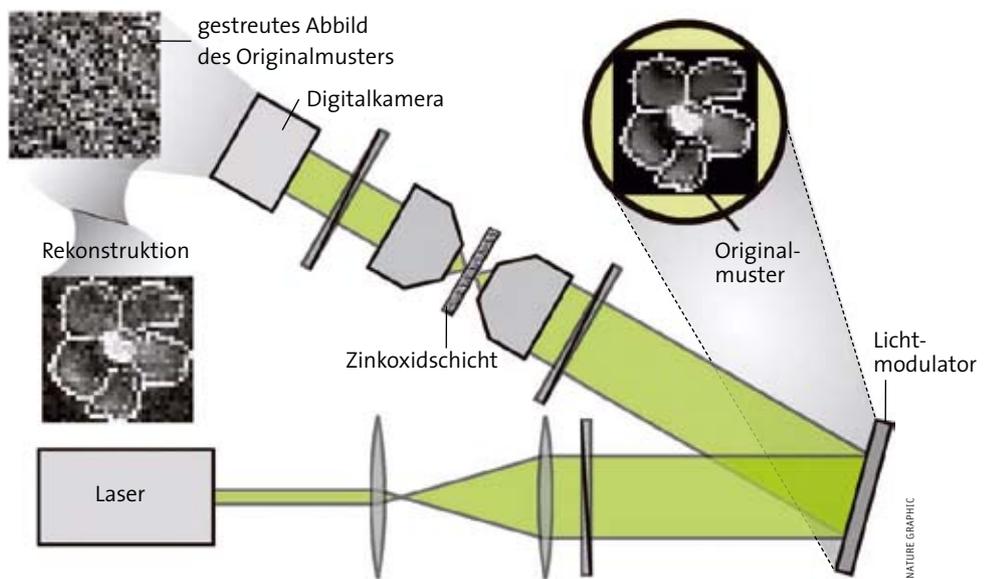


ALFARO P. MOSK, UNIVERSITÄT TWENTE

Durch eine Linse betrachtet, erscheint ein Linienmuster nur leicht verzerrt (links). Die geometrische Beziehung zwischen Original und Abbild ist in diesem Fall mit einer recht einfachen Transmissionsmatrix mathematisch beschreibbar. Ein Zuckerwürfel hingegen streut hindurchtretendes Licht auf höchst vertrackte Weise. Dennoch lässt sich auch hier eine – sehr komplizierte – Transmissionsmatrix ermitteln, mit der es gelingt, das erhaltene Lichtmuster in das Originalbild zurückzuverwandeln.

ministisch sind. Wenn man also genau weiß, wie das Hindernis die Lichtwellen beeinflusst, und die empfangenen Bildinformationen präzise misst, dann lässt sich das Original im Prinzip rekonstruieren.

Dazu benötigt man allerdings außer der Intensitäts- auch die Phasenverteilung des empfangenen Lichts – und das geht nur, wenn es von einem Laser stammt. Die Phase gibt an, welcher Abschnitt einer Welle – Berg, Tal oder etwas dazwischen – sich gerade an einem bestimmten Punkt befindet. Überlagern sich zwei Lichtwellen, so verstärken oder schwächen sie sich gegenseitig, je nachdem wie groß der Phasenunterschied zwischen ihnen ist. Wenn einfarbige Laserstrahlung eine Linse oder ein streuendes Medium durchläuft, bildet sich dadurch ein Interferenzmuster, das Rückschlüsse auf die ursprünglichen Phaseninformationen erlaubt. Mit einer normalen weißen



Schematischer Versuchsaufbau: Ein Laser beleuchtet einen räumlichen Lichtmodulator (SLM, nach englisch *spatial light modulator*), der dem Lichtbündel ähnlich wie ein Dia in einem Projektor ein Muster aufträgt – hier eine Blüte. Das Licht durchläuft eine Schicht aus streuendem Material (Zinkoxid) und trifft auf eine Digitalkamera. Aus dem empfangenen Rauschen lässt sich mit Hilfe der zuvor ermittelten Transmissionsmatrix das Originalbild rekonstruieren.

ANZEIGE

Konzentrierter. Belastbarer. Ausgeglichener.*

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



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

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

Stand: Oktober 2010 T/10/10/4

Tebonin® stärkt Gedächtnisleistung und Konzentration.*

- Exklusiver pflanzlicher Spezialextrakt
- Gut verträglich



Mit der Natur.
Für die Menschen.

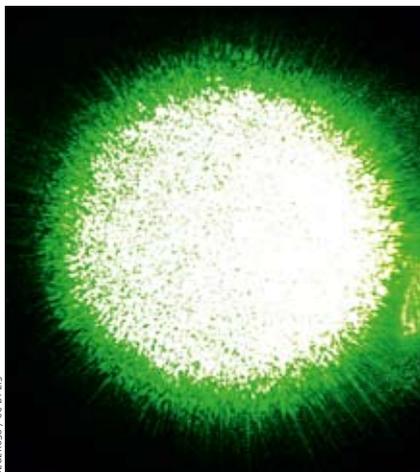
Dr. Willmar Schwabe GmbH & Co. KG
www.tebonin.de
www.schwabe.de

Lampe funktioniert das dagegen nicht, weil ihr Licht sich in alle Richtungen ausbreitet und aus Photonen vieler verschiedener Wellenlängen besteht.

Als Hindernis verwendeten Gigan und seine Kollegen eine Schicht aus Zinkoxid – ein weißes Pulver, das unter anderem als Farbpigment genutzt wird. Zunächst ermittelten sie, wie dieses Medium bekannte Wellenfronten streut. Das sind gedachte Schnittflächen durch ein Bündel von Lichtstrahlen senkrecht zu dessen Ausbreitungsrichtung. Die Forscher verwendeten dazu einen Laser mit 532 Nanometern Wellenlänge. Ein räumlicher Lichtmodulator (englisch *spatial light modulator*, kurz SLM) prägte der von ihm ausgehenden monochromatischen Wellenfront ein bestimmtes Intensitäts- und Phasenmuster auf – sozusagen ein Testbild.

Die Strahlung traf hinter dem Zinkoxid auf eine Digitalkamera. Mittels Interferometrie vermaßen die Forscher die Intensitäts- und Phasenverteilung des empfangenen Interferenzmusters. Dessen Struktur heißt nach dem englischen Wort für Flecken auch »Speckle«. Der Vergleich zwischen mehreren tausend gesendeten Wellenfronten und dem jeweils empfangenen Interferenzmuster lieferte dann eine so genannte Transmissionsmatrix. Mit diesem mathematischen Hilfsmittel lässt sich berechnen, auf welche

Als Fleckenmuster ähnlich wie dieses erschien die Blüte, nachdem ihr Licht eine Zinkoxidschicht passiert hatte.



DEGLR638 / CC-BY/2.5



SYLVAIN GIGAN, INSTITUT LANGEVIN, PARIS

Realer Versuchsaufbau: Das Zinkoxid wurde auf einer Glasscheibe angebracht.

Weise das streuende Medium die Wellenfront eines einfallenden Lichtbündels verändert. Umgekehrt kann sie als Schlüssel dienen, um aus einem empfangenen Speckle-Muster zu ermitteln, wie das zugehörige Originalbild aussah.

Nach dieser Vorarbeit projizierten die Forscher die 32 mal 32 Pixel große einfarbige Zeichnung einer Blüte – genauer: die zugehörige Laser-Wellenfront – auf das Hindernis, vermaßen den empfangenen Lichtfleck und entschlüsselten daraus das Original. Der Versuch war ein voller Erfolg: 94 Prozent des ursprünglichen Bildes ließen sich durch die 0,08 Millimeter dicke Zinkoxidschicht hindurch erkennen. Ohne die Möglichkeit, die Wellenfronten äußerst genau zu manipulieren, wäre das nicht möglich gewesen. Die dafür benötigte Präzisionstechnik steht erst seit wenigen Jahren zur Verfügung.

Bisher ist das Verfahren noch durch die Geschwindigkeit begrenzt, mit der räumliche Lichtmodulatoren die Vielzahl benötigter Testbilder nacheinander erzeugen können. Dadurch dauert die Berechnung einer Transmissionsmatrix mehrere Minuten. Das ist für die Anwendung in der medizinischen Bildgebung deutlich zu langsam. Wenn sich die Struktur des Materials während

der Aufnahme der Testbilder nur geringfügig ändert, wird das Licht auf dem Weg hindurch nämlich völlig anders gestreut, so dass die Messung von vorn beginnen müsste.

Daher funktioniert das Verfahren bisher nur bei sehr stabilen Materialien wie Zinkoxid, dessen Struktur über Stunden hinweg gleich bleibt. Biologisches Gewebe verändert sich dagegen ständig. »Wir müssen die Ausbreitung des Lichts in Sekundenbruchteilen analysieren«, betont Gigan. Winzige bewegliche Spiegel, auch MEMs genannt (nach englisch *micro-electromechanical systems*), könnten Abhilfe schaffen, da sie innerhalb von Mikrosekunden zwischen Testbildern umschalten können.

Eine weitere Hürde besteht darin, dass das Verfahren bisher nur den Blick durch ein streuendes Medium hindurch ermöglicht und nicht in sein Inneres hinein, wie das bei der medizinischen Bildgebung nötig wäre. Ebenso wenig erlaubt die Methode, durch eine reale Hauswand zu sehen, weil Beton und Metall zu viel Licht absorbieren. Der klammheimliche Blick in Nachbars Wohnzimmer bleibt also ein Wunschtraum.

Manuela Kuhar ist Physikerin und arbeitet als freie Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg.

Radikale Therapie von Schlaganfällen

Nach einem Schlaganfall sterben in großem Umfang Nervenzellen im Gehirn ab. Nun haben Forscher ein Enzym identifiziert, das dafür verantwortlich ist. Wird es ausgeschaltet, bleibt das Gehirn weit gehend unversehrt.

VON KIRSTIN WINGLER, CHRISTOPH KLEINSCHNITZ UND HARALD SCHMIDT

Der Schlaganfall zählt zu den häufigsten Todesursachen. Weltweit sterben daran jährlich etwa 5,5 Millionen Menschen; in Deutschland fordert er etwa alle zwei Minuten ein neues Opfer. Selbst wenn jemand einen Schlaganfall überlebt, bleibt er oft dauerhaft behindert – jeder dritte Betroffene wird zu einem schweren Pflegefall. Entsprechend hoch sind die Belastungen für das Gesundheitssystem. Allein die direkten Krankheitskosten belaufen sich in Deutschland aktuell auf durchschnittlich mehr als 43000 Euro pro

Patient. Vor allem wegen der alternden Bevölkerung wird die Häufigkeit von Schlaganfällen vermutlich zunehmen.

In den meisten Fällen (ungefähr 85 Prozent) tritt ein so genannter ischämischer Schlaganfall auf. Ausgelöst wird er wie der Herzinfarkt durch eine akute Durchblutungsstörung – nur sind hier nicht die Herzkranzgefäße verstopft, sondern Adern, die das Gehirn versorgen. Der weitaus seltenere hämorrhagische Schlaganfall rührt dagegen von einer Blutung im Hirn her. Beiden Formen gemeinsam ist, dass Nervenzellen

unzureichend mit Sauerstoff und Nährstoffen versorgt werden und deshalb absterben.

Auch die Risikofaktoren für Herzinfarkt und Schlaganfall sind ähnlich. Zu ihnen gehören Bluthochdruck, Diabetes mellitus, Rauchen und unzureichende Bewegung. Beide Erkrankungen resultieren häufig aus einer so genannten Arteriosklerose. Dabei werden die Blutgefäße durch Fett-, Kalk- und Bindegewebsablagerungen an den Wänden immer stärker eingengt – bis zum vollständigen Verschluss.

ANZEIGE

starmus festival

Discover the Cosmos and Change the World!

Gran Telescopio CANARIAS

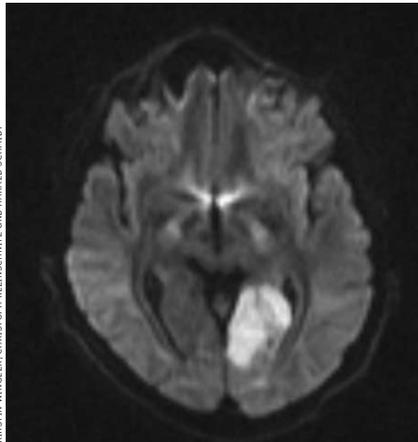
"A Festival of Space, Art & Music"

**Magma Art & Congress Hall
Tenerife, Canary Islands (Spain)
21-26 March, 2011**

50 years in Space: Tribute to Gagarin
Discover the Cosmos and Change the World
Astrophotography Now Exhibition
Beyond your Imagination: Space Art & 3D Astronomy Exhibition
SETI Zone
"108 Minutes": Round Table Discussion
Tangerine Dream Starlight Concert: The Gates of Saturn

www.starmus.com

TAU



KIRSTIN WINGLER, CHRISTOPH KLEINSCHNITZ UND HARALD SCHMIDT

Schnittbild eines menschlichen Gehirns nach einem akuten Schlaganfall. In der kernspintomografischen Aufnahme erscheint der geschädigte Bereich weißlich.

Sobald die ersten Schlaganfallsymptome auftreten – typischerweise Lähmungen, Sprach- und Gleichgewichtsstörungen –, beginnt ein Wettlauf gegen die Zeit. Denn schon rund fünf Minuten nach Unterbrechung der Sauerstoffzufuhr fangen die Nervenzellen an abzustarben. Das Problem ist allerdings, dass es derzeit keine wirklich wirksame Therapie gibt. Innerhalb der ersten vier bis fünf Stunden besteht die Option, das Blutgerinnsel, welches das Gefäß verschließt, medikamentös aufzulösen. Leider hilft das nur begrenzt. Auch ist eine solche Thrombolyse wegen der vielen Nebenwirkungen, etwa der Gefahr von Blutungen, und Gegenanzeigen nur bei etwa 10 bis 20 Prozent aller Schlaganfallpatienten anwendbar. Deshalb besteht dringender Bedarf an neuen Therapien, die sicherer und wirksamer sind.

Ein möglicher Ansatzpunkt ist der so genannte oxidative Stress, der für die Hirnschäden nach einem Schlaganfall eine wichtige Rolle spielt. Hierbei reichern sich freie Radikale – aggressive Molekülbruchstücke mit ungepaarten Elektronen – und andere »reaktive Sauerstoffverbindungen« im Gewebe an und reagieren mit Zellbestandteilen wie Proteinen, Lipiden und Nucleinsäuren. Dadurch beeinträchtigen sie deren Funktion – bis hin zum Zelltod. Zu den reaktiven Sauerstoffverbindungen gehört auch Wasserstoffperoxid, das im

Haushalt zum Beispiel als Bleich- oder Desinfektionsmittel verwendet wird.

Die Hypothese, dass freie Radikale an der Entstehung und Ausbreitung von Schlaganfällen beteiligt sind, geht bis in die 1970er Jahre zurück. Um oxidativen Stress zu bekämpfen und die durch ihn ausgelösten Zell- und Organschäden einzudämmen, versuchten Forscher, die aggressiven Moleküle durch Gabe von Antioxidantien (»Radikalfängern«) wie Vitamin E, Vitamin C oder Betacarotin zu neutralisieren – jedoch ohne Erfolg, wie viele klinische Studien belegen. In hohen Dosen erwiesen sich Antioxidantien teils sogar als eher schädlich. Eine wahrscheinliche Erklärung dafür ist, dass sie sich ungleichmäßig im Körper verteilen. Zudem fangen sie ungezielt nicht nur die schädlichen Radikale ab, sondern auch die potenziell nützlichen, die zum Beispiel das Zellwachstum regulieren oder Bakterien und Viren abtöten.

Statt die reaktiven Sauerstoffverbindungen mit Antioxidantien zu bekämpfen, wäre es deshalb besser, ihre Entstehung zu verhindern und so das Übel an der Wurzel zu packen. Nur lag beim Schlaganfall der Ursprung der schädlichen reaktiven Sauerstoffverbindungen bisher im Dunkeln.

Diese Wissenslücke konnten wir kürzlich schließen. Als Hauptursache für den oxidativen Stress, der Nervenzellen nach einem Schlaganfall absterben lässt,

identifizierten wir das Enzym NOX4, das zur Familie der NADPH-Oxidasen gehört (*PLoS Biology* 8, S. 9). Deren einzige Aufgabe besteht darin, reaktive Sauerstoffverbindungen zu erzeugen, die bei Gesunden wichtige Funktionen ausüben – etwa bei der Abwehr von Krankheitserregern. Bei überschießender Aktivität verursachen die Enzyme jedoch Zell- und Gewebeschäden.

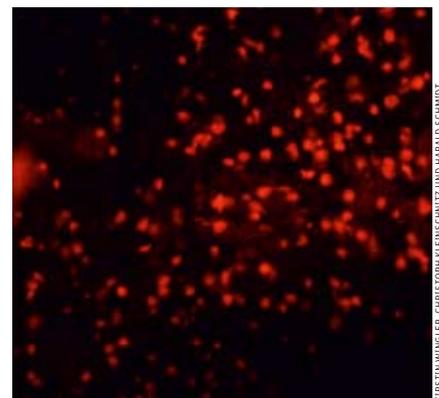
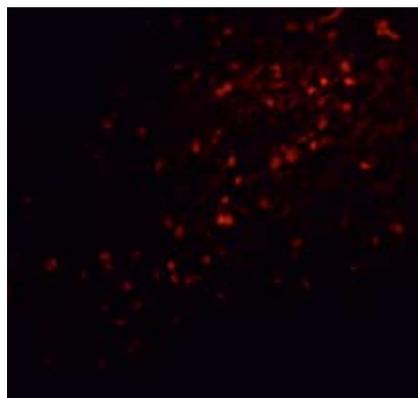
Enzymblockade verhütet Schäden

Bei Versuchstieren konnten wir NADPH-Oxidasen nach einem ischämischen Schlaganfall mit dem neuen Wirkstoff VAS2870 hemmen, der sich noch in einer frühen Erprobungsphase befindet. Ergebnis: Es waren drastisch weniger Hirnschäden und neurologische Ausfallerscheinungen zu beobachten – sogar dann noch, wenn der Hemmstoff erst Stunden nach Beginn des Schlaganfalls verabreicht wurde. Das ist sehr wichtig, weil die meisten Schlaganfallpatienten nicht sofort in die Klinik kommen.

Für den gleichen Schutzeffekt sorgte das Ausschalten des NOX4-Gens. Entsprechende Knockout-Mäuse erlitten nur kleinere Hirninfarkte und waren im Übrigen gesund. Demnach scheint NOX4 unter normalen Bedingungen nur eine untergeordnete Rolle zu spielen. Seine Blockade sollte folglich keine gravierenden Nebenwirkungen hervorrufen.

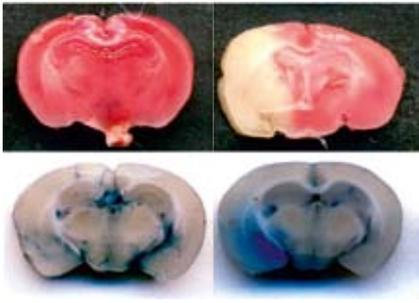
Nun gilt es, die an Tieren gewonnenen Erkenntnisse für den Menschen

Nach einem Schlaganfall lassen sich in den Gehirnen von Mäusen aggressive Sauerstoffverbindungen (rot) nachweisen, zu denen auch Wasserstoffperoxid gehört. Bei Nagern, die mit einer Substanz behandelt wurden, die NADPH-Oxidasen hemmt, fanden sich wesentlich weniger solche Substanzen (links) als bei unbehandelten Vergleichstieren (rechts).



KIRSTIN WINGLER, CHRISTOPH KLEINSCHNITZ UND HARALD SCHMIDT

KIRSTIN WINGLER, CHRISTOPH KLEINSCHNITZ, HARALD SCHMIDT



Mäuse, bei denen das NOX4-Gen ausgeschaltet wurde, erleiden bei einem Schlaganfall deutlich geringere Hirnschäden (links) als normale Artgenossen (rechts). Die abgestorbenen Areale (weiß in den oberen Aufnahmen) sind kleiner und die Läsionen der Blut-Hirn-Schranke (blau angefärbt in den unteren Fotos) weniger ausgeprägt.

nutzbar zu machen. Mittelfristiges Ziel sind geeignete NOX4-Hemmstoffe, um akute Schlaganfälle zu behandeln. Dabei muss die in unseren Experimenten eingesetzte Substanz so verändert werden, dass sie sich beim Menschen gefahrlos anwenden lässt. Zudem sind ausführliche Sicherheitsstudien und eine Bestätigung der Ergebnisse in anderen Tiermodellen nötig. Deshalb wird es noch einige Zeit dauern, bis ein solches Medikament zugelassen ist und medizinisch eingesetzt werden kann.

Wahrscheinlich lässt sich das allgemeine Prinzip, gezielt die krankheitsrelevanten Quellen von oxidativem Stress auszuschalten, auch auf andere Erkrankungen anwenden, bei denen reaktive Sauerstoffverbindungen eine Rolle spielen – etwa Herzinfarkte und das Alzheimer- oder Parkinsonsyndrom. Die Bedeutung unserer Ergebnisse reicht also über den Schlaganfall hinaus.

Kirstin Wingler ist promovierte Ernährungswissenschaftlerin. Sie forscht in der Abteilung für Pharmakologie der Universität Maastricht (Niederlande) und beim Cardiovascular Research Institute Maastricht (CARIM). **Christoph Kleinschnitz** ist habilitierter Oberarzt und Leiter der Schlaganfallstation an der Neurologischen Universitätsklinik Würzburg. **Harald Schmidt** leitet die Abteilung für Pharmakologie der Universität Maastricht und ist Professor für Pharmakologie am CARIM.

Wie frei bleibt das Internet?

Das neue Medium zwischen Anarchie und Zensur

Kürzlich sah ich mir auf DVD den »Glöckner von Notre-Dame« in der Hollywood-Verfilmung von 1939 an und war schon vom Beginn angetan. Da begutachtet der französische König zusammen mit dem Dompropst Frollo neugierig eine der ersten Buchpressen. Ludwig XI. gibt sich – zumindest in diesem Film – als allem Modernen aufgeschlossener Monarch und lobt das neue Medium des Buchdrucks als Vehikel für Aufklärung und Volksbildung. Der Kirchenmann hingegen wittert im Verlust des klerikalen Meinungsmonopols sofort die Gefahr von Aufruhr und Ketzerei.

Die Debatte um Wohl und Wehe des Internets, angeheizt durch Veröffentlichungen unzähliger Geheimdokumente auf der Plattform Wikileaks, baut ähnliche Fronten auf. Die Befürworter begrüßen einen ungeahnten Zuwachs an Informationsfreiheit und bürgerlicher Mündigkeit, während Kritiker vor der riskanten Störung heikler diplomatischer Beziehungen durch Geheimnisverrat warnen.

Beunruhigend fand ich als Kreditkartenbesitzer, wie schnell Mastercard und Visa bereit waren, offenbar dem Druck von Regierungen gehorchend, Wikileaks vom Zahlungsverkehr auszusperrten und damit in seiner auf Spenden angewiesenen Existenz zu bedrohen. So etwas läuft nach meiner Sicht auf indirekte – ökonomisch gehebelte – staatliche Zensur hinaus.

Doch so eindeutig sind Gut und Böse im Dreieck Bürger – Staat – Internet nicht verteilt. Nur auf den ersten Blick steht der Einzelne, der sein Recht auf uneingeschränkte Information beansprucht, im Bund mit einem möglichst freien Internet, während der Staat das neue Medium angeblich bloß reglementieren will. Zu einer anderen Einschätzung kommt der Rechtswissenschaftler Tim Wu von der New Yorker Columbia University in seinem Buch »The Master Switch: The Rise and Fall of Information Empires«. Wu untersucht die Geschichte der Medien Radio, Tonträger, Film, Fernsehen und Internet in den USA und demonstriert an zahlreichen Beispielen ein wiederkehrendes Muster: Die jeweils neueste Technik macht Firmen reich, die mit ihrer wirtschaftlichen Macht ein Monopol darauf durchsetzen. Erst die Einführung der nächsten »neuen« Medientechnik bricht die ökonomische Alleinherrschaft.

Im Licht von Wus Befund muss ich mein Dreieck zu einem Quadrat erweitern, mit mächtigen Medienkonzernen als viertem Pol. Aktuelle Beispiele wären Google und Apple. Jeder von beiden schickt sich auf seine Weise an, ein geschlossenes System zu organisieren, das sich krakengleich über das Internet ausbreitet, um es möglichst umfassend zu vereinnahmen. Der Grund ist nicht etwa, dass die zwei Mächtigen-Monopolisten »böse« wären – sie sind nur einfach auf expansives Wirtschaften programmiert.

Im Viereck Bürger – Staat – Internet – Wirtschaft kommt darum dem Staat laut Wu eine durchaus positive Rolle zu: Er soll verhindern, dass das neue Medium von Konzernen vereinnahmt wird. So könnte etwa eine Kartellbehörde ihr Augenmerk speziell auf geballte Medienmacht im Internet richten.

Übrigens: Wissen Sie, warum »Der Glöckner von Notre-Dame« in Hollywood gedreht wurde? Auch darüber gibt Wus Buch Auskunft. Die Firma des Erfinders Thomas Edison kontrollierte Anfang des 20. Jahrhunderts mit ihren Patenten die gesamte Filmtechnik. Unter anderem diktierte sie, dass ein Kinofilm nur wenige Minuten lang sein dürfe, um die Aufmerksamkeit des Publikums nicht zu ermüden. Vor solchen Vorschriften flohen die ersten Filmstudios von der Ostküste nach Kalifornien – und gründeten Hollywood.



Michael Springer

Lichtschalter im Gehirn

Per Optogenetik können Wissenschaftler in ungeahnter Detailgenauigkeit untersuchen, wie unser Denkorgan funktioniert. Die neue Technik beflügelt ganze Forschungsgebiete – bis hin zur Psychiatrie.

Von Karl Deisseroth

Als praktizierender Psychiater bin ich jeden Tag damit konfrontiert, welche enge Grenzen der Behandlung psychiatrischer Krankheiten auch heute noch gesetzt sind. Trotz der Anstrengungen zahlloser Mediziner und Forscher wissen wir nach wie vor nicht genug über die Ursachen von Störungen wie Depression oder Schizophrenie. Wir brauchen also dringend Lösungen für diese Probleme. Doch dazu müssen wir erst einmal die Möglichkeit haben, die richtigen Fragen zu stellen. Sprich: Wir benötigen neue Techniken zur Untersuchung menschlicher Hirnfunktionen.

Solche Methoden zu entwickeln erweist sich jedoch als schwierig, denn die Gehirne von Säugetieren sind höchst komplex. In ihnen kommunizieren Milliarden miteinander vernetzter Neurone mit vielfältigen Merkmalen und Verschaltungsmustern über präzise getaktete, nur Millisekunden dauernde elektrische Signale und unterschiedlichste biochemische Botenstoffe. Wegen dieser enormen Komplexität verstehen Neurowissenschaftler nach wie vor nicht genau, wie das menschliche Gehirn eigentlich arbeitet – wie also die Aktivitätsmuster bestimmter Hirnzellen letztlich Gedanken, Erinnerungen, Empfindungen und Gefühle erzeugen. Daher wissen wir auch nicht, auf welche Weise Fehlfunktionen des

Gehirns psychiatrische Erkrankungen wie Depression oder Schizophrenie verursachen. Derzeit führen die meisten Mediziner solche Störungen auf chemische Ungleichgewichte und abnorme Neurotransmitterkonzentrationen zurück. Den elektrischen Hochgeschwindigkeitsschaltkreisen in unserem Gehirn werden wir damit jedoch nicht gerecht. Jetzt aber scheint Licht am Ende des Tunnels – buchstäblich!

Bereits 1979 erklärte der Nobelpreisträger Francis Crick (1916–2004) in einem Artikel in dieser Zeitschrift (»Gedanken über das Gehirn«, Spektrum der Wissenschaft 11/1979, S. 146), die größte Herausforderung der Neurowissenschaft bestehe in der Aufgabe, selektiv einen bestimmten Zelltyp im Gehirn zu beeinflussen – und die übrigen unverändert zu lassen. Die Elektrostimulation kann dies nicht leisten, denn selbst die feinsten Elektroden arbeiten viel zu ungenau. Ihre Spannungsimpulse reizen alle Neurone in einem gewissen Areal, ohne nach Zelltypen zu unterscheiden. Crick spekulierte später in Vorlesungen, als Kontrollwerkzeug könne Licht dienen: in Form zeitlich und örtlich eng begrenzter Impulse unterschiedlicher Farben. Doch lange hatte niemand eine Vorstellung davon, wie einzelne Nervenzelltypen dazu veranlasst werden könnten, selektiv auf Lichtblitze zu reagieren.

Zur gleichen Zeit interessierten sich manche Biologen für eine völlig andere Frage: wie Mikroorganismen Licht nutzen. Mindestens schon seit 40 Jahren ist bekannt, dass einige Kleinstlebewesen Proteine produzieren, die auf sichtbare Strahlung reagieren und so direkt den Strom elektrisch geladener Teilchen (Ionen) durch die Zellmembran regulieren. Diese so genannten Opsine ermöglichen es den Organismen, dem Umgebungslicht sowohl Energie als auch Informationen zu entnehmen.

1971 entdeckten Walter Stoeckenius und Dieter Oesterheld, damals an der University of California in San Francisco, dass eines dieser Proteine als Ionenpumpe fungiert: das Bacteriorhodopsin. Empfängt es Photonen aus dem grünen Bereich des sichtbaren Lichts, so transportiert es Wasserstoffionen durch die Membran. Bacteriorhodopsin besteht nur aus einem einzigen Baustein – eine bemerkenswerte molekulare Maschine. Später wurden noch weitere solche Proteine entdeckt: 1977 das Halorhodopsin und 2002 die Channelrho-

AUF EINEN BLICK

METHODE MIT STRAHLKRAFT

1 Neuroforscher benötigen neue hochpräzise Methoden, um der Funktionsweise des Gehirns auf den Grund zu kommen. Einen unerwarteten Ansatz hierzu bieten lichtempfindliche Proteine (Opsine), die von Mikroorganismen zur Gewinnung von Energie und Information genutzt werden.

2 Nach Transfer der Opsingene in Hirnzellen können Forscher bestimmte Typen von Neuronen gezielt mit Lichtimpulsen aktivieren. Diese Technik heißt Optogenetik. Sie erlaubt die Untersuchung der Gehirnfunktionen lebender, frei umherlaufender Tiere, was mit Hilfe von Hirnelektroden und anderen herkömmlichen Methoden kaum möglich ist.

3 Obwohl die Optogenetik noch in den Kinderschuhen steckt, liefert sie schon jetzt wichtige Erkenntnisse zu verschiedenen psychiatrischen Krankheiten, etwa Schizophrenie und Autismus.



Mehr als nur schöner Schein:
Hirnforscher feiern die Opto-
genetik bereits als neues
Glanzstück in ihrem Methoden-
arsenal.

FOTO: DARRIN BRAUN

dopsine (zu Deutsch: Kanalrhodopsine). Damit waren die biologischen Grundlagen für eine Realisation von Cricks Vision schon bekannt, bevor dieser sie überhaupt formulierte. Dennoch sollte es 30 Jahre dauern, bis daraus eine neue Technologie entstand: die Optogenetik. Hierbei bringen Forscher Gene für Opsinproteine ins Gewebe, belichten dann die gewünschten Zellen und registrieren schließlich die dadurch hervorgerufenen Effekte. Neurowissenschaftler fasziniert vor allem die Möglichkeit, bestimmte Vorgänge in den ausgewählten Zellen zu genau festgelegten Zeitpunkten auszulösen. Diese hohe Präzision dürfte erforderlich sein, um biologische Abläufe wirklich zu verstehen.

Die Bedeutung eines Ereignisses in einer Zelle erschließt sich nämlich erst, wenn man es im Zusammenhang mit dem umgebenden Gewebe, dem Gesamtorganismus und sogar der Außenwelt betrachtet. Feuert etwa eine Nervenzelle einen elektrischen Impuls um nur wenige Millisekunden verzögert ab, kann dies den Effekt des Signals auf das Nervensystem unter Umständen ins Gegenteil verkehren. Tausende von Forschern untersuchen heute mit optogenetischen Methoden, wie Aktivitätsmuster spezifischer Neuronengruppen komplexe physiologische Vorgänge und Verhaltensweisen steuern – bei Würmern, Fliegen, Fischen, Vögeln, Mäusen, Ratten und Affen. Sie haben damit bereits wichtige Erkenntnisse über Erkrankungen des Menschen erzielt, darunter Depression, Morbus Parkinson und Schizophrenie.

Gezieltes Zerstören von Zellen

Licht wird in der Biologie schon länger eingesetzt, um lebende Systeme zu beeinflussen. Zum Beispiel lassen sich mit einer Methode namens CALI (chromophorassistierte lichtgesteuerte Inaktivierung) selektiv einzelne Proteine zerstören. Laserstrahlung kann gezielt einzelne Zellen abtöten, zum Beispiel bei dem Wurm *Caenorhabditis elegans*, einem beliebten Labortier von Molekularbiologen. Andererseits berichteten Richard L. Fork von den Bell Laboratories in den 1970er Jahren und Rafael Yuste von der Columbia University in New York 2002, Neurone ließen sich mit Laserlicht stimulieren, das ihre Membranstruktur kurzzeitig stört.

In jüngerer Zeit nutzten die Arbeitsgruppen von Gero Miesenböck (damals an der Yale University; siehe Spektrum der Wissenschaft 5/2009, S. 48) und Ehud Isacoff, Richard H. Kramer und Dirk Trauner (alle damals an der University of California in Berkeley) Mehrkomponentensysteme, um Zellfunktionen mit Licht zu steuern. Sie schleusten etwa ein Protein ein, das Neurone beeinflussen kann, sowie eine Chemikalie, die nach Bestrahlung mit ultraviolettem Licht das Protein aktiviert.

Das gezielte Zerstören von Zellen oder Molekülen bietet jedoch nur beschränkte experimentelle Möglichkeiten. Zudem sind Mehrkomponentensysteme zwar elegant und oft nützlich, haben sich jedoch bei Säugetieren als nur bedingt

anwendbar erwiesen. Um weiterzukommen, mussten die Forscher also auf Einkomponentensysteme umsteigen. Diese neue Strategie nutzt die beschriebenen lichtaktivierten Proteine aus Mikroorganismen: die Bacteriorhodopsine, Halorhodopsine und Channelrhodopsine.

Im Jahr 2000, lange nachdem Bacteriorhodopsin und Halorhodopsin entdeckt worden waren, veröffentlichte das japanische Kazusa-DNA-Forschungsinstitut Tausende neu entdeckter Gensequenzen der Grünalge *Chlamydomonas reinhardtii* in online frei zugänglichen Datenbanken. Der Biophysiker Peter Hegemann – heute an der Humbolt-Universität zu Berlin – arbeitete damals an der Universität Regensburg und hatte bereits vermutet, dass *Chlamydomonas* über einen durch Licht aktivierbaren Ionenkanal verfügt. Beim Durchsehen der neuen Sequenzen bemerkte er zwei längere Abschnitte, die bakteriellen Rhodopsingenen ähnelten. Er erhielt die entsprechende DNA von Kazusa und bat Georg Nagel, damals Forschungsgruppenleiter am Max-Planck-Institut für Biophysik in Frankfurt, zu prüfen, ob die Gene Ionenkanäle kodierten.

Und tatsächlich: Beide Sequenzen enthielten je ein Gen für einen Membrankanal aus nur einem Proteinmolekül, der sich bei Bestrahlung mit blauem Licht öffnet. Channelrhodopsin-1 (ChR1) lässt dabei selektiv Wasserstoffionen durch die Membran passieren, Channelrhodopsin-2 (ChR2) zusätzlich auch noch einige andere positive geladene Teilchen, etwa Natriumionen. Fast zeitgleich wies John L. Spudich von der University of Texas Medical School in Houston unabhängig davon nach, dass diese Gene für lichtgesteuerte Reaktionen von *Chlamydomonas* wichtig sind. Allerdings trug die Entdeckung der Channelrhodopsine zunächst nicht mehr zum Fortschritt der Neurowissenschaften bei als jene der Bacteriorhodopsine und Halorhodopsine Jahrzehnte zuvor.

Eine Reihe von Wissenschaftlern hat mir später gestanden, dass sie durchaus darüber nachgedacht hätten, bakterielle oder aus Algen stammende Opsingene in Neurone einzubringen und die Aktivität der modifizierten Zellen durch Belichtung zu steuern. Sie alle ließen die Idee jedoch wieder fallen, weil es unwahrscheinlich erschien, dass tierische Zellen die bakteriellen Proteine in ausreichenden Mengen und ohne schädliche Wirkungen synthetisieren würden. Es galt auch als so gut wie sicher, dass die Ionenkanäle zu langsam und zu ineffektiv arbeiten würden, um die Nervenzellen zu aktivieren. Zudem benötigen die Opsine, um Photonen zu absorbieren, eine Vitamin-A-ähnliche Substanz als Kofaktor: das all-trans-Retinal. Die Gefahr war einfach zu groß, letztlich nur Zeit und Geld zu verschwenden.

Doch während meiner Arbeit als Assistenzarzt in der Psychiatrie hatte ich die Schwächen und schädlichen Nebenwirkungen von Psychopharmaka und anderen Therapieformen, etwa der Elektrokrampftherapie, aus erster Hand kennen gelernt. Diese Erfahrungen gaben den Ansporn da-

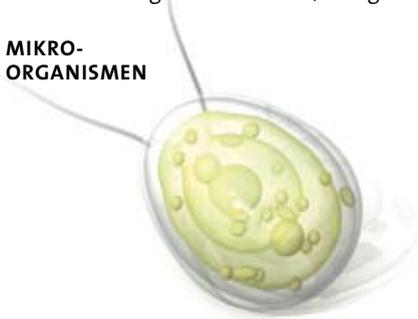
Als Assistenzarzt in der Psychiatrie hatte ich die Schwächen konventioneller Therapien aus erster Hand erlebt

Die bescheidenen Ursprünge lichtempfindlicher Proteine

Einige Algen und andere Mikroorganismen benötigen zum Überleben Opsinproteine – Ionenkanäle, die auf sichtbares Licht reagieren. Wenn sie derart aktiviert werden, verändern sie den Strom elektrisch geladener Teilchen (Ionen) durch Zellmembranen. Das ermöglicht den Zellen, Energie zu gewinnen. Die ver-

schiedenen Typen der Opsine unterscheiden sich in ihrer Lichtempfindlichkeit und ihrer Reaktion. Die Gene dieser Proteine sind das Fundament der Optogenetik: einer Technologie, mit der Neurowissenschaftler heute die Aktivität bestimmter Neurone steuern können.

MIKRO-ORGANISMEN



Chlamydomonas reinhardtii – eine einzellige Süßwasseralge, die mit Hilfe von zwei Geißeln schwimmt



Volvox carteri – eine mit *Chlamydomonas* eng verwandte Alge, bei der Hunderte von Zellen kugelförmige Kolonien bilden



Natronomonas pharaonis – ein Archaeobakterium, das nur in extrem salzigem Wasser überleben kann

VORKOMMEN



weltweit in feuchten Böden und Süßwasser

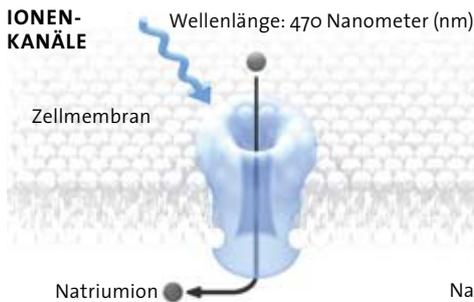


in Seen, Teichen und Tümpeln

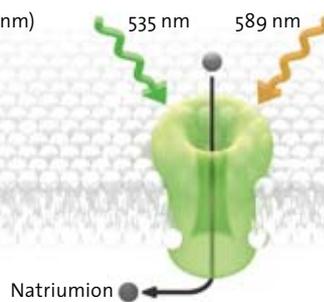


in alkalischen Salzseen in Ägypten und Kenia

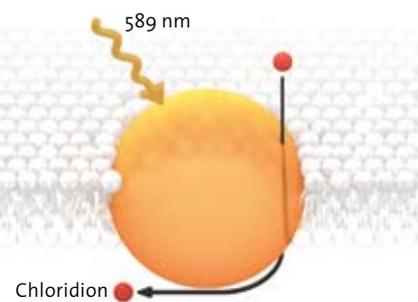
IONEN-KANÄLE



Das Channelrhodopsin ChR2 lässt als Reaktion auf blaues Licht positiv geladene Natriumionen durch die Membran strömen.

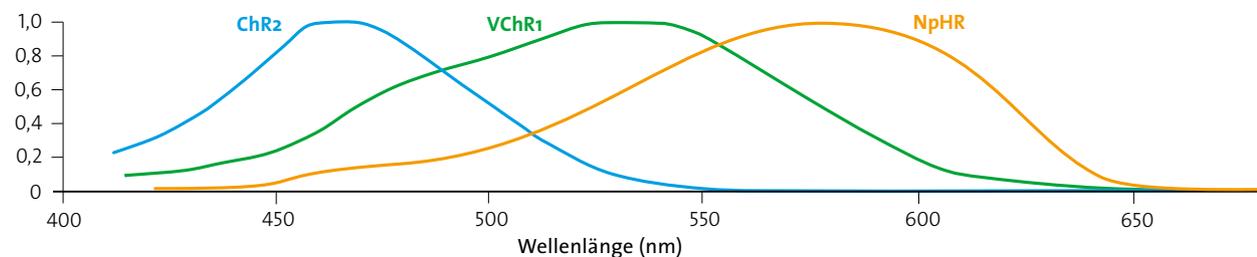


Das Channelrhodopsin VChR1 ist empfindlich für grünes und gelbes Licht bestimmter Wellenlängen.



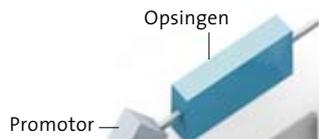
Das Halorhodopsin NpHR reagiert auf gelbes Licht und reguliert den Fluss negativ geladener Chloridionen.

RELATIVE REAKTIONSKRÄFTE AUF LICHT

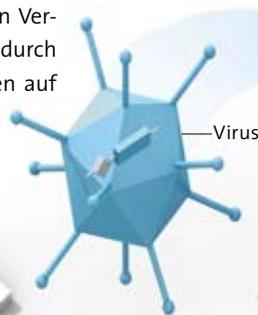


Rezept für lichtempfindliche Neurone

Bei **optogenetischen Experimenten** schleusen Forscher mit Hilfe umkonstruierter Viren Opsingene in Hirnzellen von Versuchstieren ein. Sie können dann ausgewählte Neurone durch Lichtimpulse zum Feuern bringen und die Auswirkungen auf das Verhalten der Tiere beobachten.



Ein Opsingen wird mit einem Promotor kombiniert – einem genetischen Element, das dafür sorgt, dass ein Gen nur in bestimmten Zellen aktiv wird.



Der Experimentator baut das modifizierte Gen in das Genom von Viren ein und spritzt diese dann ins Gehirn eines Versuchstiers, etwa einer Maus.



für, dass ich 2004 in Stanford gemeinsam mit den Doktoranden Edward Boyden und Feng Zhang ein Team gründete, das diesen riskanten Ansatz verfolgte.

Mit Hilfe der so genannten Transfektion, einer etablierten Gentransfertechnik, schleusten wir das Gen für Channelrhodopsin-2 in Neurone ein, die in Kulturschalen wuchsen. Hierzu bauten wir das ChR2-Gen und einen genetischen Schalter – einen »Promotor« – in das Erbgut eines so genannten Vektors (zum Beispiel ein harmloses Virus) ein, der diese DNA dann in die Zellen brachte. Der Promotor legt fest, welcher Typ von Neuronen die Opsinproteine herstellt – zum Beispiel solche, die den Neurotransmitter Glutamat produzieren.

Der Zufall ebnet den Weg zum Durchbruch

Wider alle Erwartung funktionierte das Experiment, und zwar erstaunlich gut. Mit einfachen, unschädlichen Lichtblitzen konnten wir verlässlich und auf Millisekunden genau steuern, wann die Opsin produzierenden Neurone Aktionspotenziale auslösen: jene elektrischen Impulse, über die Nervenzellen Informationen weiterleiten. Channelrhodopsine – und, wie wir später herausfanden, auch Bakteriorhodopsin und Halorhodopsin – versetzen uns also in die Lage, die neuronale Aktivität zellverträglich über Lichtimpulse zu kontrollieren. Dies funktionierte unter anderem deswegen so gut, weil das Gewebe von Säugetieren glücklicherweise von Natur aus genug all-trans-Retinal enthält – jenen Kofaktor, den die Opsine benötigen, um Photonen einzufangen. Daher muss außer den Opsingenen nichts weiter in die Zellen eingebracht werden.

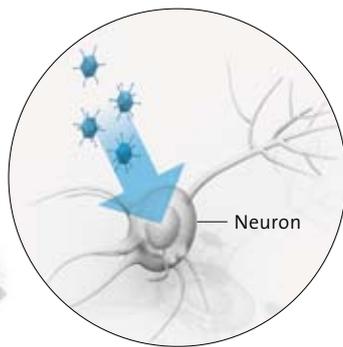
2005 erschien unsere erste Publikation hierzu, und ein Jahr später bezeichneten Mark Schnitzer und ich die Methode in einem Übersichtsartikel erstmals als »Optogenetik«. Zu diesem Zeitpunkt arbeiteten bereits zahlreiche Labors in aller Welt damit und nutzten dafür die von meinem Team auf optimales Funktionieren in Säugerzellen getrimmten

Opsingene. Die Anzahl der optogenetischen Werkzeuge und die Vielfalt ihrer Einsatzmöglichkeiten hat seitdem rasch zugenommen – durch zwei Vorgehensweisen: Zum einen entdeckten Forscher in frei lebenden Organismen neue Opsinvarianten; zum anderen veränderten sie gezielt die bekannten Opsine, um sie noch vielfältiger nutzbar zu machen.

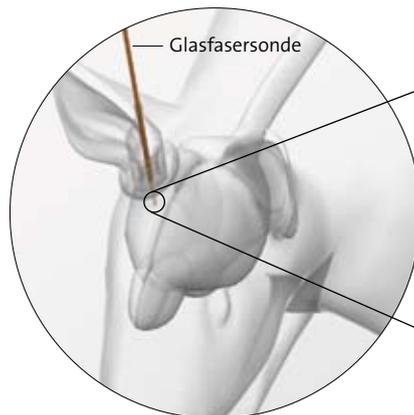
So stieß Feng Zhang 2008 beim Durchsuchen des Genoms der Alge *Volvox carteri* auf ein drittes Channelrhodopsin (VChR1), das auf gelbes Licht reagiert statt auf blaues. Diese Entdeckung eröffnete neue Möglichkeiten: Indem wir VChR1 gemeinsam mit den anderen Channelrhodopsinen einsetzen, können wir nun zwei verschiedene Zelltypen in ein und derselben Kulturschale unabhängig voneinander ansteuern.

Inzwischen fanden wir auch heraus, welches das am stärksten wirksame Channelrhodopsin ist: ein Hybrid aus Teilen von VChR1 und ChR1. Zudem stellten wir zusammen mit anderen Forschern »ultraschnelle« und »ultralangsame« Mutanten der Channelrhodopsine her, die uns eine überaus genaue Kontrolle über Zeitpunkt und Dauer der lichtinduzierten Aktionspotenziale ermöglichen. Erstere können mehr als 200 Signale pro Sekunde auslösen, letztere versetzen Neurone nach nur einem einzigen Lichtimpuls in einen stabilen erregbaren Zustand – oder beenden diesen wieder. Unsere neueste Opsinvariante reagiert auf tiefrotes Licht, nahe dem Infrarotbereich, das weit ins Gewebe eindringt, scharf fokussiert bleibt und von den Zellen ausgesprochen gut vertragen wird.

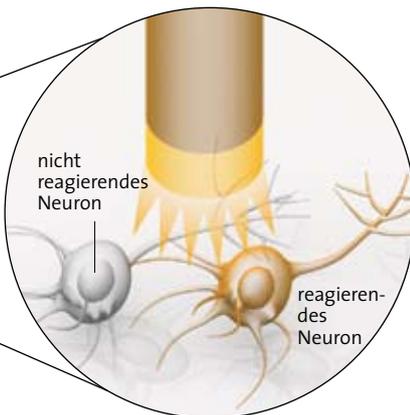
Dank molekularbiologischer Manipulation der Opsingene können wir heute nicht nur die elektrischen Aktivitäten einer Zelle mittels Licht steuern, sondern auch biochemische Vorgänge. Viele derzeit eingesetzte Medikamente wirken auf Proteine in der Membran der Zelloberfläche, die als G-Proteingekoppelte Rezeptoren bezeichnet werden. Diese Proteine reagieren auf Signalmoleküle außerhalb der Zelle, zum Beispiel Adrenalin: Sie verändern die Konzentrationen intrazel-



Die Viren infizieren zahlreiche verschiedene Nervenzelltypen, von denen dank des Promotors nur ein bestimmtes das Opsinprotein produziert.



Ins Gehirn der Maus eingeführte Glasfasersonden erlauben eine gezielte Belichtung im Gehirn. Diese löst spezifische Muster von Nervenzellaktivität aus.



BRYAN CHRISTIE DESIGN

lulärer biochemischer Signalstoffe, etwa Kalziumionen, und beeinflussen so die verschiedensten Aktivitäten der Zelle.

Raag Airan und einige andere in meinem Labor hängten nun den lichtempfindlichen Teil eines Rhodopsinmoleküls an einen G-Protein-gekoppelten Rezeptor. Auf diese Weise entwickelten sie Rezeptoren, die auf grünes Licht reagieren – genannt »optoXRs«. Wenn wir optoXR-Gene in das Gehirn von Nagetieren einschleusen, können wir dort mit Hilfe von Licht biochemische Vorgänge in bestimmten Zelltypen beeinflussen, während sich die Tiere ganz normal im Käfig bewegen. Damit ist der Weg frei für eine optogenetische Kontrolle sämtlicher Zellen und Gewebe, auch außerhalb des Nervensystems.

Molekulare Postleitzahl

Viele der natürlichen Opsingene, die in der letzten Zeit in den Genomen verschiedener Mikroorganismen entdeckt wurden, kodieren für Proteine, die Säugerzellen nicht effektiv produzieren können. Viviana Gradinaru aus meiner Arbeitsgruppe hat daher eine Reihe Techniken entwickelt, um den Transfer und die Herstellung der Opsingene zu optimieren. Sie baut bestimmte DNA-Fragmente in die Genkonstrukte mit ein, die als eine Art Adressaufkleber fungieren. Diese Etiketten dirigieren die eingebrachte Erbinformation an die richtigen Orte innerhalb der Zelle und sorgen dafür, dass funktionsfähige Lichtrezeptoren entstehen.

Mit speziellen Glasfaserapparaturen können wir seit 2006 das Licht zwecks optogenetischer Steuerung in beliebige tiefe oder oberflächliche Hirnareale frei umherlaufender Tiere führen. Um gleichzeitig die dadurch hervorgerufenen Signale aufzuzeichnen, haben wir auf Millisekunden genau arbeitende Instrumente entwickelt, die Glasfaseroptik und Elektroden in sich vereinen (wir nennen sie »Optroden«). Da sich Lichtstimulation und elektrische Ableitung hierbei gegenseitig nicht

stören, können wir nun beispielsweise die elektrischen Reaktionen der für Bewegungskontrolle zuständigen neuronalen Schaltkreise erfassen, während wir die beteiligten Zellen über die Opsine steuern. Je komplexer die eingespeisten Signale und die registrierten Reaktionen werden, desto mehr lernen wir über die Funktion neuronaler Netzwerke aus der Art, wie sie unsere Signale verarbeiten. Damit können wir genau untersuchen, was hier bei psychiatrischen und neurologischen Erkrankungen falschläuft. Dieses Wissen wird hoffentlich dazu beitragen, Therapieformen zu entwickeln, welche die normale Funktion solcher Schaltkreise wiederherstellen.

Die Bedeutung der Optogenetik als Forschungsmethode wächst rasant – insbesondere in Kombination mit anderen Technologien. In den letzten Jahren hatten wir viele Fortschritte in den Neurowissenschaften der funktionellen Magnetresonanztomografie (fMRT) zu verdanken. Dieses bildgebende Verfahren gilt gemeinhin als Methode, mit der sich neuronale Aktivität im Gehirn, die durch externe Reize hervorgerufen wird, exakt lokalisieren lässt. Im Grunde registriert die fMRT jedoch nur die Veränderungen im Sauerstoffgehalt des Bluts in verschiedenen Hirnregionen – eine sehr grobe Annäherung an die eigentliche Nervenzellfunktion.

Daher bestand stets ein gewisser Zweifel, ob sich die komplexen fMRT-Signale tatsächlich direkt auf neuronale Aktivität zurückführen lassen. Im Mai 2010 gelang uns jedoch der Beweis: Mit einer Kombination von Optogenetik und fMRT (»ofMRT«) zeigten wir, dass das Feuern erregender Neurone für sich allein ausreicht, um im fMRT-Scanner Signale hervorzurufen. Zudem lassen sich neuronale Schaltkreise mit dieser Methodenkombination exakter und vollständiger lokalisieren, als es zuvor mit Elektroden und chemischen Wirkstoffen möglich war.

Die Optogenetik hilft heute bereits, manche Fragen zu menschlichen Erkrankungen zu beantworten. Mit ihr kann-

ten wir etwa in Tierexperimenten die Funktion der so genannten Hypocretinzellen im Thalamus beeinflussen. Diese Neurone werden mit Narkolepsie in Zusammenhang gebracht – einer Krankheit mit plötzlich auftretendem, überwältigendem Schlafzwang. Wie wir herausfanden, lösen spezifische Muster der elektrischen Aktivität in diesen Neuronen das Erwachen aus. Sollte es gelingen, solche Neuronenaktivität beim Menschen gezielt hervorzurufen, könnte sich daraus eine neue Therapie für die Narkolepsie ergeben. Wichtig ist auch schon die Erkenntnis, dass das Feuern definierter Neuronengruppen komplexe Verhaltensweisen bewirken kann.

Die Optogenetik hilft auch zu klären, wie Neurone, die Dopamin als Signalsubstanz nutzen, Freude und ein Gefühl der Belohnung auslösen. Mein Team rief bei frei laufenden Mäusen unterschiedlich getaktete Aktivitätsschübe in bestimmten dopaminergen Neuronen hervor. Dabei identifizierten wir Stimulationsmuster, die den Tieren anscheinend ein Belohnungsempfinden vermittelten: Ohne jegliche andere Anreize hielten sich die Mäuse bevorzugt an jenen Stellen des Käfigs auf, an denen ihre dopaminergen Zellen auf eine spezielle Weise getriggert worden waren. Auf diesem Weg lassen sich neuronale Aktivitätsmuster identifizieren, die sowohl den normalen Funktionen des Belohnungssystems als auch seinem Versagen bei Depression und Drogenmissbrauch zu Grunde liegen.

Optogenetische Untersuchungen erlauben uns auch, die Parkinsonkrankheit besser zu verstehen. Bei dieser sind Neuronenschaltkreise gestört, die für Bewegungen zuständig sind. Seit den 1990er Jahren setzen Ärzte bei diesen Patienten mit beachtlichem Erfolg die so genannte Tiefenhirnstimulation ein. Hierbei vermittelt eine tief im Gehirn implantierte Elektrode ähnlich einem Herzschrittmacher zeitlich präzise elektrische Reize, etwa im subthalamischen Kerngebiet.

Zwei Signalwege der Bewegungssteuerung

Doch das Potenzial dieser Therapieform bei Morbus Parkinson und anderen Erkrankungen ist begrenzt, denn die Elektroden stimulieren ungewollt auch benachbarte Hirnareale. Zudem ist die Frage keineswegs geklärt, welche Art von Impulsen die beste Wirkung zeigt. In letzter Zeit haben wir jedoch an Tiermodellen der Parkinsonkrankheit mit optogenetischen Methoden grundlegende Erkenntnisse über die erkrankten Neuronennetze und die Wirkmechanismen von Therapien gewonnen.

Zum Beispiel wirkt die Tiefenhirnstimulation dann am besten, wenn sie nicht auf die Zellkörper der Neurone einwirkt, sondern auf die Fortsätze der Zellen, die Signale weiterleiten. So verändert sie den Informationsfluss zwischen verschiedenen Hirnregionen. Zusammen mit Anatol Kreitzer von der University of California in San Francisco gelang uns

Die Werkzeugkiste der Optogenetiker

Forscher erweitern die Möglichkeiten der Optogenetik, indem sie nach Genen weiterer lichtempfindlicher Proteine suchen und die Erbinformation bereits bekannter Opsine modifizieren. Die Tabelle nennt einige der nützlichsten Opsine und ihre Einsatzgebiete.

| OPSIN | HERKUNFT | LICHTEMPFLINDLICHKEIT | EINSATZGEBIET |
|---|--|--|---|
| Ultraschnelle Mutanten des Channelrhodopsins ChR2 | <i>Chlamydomonas reinhardtii</i> (Alge) | 470 Nanometer (nm) für maximale Aktivierung | Kurzzeitige Aktivierung von Neuronen in Millisekundenpräzision; bis zu 200 Impulse pro Sekunde |
| Ultralangsame Mutanten des Channelrhodopsins ChR2 («Step function opsins») | <i>Chlamydomonas reinhardtii</i> (Alge) | 470 nm zum Einschalten, 546 nm zum Abschalten einiger Mutanten; reversibles Versetzen von Zellen in einen erregbaren Zustand | Wegen ihrer Lichtempfindlichkeit sind diese Opsine nützlich, wenn das Licht dickere Gewebeschichten durchdringen muss (etwa in den Gehirnen von Säugern). |
| Channelrhodopsin VChR1 | <i>Volvox carteri</i> (Alge) | 535 und 589 nm | Auslösen neuronaler Aktionspotenziale. Da VChR1 auf gelbes Licht reagiert und ChR2 auf blaues, lässt sich so gleichzeitig und unabhängig die Aktivität verschiedener Neuronentypen steuern. |
| OptoXRs | Künstliches Hybrid aus Rhodopsin und G-Proteingekoppelten Rezeptoren | 500 nm | Schnelle und zelltypspezifische Steuerung biochemischer Signalwege; eignen sich für Experimente mit frei umherlaufenden Tieren |

Ethische Fragen zur Optogenetik

Mit Hilfe der Optogenetik lassen sich – zumindest prinzipiell – Gehirnfunktionen manipulieren. Daher werfen sie ähnliche ethische und philosophische Fragestellungen auf wie psychotrope Medikamente und hirnchirurgische Eingriffe. Im Gegensatz zu diesen Methoden erscheint jedoch ein Missbrauch der Optogenetik beim Menschen unwahrscheinlich. Schließlich sind die neuen, hochkomplexen Techniken kaum ohne das Wissen und Einverständnis des Patienten anwendbar.

Dagegen wirft die Präzision der optogenetischen Technologie subtilere Fragen auf, denn letztlich entstehen Persönlichkeit, Vorlieben, Fähigkeiten, Gefühle und Erinnerungen des Menschen aus zeitlich-räumlichen Mustern von elektrischen und biochemischen Signalen neuronaler Schaltkreise. Diese wesentlichen Merkmale des menschlichen Geistes manipulieren zu können, würde grundlegende philosophische Probleme aufwerfen – etwa die Frage, wann es angezeigt oder gerechtfertigt ist, solche Veränderungen vorzunehmen. Zudem werden wir vor

allgemeinere philosophische Überlegungen zur Natur und Formbarkeit des Selbst und des menschlichen Willens gestellt.

Bislang waren Eingriffe am Gehirn so unpräzise, dass diese wichtigen Fragen eher theoretischer Natur blieben und von Ethikern oder Rechtswissenschaftlern nur ansatzweise erörtert wurden. Psychiatern allerdings sind diese Probleme nicht fremd – sie stellen sich schon beim heutigen Stand der Methoden zur Beeinflussung menschlicher Emotionen und Wahrnehmungen.

Binnen weniger Jahre entwickelte sich die Optogenetik mit unglaublicher Geschwindigkeit. Ebenso wie andere technologische Neuerungen erfordert auch die zunehmende zeitliche und räumliche Präzision optogenetischer Methoden einen fortlaufenden öffentlichen Diskurs. Neurowissenschaftler müssen bereit sein, interessierten Laien zu erklären, was ihre Forschungsergebnisse für das Verständnis und die Therapie psychiatrischer Erkrankungen bedeuten – und was nicht.

eine funktionelle Kartierung von zwei Signalwegen der motorischen Steuerung im Gehirn: einen, der Bewegungen verlangsamt, und einen, der sie beschleunigt und damit den Symptomen der Parkinsonkrankheit entgegenwirkt.

In einem weiteren Projekt brachten wir Parvalbumin-Neurone in der Großhirnrinde dazu, die so genannten Gammawellen zu beeinflussen: mit einer Frequenz von 40 Hertz rhythmisch schwankende Hirnaktivität. Seit einiger Zeit ist schon bekannt, dass Schizophreniepatienten veränderte Parvalbumin-Zellen besitzen sowie – genauso wie Patienten aus dem Autismuspektrum – abnorme Gammawellen aufweisen. Doch ob es hier einen ursächlichen Zusammenhang gibt, war noch nicht geklärt. Mit Hilfe der Optogenetik konnten wir zeigen, dass Parvalbumin-Zellen Gammawellen verstärken und dass diese Wellen wiederum den Informationsfluss in neuronalen Schaltkreisen der Großhirnrinde verbessern.

Gestörte Informationsverarbeitung bei Schizophrenie

Typisch für Schizophrenie ist, dass die Betroffenen banale Ereignisse als Teil größerer Vorkommnisse fehlinterpretieren und ihnen eine zu hohe Bedeutung zuweisen, was zu Verfolgungswahn und anderen wahnhaften Vorstellungen führt. Dies lässt sich als Störung der Informationsverarbeitung auffassen. Oft sind die Patienten auch unfähig zu erkennen, dass sie ihre eigenen Gedanken selbst erzeugen – wohl ein weiterer Defekt der Informationsverarbeitung, auf Grund dessen vermutlich Schizophrene beängstigende Stimmen hören.

Bei Autisten hingegen liegt quasi der umgekehrte Fall vor: Eine stark eingeengte Form der Informationsverarbeitung hindert die Patienten daran, das große Ganze zu sehen. Die Betroffenen fokussieren ihre Wahrnehmung auf Teilaspekte von Objekten, Personen und Gesprächen. Störungen der Kommunikation und des Sozialverhaltens sind die Folge. Ein

genaueres Verständnis der Gammawellen mit Hilfe optogenetischer Techniken könnte zu neuen Einsichten in diese komplexen Erkrankungen führen. Insgesamt verändert die Optogenetik derzeit fundamental unser Verständnis von der Rolle elektrisch erregbarer Gewebe im gesunden und im kranken Organismus. Ein bemerkenswerter Fortschritt, wenn man bedenkt, dass er mit der Entdeckung lichtempfindlicher Proteine bei Bakterien begonnen hat. ~

DER AUTOR



Karl Deisseroth ist Professor für Psychiatrie und Biotechnik an der Stanford University (Kalifornien). Im Jahr 2010 erhielt er den internationalen Nakazone-Preis für seine Arbeiten zu bakteriellen Opsinen und die Entwicklung der Optogenetik.

QUELLEN

Airan, R. D. et al.: Temporally Precise in Vivo Control of Intracellular Signaling. In: Nature 458, S. 1025–1029, 2009

Boyden, E. S. et al.: Millisecond-Timescale, Genetically Targeted Optical Control of Neural Activity. In: Nature Neuroscience 8, S. 1263–1268, 2005

Gradinaru, V. et al.: Optical Deconstruction of Parkinsonian Neural Circuitry. In: Science 324, S. 354–359, 2009

Zhang, F. et al.: Optogenetic Interrogation of Neural Circuits: Technology for Probing Mammalian Brain Structures. In: Nature Protocols 5, S. 439–456, 2010

WEBLINK

www.nature.com/nmeth/focus/moy2010/index.html
Englische Überblickseite der Fachzeitschrift »Nature Methods« mit mehreren Beiträgen über die Optogenetik als Methode des Jahres 2010

Maulwurf-Alarm à la Darwin

Warum fliehen Regenwürmer manchmal massenhaft an die Erdoberfläche? Schon Charles Darwin vermutete, dass Maulwürfe das seltsame Phänomen verursachen. Doch erst jetzt bestätigte ein Forscher diese Hypothese.

Von Kenneth Catania

A benddämmerung, in einem menschenleeren Gebiet Floridas. Aus der Vegetation dringen Geräusche – vielleicht die eines Raubtiers? Ein Alligator, mögen Sie denken. Doch nein. Kein Alligator, keine Bärenmutter, kein Wildtier weit und breit. Vielmehr stammen die Geräusche von einem Wurmgrunzer – mit anderen Worten: von einem Menschen.

Regenwurmgrunzer sind Experten, wenn es darum geht, Würmer aus ihren Gängen zu locken. Das müssen sie auch sein, denn schließlich sammeln sie die Tiere, um sie Anglern als Köder zu verkaufen. Zuerst rammen die Jäger einen Pflock in die Erde und reiben ihn dann mit einem länglichen Stück Metall, dessen Form der eines Schleifsteins ähnelt. Die dabei entstehenden Vibrationen übertragen sich auf den Boden – und plötzlich tauchen rund um den Pflock Hunderte der hier heimischen großen Regenwürmer an der Oberfläche auf.

Doch warum sollten sich Regenwürmer aus der Erde wagen, um dann völlig schutzlos zu sein? Schließlich stehen sie ganz oben auf den Speisezetteln vieler Vögel wie auch von Ameisen oder Igel. Üblicherweise behaupten Köderfänger, dass Regenwürmer die Vibrationen als Folge fallender Regentropfen interpretieren; die Würmer eilten also an die Ober-

fläche, um der Gefahr zu entinnen, im wassergesättigten Boden zu ertrinken. Das klingt plausibel – schließlich hat jeder schon einmal nach einem starken Regen zahlreiche Regenwürmer über den Boden kriechen sehen. Doch es gibt noch eine andere mögliche Erklärung für dieses Verhalten. Und die reicht mindestens bis in die Zeit von Charles Darwin zurück. Aus ganz Europa hatte der englische Naturforscher Geschichten über lokale Wurmart zugetragen bekommen, die durch Vibrationen aus dem Boden gescheucht wurden. Manche Beobachter tippten schon damals auf Maulwürfe, und auch Darwin stellte in seinem letzten Buch – »Die Bildung der Ackererde durch die Thätigkeit der Würmer« von 1881 – entsprechende Vermutungen an. Als er allerdings versuchte, Regenwürmer mittels Vibrationen aus dem Boden zu locken, stellten sich kaum Erfolge ein, und er ließ die Angelegenheit bald wieder auf sich beruhen. Doch Darwin konnte ja Gary und Audrey Revell noch nicht kennen.

Die Revells gehören zu den wenigen Ködersammlern, die durch den Verkauf von Regenwürmern ihren Lebensunterhalt bestreiten. Schon seit Generationen wird im Südosten der USA die Tradition des Regenwurmgrunzens gepflegt. Jährlich trifft man sich beim Worm Gruntin' Festival in Sopchoppy im Nordwesten Floridas, verkauft Wurmgrunzer-T-Shirts und wählt sogar eine Wurmgrunzer-Königin. Als das Wurmgrunzen im Apalachicola-Nationalpark vor den Toren von Sopchoppy in den 1960er und 1970er Jahren geradezu boomte, weil die Medien darüber zu berichten begonnen hatten, machte sich die Parkverwaltung große Sorgen um *Diplocardia mississippiensis*, so der zoologische Name für das Objekt der Begierde. Sie fürchtete, die Würmer könnten dort zu stark abgesammelt werden. Seither benötigt man eine Genehmigung für das Wurmgrunzen innerhalb des Gebiets.

Der Apalachicola-Wald erschien mir der ideale Schauplatz zu sein, um die Maulwurfhypothese zu überprüfen. Die Reaktion der *Diplocardia* dieser Gegend auf Vibrationen ist geradezu legendär. Außerdem sind viele Würmer, die man in Nordamerika antrifft, einst aus Europa eingeführt worden; doch die *Diplocardia* stammen tatsächlich aus der Region.

AUF EINEN BLICK

PANIK UNTER TAGE

1 Bestimmte Regenwurmart flüchten an die Erdoberfläche, sobald sie Bodenvibrationen spüren. Bereits Charles Darwin und andere Forscher vermuteten, dass sie die Schwingungen als Warnung vor räuberischen Maulwürfen interpretieren.

2 Jetzt zeigen Experimente, dass die Annahme zutrifft. Andere Hypothesen, denen zufolge der Fluchtreflex mit den Geräuschen fallender Regentropfen zu tun hat, erwiesen sich als falsch.

3 Fressfeinde wie Heringsmöwen oder Waldbachschildkröten machen sich den Fluchtreflex der Würmer vermutlich zu Nutze: Indem sie durch Herumstapfen Vibrationen im Erdreich auslösen, locken sie ihre Beute an die Oberfläche.

Folglich haben sie sich gemeinsam mit ihren lokalen Feinden entwickelt. So beruht auch ihr Verhalten auf Anpassungen an ihre Umwelt.

Die Revells halfen mir bei meinem Vorhaben. Während Gary mit Holzstab und Metall arbeitete und Audrey die Würmer einsammelte, markierte ich jede Position, an der ein Wurm aus der Erde auftauchte, mit einem Fähnchen. Als das letzte Tier aufgesammelt war, staunte ich nicht schlecht: Die Würmer waren bis zu zwölf Meter von Gary entfernt aus der Erde gekrochen.

Mit Hilfe von Geofonen – also Geräten, die Vibrationen des Bodens aufzeichnen – bestimmte ich Frequenz und Amplitude der durch das Wurmgrunzen an verschiedenen Orten erzeugten Schwingungen. Außerdem beobachtete ich, dass die Tiere sehr schnell aus dem Boden kamen. Ihr Verhalten entsprach also jenem, das auftritt, wenn im Untergrund Gefahr droht und die Tiere die Flucht ergreifen müssen. Ist die Gefahr vorbei, bewegen sie sich wieder langsamer und suchen einige Meter weiter einen Platz, wo sie sich erneut in die Erde eingraben können.

Gefährlicher Ausflug an die Erdoberfläche

Die bei Weitem meisten Tiere gelangten, nachdem sie durchschnittlich etwa zehn Minuten herumgekrochen waren, unverletzt unter die Erde zurück. Einige wurden allerdings von Ameisen angegriffen oder von Schlangen, Eidechsen oder Fleisch fressenden Käfern verschlungen. Und bei heißem, trockenem Wetter vertrockneten viele der Tiere einfach. Selbst für die Überlebenden war der »Ausflug« ziemlich anstrengend: Das Wiedereingraben dauerte zwischen zehn Minuten und mehr als einer Stunde.

Das Auftauchen aus dem Boden verlangt den Tieren also viel ab, weshalb sie es wohl nur aus einem triftigen Grund auf sich nehmen dürften. Wäre vielleicht ein Maulwurf ein solcher Grund? Zunächst musste ich überprüfen, ob die Würmer in dieser Gegend tatsächlich Gefahr laufen, einem Maulwurf zu begegnen. Diese Frage war schnell beantwortet: Gerade erst im Apalachicola-Wald angekommen, entdeckte ich bereits aus dem Auto heraus die typischen Anzeichen für Maulwürfe: tunnelartige Erdaufwürfe, welche die unbefestigten Waldwege kreuzten.

Im Lauf der nächsten Tage fuhr ich kreuz und quer durch den Wald und markierte schließlich 39 solcher »Straßenkreuzungen«. Die einzige Maulwurfart, deren Vertreter in dieser Region leben, ist der Ostamerikanische Maulwurf (*Scalopus aquaticus*). Einige der Tiere zu fangen war nicht schwer. Dort nämlich, wo passierende Autos über ihre Tunneln fahren, müssen sie über kurz oder lang für Reparaturarbeiten vorbeischaun. Für die Maulwürfe ist es zwar anstrengend, sich ausgerechnet durch die von den Autos verdichtete Erde zu graben. Sie tun aber alles, was in ihrer Macht steht, um nicht aus der Erde herauskommen und sich einer Gefahr aussetzen zu müssen. Folglich ist ein Regenwurm, der es bis an die Oberfläche geschafft hat, dort auch sicher vor einem hungrigen Maulwurf.

MIT FROLD. GEN VON KENNETH CANANA



Die »Wurmgrunzerin« Audrey Revell sammelt in Florida Würmer, um sie Anglern als Köder zu verkaufen.

Als Nächstes galt es herauszufinden, ob sich denn die Lebensräume der Tiere überhaupt überlappen. Gary Revell wies mich darauf hin, dass die Wurmsammler beim Einrammen ihrer Pflöcke im ganzen Wald Löcher hinterlassen. Ich brauchte also nur diese Löcher zu suchen und ihre Entfernung zu den jeweils nächsten Maulwurfstunnels zu bestimmen. Dann würde sich zeigen, wie nahe sich Maulwürfe und Wurmgrunzer kommen und damit auch Maulwürfe und Würmer. Acht verschiedene Standorte von Wurmgrunzern untersuchte ich und fand nahe bei jedem von ihnen auch Tunnel von Maulwürfen. Die durchschnittliche Entfernung von einem Loch zu einem Tunnel betrug nur 20 Meter, wesentlich weniger, als ich erwartet hatte. Mit anderen Worten: Der Boden des Apalachicola-Walds ist voller Maulwürfe.

Tagesration: 20 Würmer

Wie viele Regenwürmer mag diese Population wohl fressen? Ein einziger Maulwurf, den ich dort im Wald gefangen hatte, genehmigte sich während der folgenden zwei Wochen täglich 40 Gramm *Diplocardia*, also rund 20 Stück. Diese Ration entspricht knapp seinem Körpergewicht. Hat ein Maulwurf die Chance dazu, wird er jährlich mindestens 15 Kilogramm Regenwürmer oder ungefähr 7000 Tiere fressen. Offensichtliche Schlussfolgerung: Regenwürmer sollten Maulwürfe meiden, koste es, was es wolle.

Schließlich wollte ich auch die Bodenschwingungen vermessen, die von grabenden, Futter suchenden Maulwürfen ausgehen. Im Apalachicola-Wald hatte ich allerdings kein Glück damit, die Tiere bei der Jagd anzutreffen. Ostamerikanische Maulwürfe leben jedoch auch in Tennessee, wo ich zu Hause bin. Mit ein bisschen Geduld, einigen Geofonen und einem Laptop ausgestattet, filmte ich dort eine ganze Reihe von Maulwürfen dabei, wie sie die Erdoberfläche verwüsteten. Vi-

brationen erzeugen sie vor allem dadurch, dass ihre kräftigen Vorderpfoten das Wurzelwerk des Grases zerreißen. Diese Geräusche sind bis in mehrere Meter Entfernung zu hören. Noch in Florida hatte ich die Frequenzen gemessen, die Wurmgrunzer bei der Arbeit produzieren: Sie liegen zwischen 80 und 200 Schwingungen pro Sekunde. Nun stellte ich fest: Die beiden Spektren zeigten starke Überlappungen.

Wieder in Florida, machte ich mich daran, große Behälter zu bauen. Ich füllte sie mit Erde, um darin die Interaktionen zwischen Maulwürfen und Regenwürmern zu beobachten und zu filmen. Denn: Einmal hatten die Revells und ich einen Korb mit Erde sowie Dutzenden von Würmern gefüllt, und ich hatte just auch einen Maulwurf gefangen. Da konnten wir der Versuchung nicht widerstehen, diesen in den Korb zu setzen. Was geschah? Der Maulwurf grub sich in die Erde ein, und binnen Sekunden krochen die Regenwürmer eilends heraus. Ähnlich dramatische Szenen spielten sich in meinen Behältern ab. Kaum begannen die Maulwürfe mit dem Graben von Tunneln, flohen die Würmer mit größter (Wurm-) Geschwindigkeit aus der Erde. Bei weiteren Experimenten rüstete ich kleinere Behälter mit Lautsprechern aus und beschallte die Erde mit den Geräuschen eines nach Nahrung suchenden Maulwurfs. Und auch hier flohen die Würmer. Die Ergebnisse sind eindeutig: *Diplocardia*-Regenwürmer sind mit einem Reflex zur Flucht vor Maulwürfen ausgestattet und retten sich zur Erdoberfläche, sobald sich diese nähern.

Doch könnten die Regenwürmer ihr Fluchtverhalten nicht auch als Reaktion auf die Geräusche fallender Regentropfen entwickelt haben? Der einfachste Weg, das zu prüfen, bestand darin, auf mit heftigen Regenfällen verbundene Gewitter zu warten und die Reaktion der Regenwürmer im Freien zu beobachten. Gesagt, getan. In diesen Fällen kamen im Verlauf einer halben Stunde nur zwei oder drei von insgesamt



Im Südosten der Vereinigten Staaten sind viele Regenwurmgrunzer unterwegs. Einer von ihnen ist Gary Revell: Er lockt seine Beute aus dem Boden, indem er einen Holzstock in die Erde rammt und dann mit einem Metallblatt darüberreibt. So erzeugt er Vibrationen, die von den Würmern mit den Geräuschen

eines hungrigen Maulwurfs verwechselt werden. Die roten Fähnchen auf dem rechten Bild wurden vom Autor in den Boden gesteckt: Sie markieren die Positionen, an denen die Würmer an die Oberfläche kamen – in bis zu zwölf Meter Entfernung von ihrem »Jäger«.



MIT FREILEGEN VON KENNETH CATANIA

Die Vorderbeine des Ostamerikanischen Maulwurfs (*Scalopus aquaticus*) sind perfekt an das Graben in der Erde angepasst. Allerdings erzeugt ihr Schürfen Vibrationen, die den Regenwurm *Diplocardia mississippiensis* warnen. Um ihrem Feind zu entkommen, kriechen die Würmer an die Oberfläche. Manchmal freilich warten dort andere Räuber, welche die Vibrationen des Maulwurfs geschickt imitieren, zum Beispiel Waldbachschildkröten, Heringsmöwen – oder menschliche Regenwurmgrunzer.

300 Würmern an die Oberfläche. Diese Beobachtung stimmt mit einigen neueren Studien überein: Regenwürmer kriechen allenfalls dann an die Oberfläche, wenn sie viele Stunden im wassergesättigten Boden verbracht haben. Aber nicht in den ersten Minuten eines Gewitters, wie man erwarten würde, wenn sie auf die durch Regentropfen hervorgerufenen Vibrationen reagieren würden ...

Darwin lag also richtig. Regenwurmgrunzer machen sich offenbar ein Phänomen zu Nutze, das der Evolutionsbiologe Richard Dawkins als *rare enemy effect* (Seltener-Räuber-Effekt) bezeichnet. Er geht davon aus, dass Tiere bestimmte Reaktionen entwickeln, um ihren üblichen Feinden zu entkommen. Ein selten auftretender Räuber hingegen, mit dem sie nicht rechnen, kann aber genau von diesen Reaktionen profitieren. So ist es für einen Wurm zwar sinnvoll, an die Oberfläche zu fliehen, wenn er Vibrationen wahrnimmt, die von einem Maulwurf stammen könnten. Immerhin jagen diese Tiere Tag und Nacht. Doch die Fluchtroute muss nicht immer die beste sein. Zuweilen enden die Würmer eben im Magen eines anderen Raubtiers – oder am Angelhaken.

Der holländische Biologe und Nobelpreisträger Nikolaas Tinbergen hatte einst bemerkt, dass Heringsmöwen auf dem Boden herumwatscheln, um Würmer herauszulocken. Und Mitte der 1980er Jahre beschrieb John H. Kaufmann von der University of Florida, wie Waldbachschildkröten auf den Boden »stampfen«, um Würmer an die Oberfläche zu locken – ein leicht verdientes Abendessen. Beide Forscher schlossen daraus, dass die Vibrationen die Geräusche von Maulwürfen imitieren. Kaufmann (der übrigens ebenfalls aus Florida

stammt) vermutete sogar damals schon, dass die Waldbachschildkröten nach Würmern »grunzen«. Genau überprüft hat diese Idee allerdings noch niemand.

Nun stimmt es natürlich dennoch, dass manche Regenwürmer auch nach heftigen Regenfällen an die Erdoberfläche kommen. Bei *Amyntas gracilis* etwa, einem asiatischen Wurm, mag der Grund dafür sein relativ hoher Sauerstoffverbrauch sein. Auch Untersuchungen der in Deutschland verbreiteten Regenwurmart *Lumbricus terrestris* wären noch wünschenswert. Andererseits: Eine so gute Studienumgebung wie bei den Wurmgrunzern in Florida wird man anderswo kaum finden. Als ich meine Untersuchungen abgeschlossen hatte und meine Ausrüstung zusammenpackte, um die Gegend nach mehreren Besuchen endgültig zu verlassen, erhielt ich von den Revells ein Abschiedsgeschenk: eines der Metallstücke, die man zum Wurmgrunzen nutzt – und zwar ein Exemplar, das seit Jahrzehnten im Besitz ihrer Familie war. Welche Ehre für mich! Und natürlich musste ich wissen, wie gut es funktionierte. Kurz zuvor hatte ich einen Maulwurf gefangen, den ich nun füttern wollte. Ich ging also in den Wald und versuchte mich selbst am Regenwurmgrunzen. Mein neues altes Eisen funktionierte, als besäße es Zauberkräfte. Die unglücklichen, sich windenden Würmer hingegen hatten wirklich Pech: Sie flüchteten vor meiner Imitation, nur um dann doch im Magen eines Maulwurfs zu enden. ~

DER AUTOR



Kenneth Catania ist außerordentlicher Professor am Fachbereich Biologie der Vanderbilt University im US-Bundesstaat Tennessee. Er konzentriert sich bei seinen Forschungen auf Gehirne und sensorische Systeme von Säugetieren wie Stern- und Nacktmullen sowie Wasserspitzmäusen.

QUELLEN

- Catania, K. C.:** Worm Grunting, Fiddling, and Charming – Humans Unknowingly Mimic a Predator to Harvest Bait. In: *PLoS ONE* 3, S. e3472, 2008
- Darwin, C.:** The Formation of Vegetable Mould through the Action of Worms with Observations on Their Habits. D. Appleton & Company, New York 1882
- Kaufmann, J. H.:** The Wood Turtle Stomp. In: *Natural History* 98, S. 8–12, August 1989
- Mitra, O. et al.:** Grunting for Worms: Seismic Vibrations Cause *Diplocardia* Earthworms to Emerge from the Soil. In: *Biology Letters* 5, S. 16–19, 23. Februar 2009
- Tinbergen, N.:** The Herring Gull's World: A Study of the Social Behavior of Birds. Basic Books, New York 1960

WEBLINKS

- www.youtube.com/watch?v=FK-Oo7NwPiQ
Zwei-Minuten-Video von Associated Press über den Wurmgrunzer Gary Revell
- www.youtube.com/watch?v=DoYJFT8F7RU
Drei-Minuten-Video einer US-Umweltorganisation über Gary Revell und Kenneth Catania

Die vertagte Revolution

Vor zehn Jahren lieferte das Humangenomprojekt die erste Arbeitsversion der menschlichen DNA. Damals versprachen die Forscher rasche Fortschritte bei der Behandlung häufiger Krankheiten wie Diabetes oder Krebs – doch das hat sich nicht erfüllt. Jetzt streiten die Genetiker über die richtige Strategie, die überraschend komplexe Funktionsweise des Erbguts zu ergründen.

Von Stephen S. Hall

Nicht nur Biologen erhofften sich viel vom Humangenomprojekt: Das drei Milliarden Dollar teure Unterfangen, das menschliche Erbgut vollständig zu sequenzieren, versprach eine medizinische Revolution. Als im Sommer 2000 der amerikanische Präsident Bill Clinton bei einer Zeremonie im Weißen Haus eine erste Arbeitsversion des Menschengenoms vorstellte, prophezeite er: Das Genomprojekt werde »die Diagnose, Vorbeugung und Behandlung der meisten, vielleicht sogar aller menschlichen Krankheiten revolutionieren«.

Ein Jahr zuvor zeichnete Francis S. Collins die Vision einer »personalisierten Medizin«. Der damalige Leiter des amerikanischen National Human Genome Research Institute war einer der engagiertesten Fürsprecher des Riesenprojekts. Bis zum Jahr 2010, verkündete er, könnten genetische Tests Wirklichkeit werden, die jedem Einzelnen sein persönliches Risiko für Herzkrankheiten, Krebs und andere verbreitete Leiden

aufzeigen. Auch die individuell maßgeschneiderte Vorbeugung und Therapie würde dann nicht mehr lange auf sich warten lassen.

Heute ist die menschliche DNA längst entschlüsselt. Doch schon bevor die Abfolge der genetischen Buchstaben in unseren Chromosomen entziffert war, hatte sich ein Konglomerat von Genomforschungseinrichtungen an die Identifizierung der Schlüsselgene der großen Volkskrankheiten gemacht. Üppig finanziert und mit hochleistungsfähigen Sequenzierungs- und Kartierungsverfahren ausgestattet, nutzten sie die rasant wachsenden Datenbanken, um im menschlichen Genom – mit den Worten von Collins – »nach Schätzen zu graben«.

Aber mittlerweile macht sich hinsichtlich einiger der Versprechen Ernüchterung breit. Die Forscher finden sich in zwei Lager gespalten: Einige möchten weitermachen wie bisher, andere kritisieren die Vorgehensweise der letzten Jahre. Anzulegen ist allerdings nicht das Humangenomprojekt selbst: Es hat schier Unglaubliches bewirkt. So konnte die Grundlagenforschung rund um das Erbgut ihre Effektivität enorm steigern und das Feld beträchtlich ausweiten. Auch entdeckten die Forscher unvermutete Funktionen der vielen vermeintlich überflüssigen Erbgutabschnitte, die früher leichtfertig als DNA-Schrott bezeichnet wurden. Sogar Spuren von Neandertaler-Erbgut spürten Wissenschaftler in unserem Genom auf (siehe SdW 7/2010, S. 12). Insofern spricht der Krebsforscher Bert Vogelstein von der Johns Hopkins University in Baltimore (Maryland) vielen Kollegen aus der Seele, wenn er sagt: »Das Humangenomprojekt hat unsere Vorgehensweise beim Forschen radikal verändert.«

Doch haben sich die medizinischen Hoffnungen nicht so schnell wie erhofft erfüllt. Zum Beispiel kommentiert der Krebsforscher Robert A. Weinberg vom Whitehead Institute for Biomedical Research in Cambridge (Massachusetts), der Nutzen für die Krebsgenomforschung sei bisher »eher bescheiden – angesichts der aufgebrauchten Mittel sogar echt be-

AUF EINEN BLICK

DURCHBRUCH AUF RATEN

1 Bei der Veröffentlichung der ersten Grobversion der DNA-Sequenz des menschlichen Genoms im Jahr 2000 prophezeiten die Projektleiter, in den folgenden zehn Jahren würden nachfolgende Forschungen einer personalisierten Medizin den Weg ebnen. Doch diese Revolution steht noch aus.

2 Manche Forscher halten es mittlerweile für fruchtlos, Ursachen von weit verbreiteten Krankheiten wie Diabetes oder Krebs dadurch aufzuklären zu wollen, dass man häufige Genvarianten bei Betroffenen identifiziert. Sie erforschen umgekehrt gerade seltene Varianten.

3 Mit der nächsten Generation von Sequenziermethoden könnte es in einigen Jahren möglich sein, komplette Genome preiswert, rasch und in großer Zahl zu vergleichen, die komplexen genetischen Ursachen häufiger Krankheiten aufzuklären und gezielte Gegenmaßnahmen zu entwickeln.



DNA-SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / MEGANIMM / MENSCHENMASSE FOTOLIA / DMITRY NIKOLAEV

Jeder Mensch trägt eigene Krankheitsrisiken in seinem Erbgut. Diese Information soll die personalisierte Medizin für individuelle Vorbeugung sowie maßgeschneiderte Therapien fruchtbar machen.

scheiden«. Und Harold Varmus, früher Direktor der amerikanischen National Institutes of Health in Bethesda (Maryland), schrieb kürzlich im renommierten »New England Journal of Medicine«: »Nur eine Hand voll größerer Veränderungen« hätten in jüngerer Zeit »in die medizinische Alltagspraxis Eingang gefunden«; und die meisten davon durch »Entdeckungen, die der Aufklärung des menschlichen Genoms vorausgingen«. David B. Goldstein, Direktor des Center for Human Genome Variation an der Duke University in Durham (North Carolina), bekennt offen: »Zugegeben werden wir nicht gerade nächstes Jahr so weit sein, den Volkskrankheiten mit maßgeschneiderten, personalisierten Therapien zu begegnen.«

Vielleicht war es damals schlicht zu gewagt, dies innerhalb von zehn Jahren zu erwarten. Allerdings greift die Kritik noch weiter. Denn heute fragen sich manche Experten, ob die Ergebnisse zu genetischen Krankheitsursachen deswegen so bescheiden ausfallen, weil die Forschung einen falschen Ansatz verfolgt.

»Häufige« Genvarianten als Schlüssel?

Der bisherige Ansatz beruht darauf, im DNA-Text der Gene nach allerlei winzigen Abweichungen zu suchen – also nach Variationen in diversen Erbanlagen, die dann zusammengekommen das Risiko eines Menschen für eine bestimmte Krankheit erhöhen. Jahrelang gingen viele Wissenschaftler davon aus, dass Personen, die zu gewissen oft auftretenden Leiden neigen, auch charakteristische Genvarianten besitzen müssten. Sie sprechen deswegen von häufigen oder verbreiteten Genvarianten. Die Idee dahinter: Wenn sie erst jene Varianten aufspürten, könnten sie auch erkennen, wieso sich eine Veranlagung für eine biologisch vielschichtige Volkskrankheit weitervererben kann, also etwa für Altersdiabetes oder Arteriosklerose. Allerdings brachte die Suche noch nicht die erhofften Ergebnisse. Lediglich Varianten mit winzigen Auswirkungen konnten die Forscher bisher identifizieren. Ist

diese Vorgehensweise also womöglich eine Sackgasse? An ebendieser Frage spaltet sich die Forschergemeinde.

Das eine Lager führender Genomforscher ist nach wie vor davon überzeugt, dass sich die Suche nach häufigen Varianten als erfolgreich erweisen wird. Laut Eric S. Lander, Direktor des dem Whitehead Institute angegliederten Broad Institute, brachten neue genetische Anhaltspunkte für Krankheiten in den letzten drei Jahren »schier unglaubliche« Einsichten: »Dabei haben wir bei den häufigen Varianten noch nicht einmal die Oberfläche angekratzt.« Die medizinische Revolution werde im Zuge von besseren technologischen Möglichkeiten kommen – wenn nicht für uns, so doch spätestens für unsere Kinder.

Auf der Gegenseite halten immer mehr Biologen die Strategie, auf häufige Varianten zu setzen, für einen Irrweg. Im April 2010 erschien in der Zeitschrift »Cell« ein Essay von Mary-Claire King und Jon M. McClellan von der University of Washington in Seattle, der für Aufruhr sorgte. Die beiden Genetiker schrieben, die allermeisten verbreiteten Varianten hätten »für Krankheiten keinerlei nachgewiesene biologische Bedeutung und auch keinen klinischen Nutzen für Prognose oder Therapie«. Noch deutlicher drückt sich der Genetiker Walter Bodmer aus, eine graue Eminenz der britischen Forschung: Er hält die Vorgehensweise schlicht wissenschaftlich für falsch. Tatsächlich bewerten die beiden Lager sogar dieselben Daten unterschiedlich. Die einen feiern das Erreichte, die anderen sehen darin eher Fehlschläge. Letztere fragen, wie es nun wohl weitergehen soll. Nach ihrer Auffassung muss die medizinische Forschung vielleicht ganz neue Richtungen einschlagen, um die großen Zusammenhänge zu klären, die hinter bestimmten Erkrankungen stehen.

Als in den 1990er Jahren die These von den verbreiteten Varianten aufkam, erschien sie durchaus vernünftig. Damals vermuteten die Forscher, dass viele Volkskrankheiten mit einer überschaubaren Anzahl von oft vorkommenden Gen-

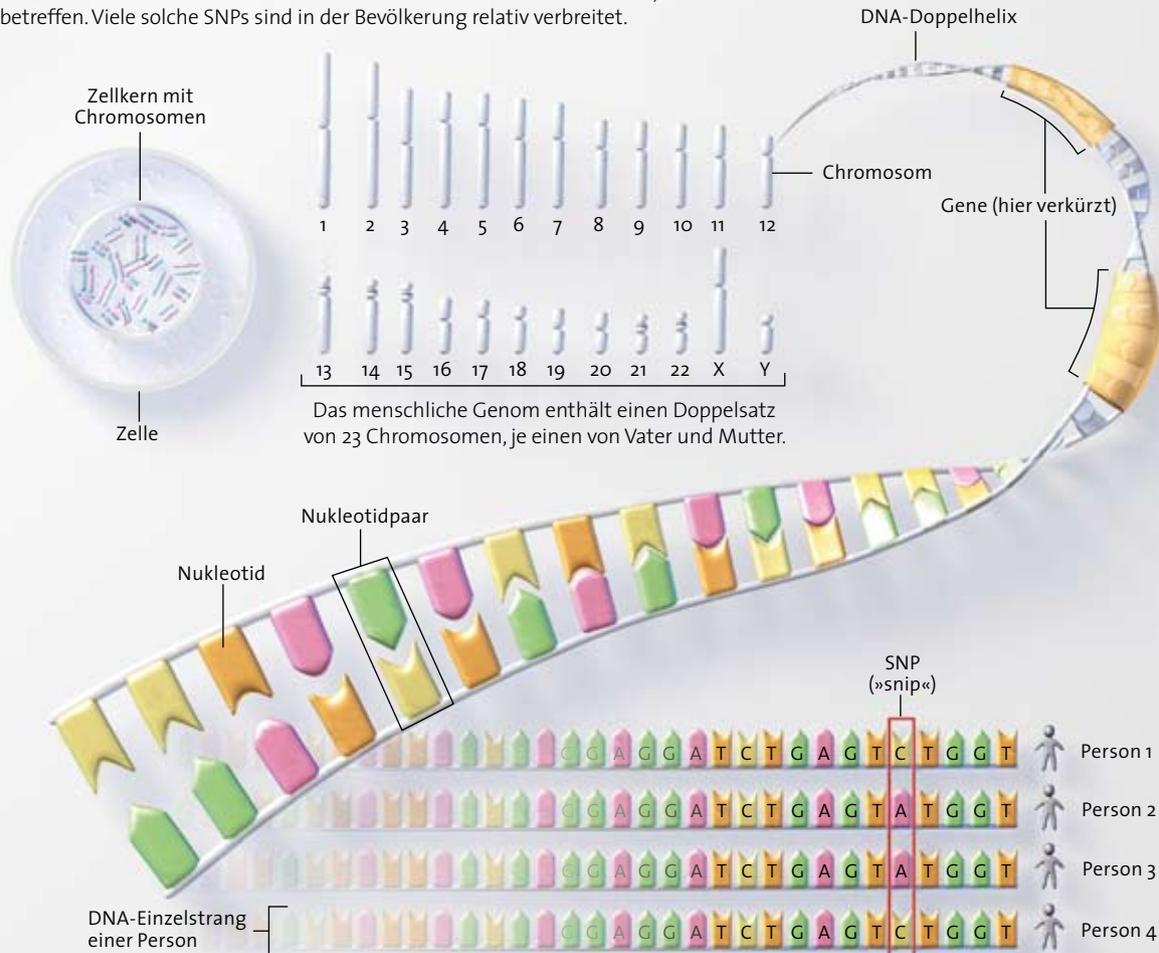
Bisherige Strategie: Suche nach häufigen Varianten

Viele Forscher glaubten bisher, hinter Veranlagungen für verbreitete Krankheiten würden Genvarianten stecken, die bei vielen Menschen vorkommen. Solche Varianten wollen sie mittels

nahe gelegener SNPs (einzelner mutierter DNA-Bausteine, sprich »snips«) einkreisen. Bisher gefundene verdächtige Bereiche erklären die Krankheiten jedoch nur zum geringen Teil.

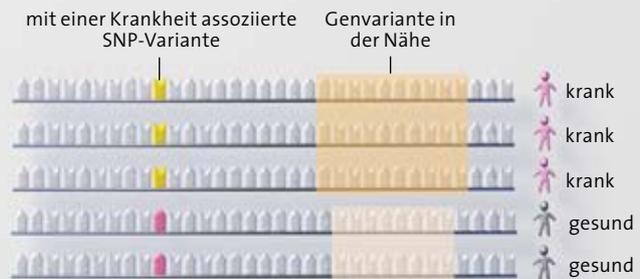
Die Ausgangslage

Das Humangenomprojekt hat die menschliche DNA sequenziert, das heißt die Abfolge der vier Bausteine (Nukleotide) und Nukleotidpaare bestimmt. In die erste allgemeine Version gingen die Genome nur einiger weniger Personen ein. Von den vier Nukleotiden paaren sich im DNA-Doppelstrang selektiv jeweils zwei – A mit T und C mit G. Vergleiche mit weiteren Genomen enthüllten bis heute viele SNPs (Einzelnukleotidpolymorphismen): Stellen, an denen sich ein Nukleotidpaar bei zwei Menschen unterscheiden kann – vor allem auch in Abschnitten, die nicht Gene betreffen. Viele solche SNPs sind in der Bevölkerung relativ verbreitet.



Suche nach krankheitsrelevanten Genen

Mit Hilfe häufiger SNPs möchten Forscher Genvarianten entdecken, die mit verbreiteten Krankheiten zusammenhängen. Weil benachbarte Erbgutabschnitte in der Regel zusammen vererbt werden, könnten manche SNP-Varianten nah bei einem verdächtigen Gen liegen – falls diese Varianten hauptsächlich Betroffene besitzen. Genomweite Assoziationsstudien erkannten zwar vielfach Beziehungen zwischen SNPs und einer Krankheit, allerdings erklären sie das Risiko zu erkranken meist nur zu einem geringen Teil.



BRANCHARSTIE DESIGN



CORBIS/REX/BRIDGMAN

Eric S. Lander, ein führender Forscher des Humangenomprojekts, ist davon überzeugt, dass die bisherige Strategie am Ende Erfolg hat: anhand häufiger kleiner Mutationen Krankheitsgene zu finden.

varianten zusammenhängen. Gene begriff man als DNA-Abschnitte, die für Proteine kodieren, wobei die Varianten in ihrem DNA-Text auf Grund von Mutationen ein wenig voneinander abweichen. Solche Mutationen können direkt in einem proteinkodierenden Abschnitt vorkommen oder in einem benachbarten DNA-Bereich, der Zeitpunkt und Rate der Genexpression und somit die Proteinsynthese reguliert. Entstehen dadurch weniger oder defekte Proteine, resultieren oft gestörte Abläufe in der Zelle – die Gesundheitsbeeinträchtigungen nach sich ziehen können.

Auch evolutionäre Gesichtspunkte sprachen für die Hypothese von den verbreiteten Varianten. Die Menschheit hat sich in den letzten Zehntausenden von Jahren so rasant vermehrt, dass viele Varianten in unserem Genpool häufig vertreten sein müssten – und entsprechend gut auffindbar. Ein kleiner Anteil davon sollte mit beeinflussen, ob jemand zu Bluthochdruck, einer Demenzkrankheit oder einem anderen häufigen Krankheitsbild neigt. Als häufig oder verbreitet betrachten Genetiker hier gewöhnlich Mutationen, die bei mindestens fünf Prozent der Bevölkerung vorkommen. Die wenigen krankheitsbezogenen Varianten und die betreffenden Proteine sowie ihre Funktionen wären dann gute Angriffsziele für etwaige neue Medikamente.

Seltene Varianten individuell kombiniert

Doch schon von Beginn an war dieses Schema nicht unumstritten. Der Evolutionsbiologe Kenneth M. Weiss von der Pennsylvania State University in University Park verdeutlichte seine Meinung bereits 1993 mit einem abgewandelten Tolstoi-Zitat aus »Anna Karenina«: »Alle gesunden Familien ähneln einander; jede ungesunde Familie ist auf ihre eigene Weise ungesund.« Weiss und der Genetik-Statistiker Joseph D. Terwilliger von der New Yorker Columbia University argumentierten immer wieder: Varianten, die oft vorkommen, haben vermutlich nur sehr geringfügige biologische Auswirkungen; denn wenn Mutationen wirklich schaden, verhindert die natürliche Auslese, dass sie sich in der Bevölkerung ausbreiten. Die beiden Forscher postulieren vielmehr, dass Anfälligkeiten für biologisch komplexe Krankheiten auf seltenen Varianten beruhen – dafür vielleicht aber auf Abweichungen in hunderten oder tausenden Genen zugleich, die bei einem bestimmten Menschen in individueller Kombination zusammentreffen. Im Sinne Tolstois wäre demnach jeder auf seine eigene Art genetisch unglücklich. Aber bislang fand Weiss' These nicht viele Anhänger.

Von Anfang an war klar: Am besten ließe sich der Streit lösen, wenn man eine große Zahl kompletter Genome von Gesunden und Kranken vergleichen könnte. Hochleistungscomputer würden dann nach Varianten suchen, die bei den jeweiligen Patienten vorkommen, nicht aber bei Gesunden. Eine solche unvoreingenommene Gesamtschau des Genoms würde alle möglicherweise mitschuldigen Mutationen aufdecken, bis hin zu unvermuteten Mitspielern. Vor zehn Jahren waren solche Studien allerdings noch nicht durchführbar. Die Suche nach verbreiteten Varianten erschien deshalb als praktikable Alternative – als vertretbare Abkürzung, um krank machende Gene aufzuspüren.

Vor diesem Hintergrund nahmen die Genomforscher damals die »genomweiten Assoziationsstudien« (abgekürzt GWAS) in Angriff: umfangreiche Untersuchungen, bei denen sie die Genome möglichst vieler Individuen einbeziehen. Zur Orientierung auf den Chromosomen nutzen sie Stellen, wo ein »Buchstabe« – Nukleotid – der DNA bei zwei Menschen abweichen kann. Diese so genannten Einzelnukleotidpolymorphismen (englisch *single nucleotide polymorphisms*, kurz SNPs; gesprochen »snips«) finden sich praktisch überall auf den Chromosomen, also keineswegs nur in Genen. Das Ziel: eine Riesenzahl SNPs zu erfassen, die zwischen Menschen oft variieren, und dann zu schauen, welche Versionen bei bestimmten Krankheiten gehäuft vorkommen. Damit wollen die Forscher auf Gene stoßen, die nahe verdächtiger Orientierungsmarken liegen und somit für die Krankheit wichtig sein könnten (siehe Kasten links).

Voraussetzung hierfür war zunächst einmal ein Atlas für häufige SNPs im menschlichen Genom. Tatsächlich haben Forscher seit mehr als zehn Jahren Unmengen dieser Polymorphismen gesammelt. Den Anfang machte 1998 das SNP Consortium; es trug für alle Chromosomen solche Landkarten zusammen. Das später gegründete internationale HapMap-Projekt (siehe SdW 1/2006, S. 30) hat zum Ziel, sämtliche so genannten Haplotypen des menschlichen Genoms zu kartieren. Dabei handelt es sich um die Varianten auf jeweils einem der doppelten Chromosomen. Auf Grundlage von Genomdaten zehntausender Menschen – Kranken wie Gesunden – haben Forscher in den letzten Jahren Hunderttausende häufiger SNPs und ihre Krankheitsrelevanz untersucht.

Doch die Forscher sind uneins, was von den bisherigen Ergebnissen zu halten ist. Einige von ihnen, darunter Eric Lander, preisen die neueren Entdeckungen von krankheitsassoziierten SNPs als Tor zu medizinisch wichtigen molekularen Reaktionswegen. Tatsächlich zeigt inzwischen eine Flut von Veröffentlichungen Verbindungen von Hunderten häufiger SNPs mit Krankheiten wie Schizophrenie, Altersdiabetes, Alzheimer oder Bluthochdruck auf. Francis Collins behauptete 2010 in einer Fernsehshow, Forscher hätten von fast 1000 häufigen Genvarianten herausgefunden, inwiefern diese bei einem Krankheitsrisiko eine Rolle spielen. Unsere Sichtweise, wie neue Therapien für Diabetes, Krebs oder Herzkrankheiten entwickelt werden sollten, hätte dies bereits komplett verändert.

Nach Ansicht der Gegenseite nutzen all jene Daten bisher nicht viel zur Vorhersage von Erkrankungsrisiken. Beispielsweise nahmen an Assoziationsstudien zum Altersdiabetes mehr als 10 000 Menschen teil; 2,2 Millionen SNPs wurden untersucht und dabei 18 identifiziert, die mit dieser Form von Zuckerkrankheit assoziiert sind. Nur – diese Stellen im Genom erklären zusammen lediglich sechs Prozent der Erblichkeit. Über die biologischen Ursachen des Leidens besagen sie laut David Goldstein fast gar nichts.

Im letzten Sommer bezeichnete der Forscher die These von den häufigen Varianten und verbreiteten Krankheiten als überholt: »Wir haben ein Forschungsgebiet betreten und wieder aufgegeben, weil es weniger Erklärungen brachte, als viele sich davon versprochen.« Letztlich stuft David Botstein von der Princeton University (New Jersey) die Haplotyp-Strategie ähnlich ein, wenn er sagt: »Man musste das machen. Hätte man es nicht versucht, wüsste niemand, dass die Sache nicht funktioniert.« Er erklärt das 138 Millionen Dollar teure HapMap-Projekt zu einem »großartigen Fehlschlag«.

Das Problem der »fehlenden Erblichkeit«

Sogar Walter Bodmer hält die Suche nach häufigen Varianten inzwischen für eine Sackgasse. Dabei war er unter den Ersten, die sich in den 1980er Jahren für das Humangenomprojekt starkmachten, und er gehörte auch zu den Pionieren der Assoziationsstudien. »Es ist fast unmöglich, die biologischen Wirkungen dieser Genvarianten aufzuklären, aber genau darauf käme es an. Die allermeisten solchen Varianten erhellen die Biologie der Krankheiten nicht«, meint er.

Der Streit hat allerdings auch sein Gutes. Er könnte neue Wege eröffnen, dem Problem der »fehlenden Erblichkeit«, wie manche es nennen, zu begegnen. Mindestens eine alternative Vorgehensweise ist in der Diskussion, wenn auch vielleicht nur für so lange, bis effektivere Ansätze verfügbar werden. Bodmer zum Beispiel drängt die Wissenschaftler, sich jetzt verstärkt um seltene genetische Varianten zu kümmern. Darunter versteht er Mutationen, die bei 0,1 bis höchstens ein oder zwei Prozent der Bevölkerung vorkommen. Das wäre deutlich unter der Häufigkeitsgrenze, an der sich Assoziationsstudien derzeit orientieren. Hinter Bodmers Aufruf steckt wieder der Gedanke, dass Genvarianten mit großer Krankheitswirkung in der Regel selten vorkommen, während

häufige Varianten fast nur geringfügige bis gar keine derartigen Auswirkungen haben sollten.

In derselben Überlegung gipfelt der erwähnte umstrittene Essay von Mary-Claire King und Jon McClellan. Auf ihrem Gebiet sind beide ausgewiesene Experten. King fand Hunderte von seltenen Varianten in den Genen *BRCA1* und *BRCA2*, von denen manche Mutanten in Zusammenhang mit einem erblichen Brustkrebsrisiko stehen dürften. McClellan spürte bei anderen Genen viele Varianten auf, die zu einer Veranlagung für Schizophrenie beitragen. Darum vermuten die beiden Genetiker, dass die meisten solcher Leiden einen »heterogenen« Hintergrund haben: nämlich dass sie, auch wenn es sich äußerlich um die gleiche Krankheit handeln mag, auf ganz verschiedene Mutationen in diversen Genen zurückgehen können. Demnach wären schlagkräftige krankheitsverursachende Mutationen selten. Auch sollten viele davon erst vor relativ kurzer Zeit aufgetreten sein. Ebendeswegen könnten gerade seltene Varianten die Forscher zu spezifischen molekularen Reaktionswegen führen, die bei der Krankheit gestört sind. Wenn man diese Vorgänge verstünde, ließen sich gezielte Therapien entwickeln.

Bodmer, King und McClellan, aber auch andere Forscher verweisen in dem Zusammenhang gern auf die Arbeiten von Helen H. Hobbs und Jonathan C. Cohen (Bild rechts, unten) von der University of Texas in Dallas über Ursachen von Koronarleiden. Sie halten diese Studien über stoffwechselbedingte Herzerkrankungen für ein Musterbeispiel dafür, wie man wichtige medizinische Zusammenhänge erkennt, indem man sich entlang bekannter physiologischer Prozesse vortastet. Hobbs und Cohen konzentrieren sich auf schwere Krankheitsfälle. Sie postulieren, dass diese Fälle deswegen so schwer sind, weil irgendwelche seltenen Genvarianten das normale biologische Zusammenspiel des Stoffwechsels beeinträchtigen. Solche Varianten müssten ihres Erachtens in statistischen Vergleichen auffallen. Welche Gene sie jeweils genauer untersuchen, entscheiden die Forscher nach dem vorhandenen biologischen Wissen. Verdächtige Erbanlagen sequenzieren sie und achten besonders auf kleine Abweichungen, die sich dramatisch auf die Funktion der Genprodukte auswirken. Darin unterscheidet sich dieses Vorgehen gegenüber Assoziationsstudien anhand von SNPs, bei denen man zwar das Umfeld von krankheitsrelevanten Genen definiert, aber nicht unbedingt das betreffende Gen selbst ausmachen kann.

Während im Jahr 2000 das Wettrennen um den ersten Rohentwurf der menschlichen DNA-Sequenz Schlagzeilen machte, nahmen Hobbs und Cohen in aller Stille ein Projekt in Angriff, das später als Dallas-Herzstudie bekannt wurde. Der Physiologe Cohen stammt aus Südafrika und hatte schon seit Jahren über den Stoffwechsel von Cholesterin geforscht, genauer über dessen Herstellung und Abbau. Die Medizinerin Hobbs hatte zuvor mit Michael S. Brown und Joseph L. Goldstein gearbeitet, die für ihre Forschungen über den Cholesterinstoffwechsel 1985 den Medizin-Nobelpreis erhielten (siehe SdW 1/1985, S. 96). Deren Studien waren grundlegend



OH
WIR HABEN IHR GENOM NICHT NUR ENTSCHLÜSSELT, HERR DR. PÜNTIG, SONDERN GLEICH AUCH PATENTIEREN LASSEN. SIE SIND ALSO JETZT EIGENTUM DER MARLYPHARM A.S.!

für die Entwicklung der so genannten Statine: wichtige Cholesterin senkende Medikamente.

Als Hobbs und Cohen ihre ungewöhnlichen Studien konzipierten, vertrauten sie auf ihre wissenschaftliche Intuition. Sie gingen ganz anders vor als sonst in der Genomik üblich. Als Teilnehmer wählten sie rund 3500 Personen aus der Gegend von Dallas, zur Hälfte Afroamerikaner, und unterzogen sie zunächst gründlichen medizinischen Untersuchungen. Sie gewannen zwar von allen Probanden DNA, jedoch stand nicht allein das Genom im Mittelpunkt. Zusätzlich erhoben die Forscher so genau wie möglich auch Daten für weitere Faktoren, die zur koronaren Herzkrankheit beitragen können: Sie bestimmten die chemische Zusammensetzung des Bluts einschließlich des Cholesterinspiegels, verschiedene Stoffwechselwerte, den Körperfettgehalt, die Herzfunktion, Verdickungen der Arterienwände und erfassten außerdem diverse Umwelteinflüsse. So erstellten sie im Lauf von zwei Jahren eine umfangreiche, detailgenaue Datenbank mit individuellen Merkmalen aller Teilnehmer. Genetisch betrachtet bestimmten sie jeden einzelnen Phänotyp – sozusagen das Ergebnis aus Anlage und Umwelt.

Anschließend wendeten sich Hobbs und Cohen den Erbanlagen zu. Ihr besonderes Interesse galt auffallenden Phänotypen, sowohl sehr günstigen als auch sehr ungünstigen. Speziell griffen sie Konstellationen heraus, bei denen die Konzentrationen von »gutem« beziehungsweise »schlechtem« Cholesterin extrem hoch oder niedrig ausfielen – oder umgekehrt. (Lipoproteine hoher Dichte, abgekürzt HDL, gelten als nützlich, solche niedriger Dichte, LDL, in zu hoher Menge als bedenklich.) Nun suchten sie gezielt nach den hierfür mitverantwortlichen genetischen Faktoren.

Risikopatienten mit seltenen Genvarianten

Wie die Forscher 2004 im Fachblatt »Science« berichteten, studierten sie als Erstes Patienten mit extrem niedrigem HDL-Spiegel – und darum einem erhöhten Risiko für koronare Herzkrankheit. Hobbs und Cohen wussten von drei Genen, die bei seltenen Cholesterinstoffwechselstörungen mitwirken. Sie verglichen nun die DNA-Sequenzen dieser Gene von den betreffenden Patienten und von Teilnehmern mit hohem HDL-Spiegel. Tatsächlich fanden sie bei den Risikopatienten mehrere seltene Varianten. Die beiden Forscher konnten damals ebenfalls zeigen, dass Mutationen in diesen Genen allgemein signifikant zu niedrigen HDL-Werten beitragen.

Im Jahr darauf forsteten sie nach besonderen Erbanlagen bei Teilnehmern mit ungewöhnlich niedrigem LDL-Spiegel, also sehr günstigen Cholesterinwerten. Als sie das Gen *PSCK9* näher untersuchten, von dem sie wussten, dass es für den Cholesterinstoffwechsel wichtig ist, trafen sie ins Schwarze. Sie fanden zwei Mutationen, die mit einem niedrigen LDL-Spiegel korrelierten: Diese schalten das Gen aus.

In einer Folgestudie analysierten Hobbs und Cohen Daten aus einem Zeitraum von 15 Jahren von Bevölkerungsgruppen aus den US-Bundesstaaten Mississippi, North Carolina, Minnesota und Maryland. Ergebnis: Afroamerikaner, bei denen

Gesichter eines Streits



GETTY IMAGES / JAMES D. WILSON



MIT FRIEDL. GEN. VON MARY-CLAIRE KING



UNIVERSITY OF TEXAS SOUTHWESTERN MEDICAL CENTER AT DALLAS

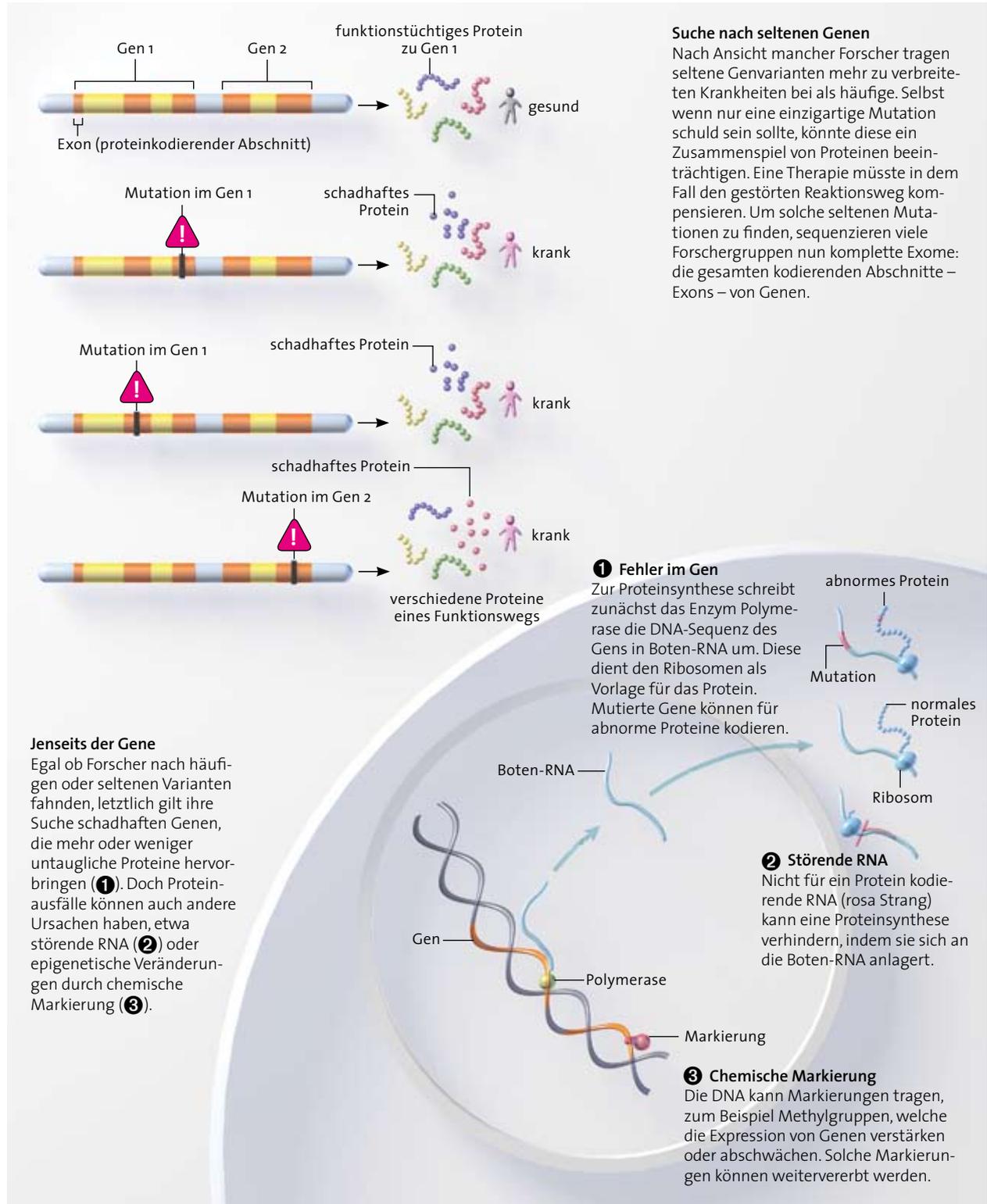
Die Forscher bilden zwei Lager: Francis S. Collins (oben links), Direktor der amerikanischen National Institutes of Health, ist der Ansicht, dass genetische Hintergründe von Volkskrankheiten am besten über häufige genetische Varianten aufzuklären sind. Mary-Claire King (oben rechts) setzt dagegen auf seltene Varianten. Mit solch einem Ansatz konzipierten Helen H. Hobbs und Jonathan C. Cohen (unten) die Dallas-Herzstudie. Sie suchen mit komplexen Analysen nach Veranlagungen, die Herz-Kreislauf-Erkrankungen begünstigen oder das Risiko dafür verringern.

das Gen *PSCK9* eine der beiden Mutationen aufwies, hatten einen um 28 Prozent niedrigeren LDL-Spiegel – und ihr Koronarkrankheitsrisiko sank sogar um 88 Prozent! Der Nutzen bei Weißen ist etwas geringer: Ihr LDL-Spiegel fiel 15 Prozent niedriger aus, das Herzrisiko immerhin um 47 Prozent. Dermaßen hohe Effekte einzelner Gene zeigten sich kaum jemals in den genomweiten Assoziationsstudien. Pharmaunternehmen prüfen bereits Wirkstoffe, die das Gen *PSCK9* ausschalten oder den betreffenden molekularen Reaktionsweg stören. Vielleicht ließe sich damit generell die Häufigkeit von koronaren Herzkrankheiten senken. Laut Hobbs gehört dieses Gen derzeit zu den ersten zehn Angriffszielen praktisch aller großen Pharmaunternehmen.

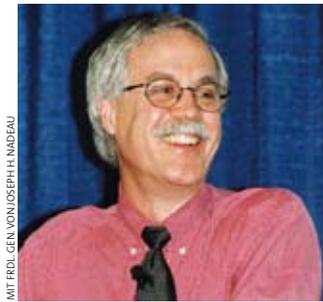
Inzwischen machen sich David Goldstein und Elizabeth T. Cirulli, die wie Goldstein ebenfalls an der Duke University arbeitet, sogar dafür stark, die Suche nach medizinisch bedeutenden seltenen Varianten auszuweiten. Beispielsweise ließen sich die so genannten Exome ausgewählter Personen

Neue Strategie: Fahndung nach seltenen Varianten

Manche Wissenschaftler, die nach erblichen Einflüssen für Volkskrankheiten suchen, setzen statt wie bisher auf häufig vorhandene lieber auf seltene SNPs. Solche ausgefallenen genetischen Unterschiede erfassen die üblichen statistischen Verfahren von Assoziationsstudien nicht. Deshalb erproben einige Forscher neue Ansätze.



BRUNN CHRISTIEDESIGN



MIT FRED. GENOM/JOSEPH H. NADEAU

Joseph H. Nadeau geht andere Wege. Bei der Suche nach der Ursache für individuelle Merkmale erforscht er die Vererbung epigenetischer Veränderungen.

sequenzieren und vergleichen. Darunter verstehen Forscher die Gesamtheit der kodierenden Abschnitte von Genen mit samt den zugehörigen Steuerelementen der Genaktivität – lediglich ein kleiner Bruchteil des Genoms. Der Name Exom leitet sich von dem Wort Exon ab: So heißen die Abschnitte der Gene, die tatsächlich die Informationen etwa für Proteine enthalten.

Lückenbüsser für komplette Genome

Um krankheitsrelevante seltene Varianten zu finden, sollte man laut Cirulli und Goldstein zum einen bei Familien danach forschen, in denen eine häufige Krankheit vorkommt. Zum anderen gilt es aber auch gezielt Menschen zu untersuchen, die ein bestimmtes extremes Gesundheitsmerkmal teilen, denn DNA-Unterschiede sind in diesem Fall leichter erkennbar. Solche Forschungen sind bereits vielerorts in Gang. Die Exome dienen dabei so lange als Lückenbüsser, bis sich ganze Genome zuverlässig und kostengünstig sequenzieren lassen. In drei bis fünf Jahren könnte es so weit sein.

Besonders mutige Forscher wagen sogar die These, dass es nicht genügt, sich auf DNA-Sequenzen und Proteine zu konzentrieren. Die herkömmliche Genetik würde der molekularen Komplexität von Genen und deren Bedeutung für Krankheiten möglicherweise gar nicht gerecht. Jene umfangreichen DNA-Bereiche außerhalb der Gene, die man früher als »Schrott« abtat, enthalten nach neueren Erkenntnissen wichtige Regulationsregionen. An manchen solchen DNA-Abschnitten entstehen kleine RNA-Moleküle, die beispielsweise die Umsetzung bestimmter Gene in RNA beziehungsweise Proteine – die Genexpression – beeinträchtigen können. Zudem sitzen auf der DNA »epigenetische« chemische Markierungen. Sie verändern die genetischen Sequenzen selbst nicht, wirken sich aber wiederum auf die Genexpression aus. Umweltfaktoren können diese Markierungen im Lauf des Lebens verändern, und das kann sich sogar auf die Nachkommen übertragen (Kasten links, unten). Wegen all dieser Faktoren fällt es heute zunehmend schwer, genau zu definieren, was ein Gen überhaupt ist – von medizinisch bedeutsamen Anlagen ganz zu schweigen. Glaubte man früher, dass Gene direkt und detailliert Merkmale festlegen, sehen sich die Forscher heute mit dem »Genotyp-Phänotyp-Problem« konfrontiert: Die proteinkodierende DNA-Sequenz verrät nur teilweise, wie ein Merkmal letztlich zu Stande kommt.

Der Populationsgenetiker Joseph H. Nadeau leitet seit Kurzem am Institute of Systems Biology in Seattle (US-Bundes-

staat Washington) die Abteilung für Wissenschaftsentwicklung. An Tieren verfolgte er über mehrere Generationen das Schicksal von mehr als 100 biochemischen, physiologischen und Verhaltensmerkmalen, die epigenetisch beeinflussbar sind. Manche solche Veränderungen hielten sich über vier Generationen.

Als wäre das nicht komplex genug, legt Nadeau auch noch experimentelle Daten vor, nach denen die Funktion eines Gens manchmal von der Konstellation genetischer Varianten in seiner Umgebung abhängt. Laut dem Forscher dürften manche häufigen Krankheiten letztlich mit sehr vielen Genen zusammenhängen, die im Verbund für verschiedene Reaktionswege oder Netzwerke wichtig sind. Vielleicht verstärkt eine bestimmte Genvariante die Krankheitswirkung eines anderen Gens; genauso mag es Varianten geben, die sich als schützende Gegenspieler erweisen. Nadeau vermutet, »dass diese unkonventionelle Art von Vererbung öfter vorkommt, als wir bisher dachten«.

Noch ist offen, welchen Stellenwert solche Aspekte für Krankheiten besitzen. Bis wir Genaueres wissen, dürfte zumindest der gegenwärtige Streit um häufige und seltene Genvarianten Geschichte sein – weil bald schnelle, preisgünstige Sequenzierungsverfahren erlauben werden, viele komplette Genome zu vergleichen. Den nächsten Jahren sieht auch Mary-Claire King freudig-gespannt entgegen. »Jetzt, mit dem passenden Werkzeug, können wir all die Fragen auf die richtige Weise angehen.« Und die Genetikerin fügt hinzu: »Man stelle sich vor, was Darwin und Mendel damit angefangen hätten. Für Genomforschung ist diese Zeit großartig.«

DER AUTOR



Stephen S. Hall ist Wissenschaftsjournalist. Er lebt in New York und befasst sich mit den Schnittpunkten zwischen Wissenschaft und Gesellschaft. Seit mehr als 20 Jahren verfolgt er die Entwicklung des Humangenomprojekts.

QUELLEN

- Cirulli, E.T., Goldstein, D.B.:** Uncovering the Roles of Rare Variants in Common Disease through Whole-Genome Sequencing. In: *Nature Reviews Genetics* 11, S. 415–425, Juni 2010
- Feero, W.G. et al.:** Genomic Medicine – An Updated Primer. In: *New England Journal of Medicine* 362, S. 2001–2011, 27. Mai 2010
- McClellan, J., King, M.-C.:** Genetic Heterogeneity in Human Disease. In: *Cell* 141, S. 210–217, 16. April 2010

Weitere Quellen im Internet: www.spektrum.de/artikel/1057477

WEBLINK

www.spektrum.de/streitgesprach
»Der modellierte Patient«
45-Minuten-Mitschnitt eines Streitgesprächs zwischen dem Genetiker Hans Lehrach und dem Philosophen Urban Wiesing; siehe auch *Spektrum der Wissenschaft* 1/2011, S. 60–65

Die Geburt der Sterne

Wenn interstellare Wolken kollabieren, erhitzen sie sich und lassen Sterne entstehen. Doch woher kommen die kosmischen Gasmassen überhaupt – und was löst ihren Kollaps aus?

Von Erick T. Young

Wie Sterne entstehen, kann jeder Physikstudent seit vielen Jahrzehnten in diversen Lehrbüchern nachlesen. Alles eine klare Sache also? – Doch weit gefehlt! Die Geburt einer Sonne ist noch immer eines der umstrittensten Themen der Astrophysik.

Was wissen wir heute? Auf den ersten Blick geht es um den Sieg von Schwerkraft über Druck. Das Drama beginnt mit einer riesigen Wolke aus Gas und Staub, die im interstellaren Raum treibt. Ist sie – oder zumindest ein kompakter Teil von ihr, der so genannte Kern – genügend kalt und dicht, dann überwindet die Gravitation den Widerstand des Gasdrucks, und die Wolke beginnt unter ihrem eigenen Gewicht zu kollabieren. Sie wird dadurch schließlich so dicht und heiß, dass Atomkerne verschmelzen und gewaltige Mengen nuklearer Fusionsenergie freisetzen. Die so erzeugte Wärme erhöht den inneren Druck und bringt den Kollaps zum Stillstand. Der neue Stern erreicht ein dynamisches Gleichgewicht, das Millionen oder gar Milliarden Jahre andauern kann.

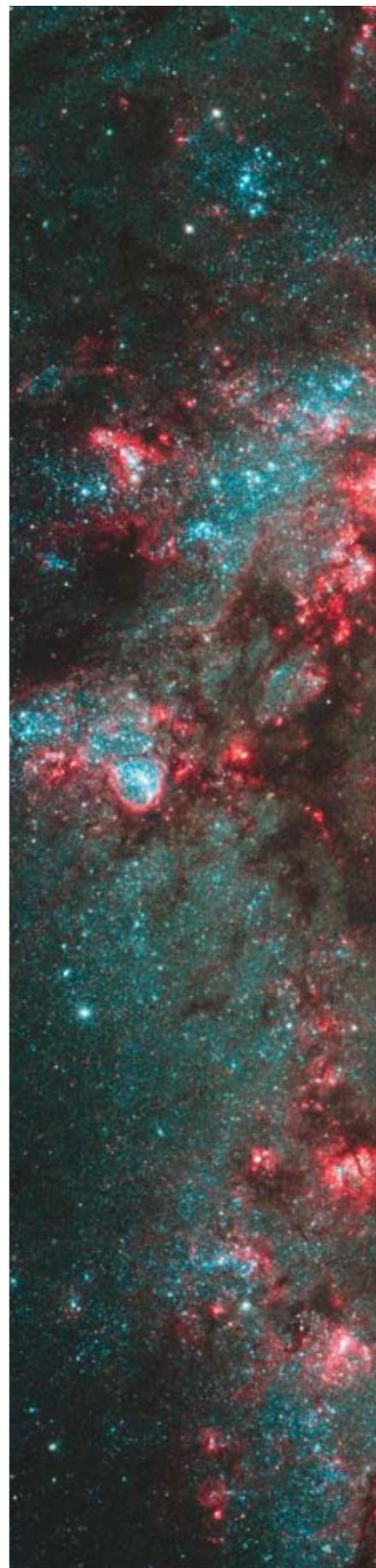
Diese Standardtheorie der Sternentstehung ist widerspruchsfrei und stimmt mit den Beobachtungen überein – doch vollständig ist sie keineswegs. Jeder Satz des vorigen Abschnitts schreit geradezu nach einer ausführlichen Erklärung. Insbesondere vier Fragen bleiben offen:

Wenn die dichten Kerne der Wolken gleichsam die Eier sind, aus denen später Sterne schlüpfen, wo sind dann die kosmischen Hühner? Schließlich müssen die Wolken selbst von irgendwoher kommen. Aber ihre Herkunft ist unklar.

Wodurch genau beginnt der Kern zu kollabieren? Diese Frage ist wichtig, entscheidet der Auslösemechanismus doch über die Geburtenrate und die endgültige Masse der entstehenden Sterne.

Wie beeinflussen Sternkeime einander? Die Standardtheorie beschreibt einzelne, isolierte Entstehungsprozesse; doch die meisten Sterne bilden sich in enger Nachbarschaft. Seit Kurzem vermuten Forscher, dass auch unsere eigene Sonne aus einem Sternhaufen hervorging, der sich seither zerstreut hat (siehe Spektrum der Wissenschaft 3/2010, S. 26).

Diese Region heftiger Sternbildung nahe dem Kern der Galaxie M 83 wurde von der neuen Wide Field Camera 3 des Hubble-Weltraumteleskops im Jahr 2009 aufgenommen. Die Standardtheorie vermag weder die Entstehung der massereichen bläulichen Sterne zu erklären noch ihre Rückwirkung auf die rötlich leuchtenden Gaswolken, aus denen sie sich bilden.





NASA/ESA UND DAS HUBBLE HERITAGE TEAM (STSCI/AURA)

Die vier größten Probleme der Sternentstehung

Die **Standardtheorie** erklärt zwar recht gut, wie isolierte Sterne mit niedriger und mittlerer Masse entstehen, lässt aber noch viele Fragen offen.

Die Sternbildung beginnt mit einer riesigen Molekülwolke – einer kalten, nebligen Masse aus Gas und Staub.

In der Wolke kollabiert ein besonders dichter Teil – der so genannte Kern – unter seinem eigenen Gewicht.

Der Kern zerfällt in viele Sternkeime. In jedem bildet sich ein Protostern, der Gas und Staub anzieht.



Erstes Problem: Woher stammt die Wolke?

Ein Materiegemisch, das beim Urknall entstand oder von Sternen ausgeworfen wurde, musste sich irgendwie zusammenballen.

Zweites Problem: Warum kollabiert der Kern?

Das Modell erklärt nicht, wodurch das Kräftegleichgewicht, das die Wolke stabilisiert, gestört wird.

Drittes Problem: Wie beeinflussen die Sternkeime einander?

Die Standardtheorie behandelt nur isolierte Sterne.

Wie entstehen extrem massereiche Sterne? Die Standardtheorie funktioniert zwar ganz gut für Objekte bis zum 20-Fachen der Sonnenmasse, sie versagt aber bei größeren Gebilden. Und bekannt sind inzwischen Sterne von bis zu 200 Sonnenmassen.

Solche Mängel in ihrer Theorie lassen Astronomen keine Ruhe. Denn die Sternentstehung liegt fast allem zu Grunde, was sie interessiert – von der Bildung der Galaxien bis zur Entstehung der Planeten. Immerhin zeichnet sich eines ab: Die Theorie muss die Umwelt des Sternkeims einbeziehen. Der Endzustand des neuen Sterns hängt nicht nur von den Anfangsbedingungen im Kern ab, sondern auch von den Einflüssen seiner Umgebung und der benachbarten Sterne.

AUF EINEN BLICK

KOSMISCHER KREISSAAL

1 Astronomen haben die Theorie der Sternentstehung zwar in den letzten Jahren immer weiter verfeinert. Doch nach wie vor tun sich große Lücken auf.

2 So behandelt die Standardtheorie Sterne als isolierte Gebilde; neue theoretische Ansätze berücksichtigen hingegen deren Wechselwirkungen untereinander sowie mit der sie umgebenden Wolke.

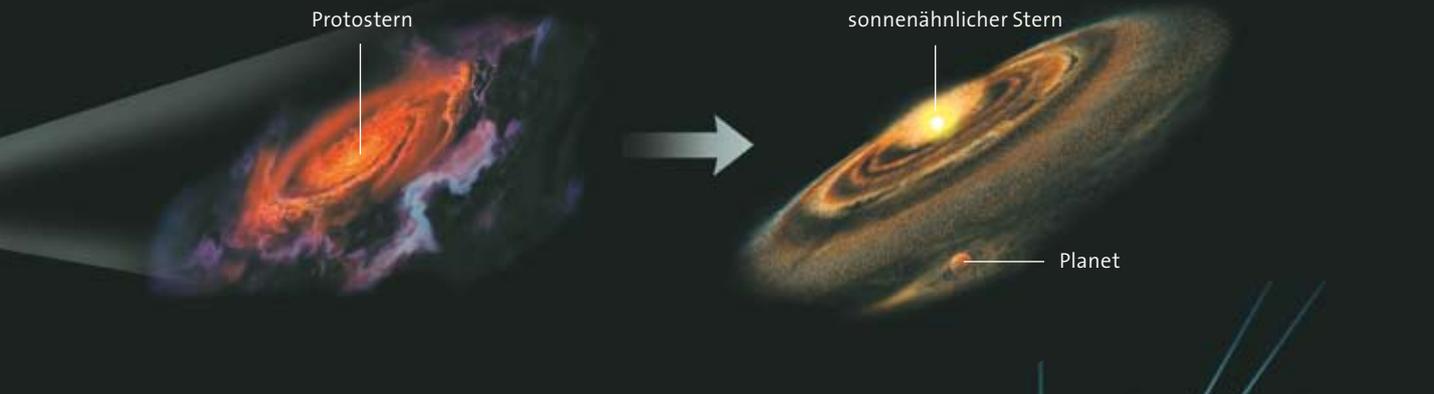
3 Mittlerweile wissen Astronomen auch, wie Sterne mit mehr als 20 Sonnenmassen entstehen können.

Ein Grundproblem bei der Neubildung von Sternen offenbart sich jedem, der nachts in gebührender Entfernung von den Lichtern einer Stadt zum Himmel aufschaut und dort die Milchstraße sieht: Ihr diffuser Lichtbogen ist unterbrochen von dunklen Flecken; dort blockieren die Staubpartikel interstellarer Wolken das Sternenlicht. Auf dasselbe Hindernis stößt jeder, der die Sternentstehung beobachten möchte. Anders ausgedrückt: Alle Sterne verhüllen ihre eigene Geburt! Das Rohmaterial ist dicht und dunkel; damit Kernfusion einsetzt, muss es sich erst noch weiter verdichten. Die Astronomen können zwar verfolgen, wie dieser Vorgang beginnt und wie er endet, aber die Zwischenphasen lassen sich schwer beobachten. Denn ein Großteil der entsprechenden Strahlung liegt im fernen Infrarot- und Submillimeterbereich – und dafür besitzen die Forscher nur relativ primitive Werkzeuge.

Vermutlich entstehen die sternträchtigen Wolken mit dem Kreislauf der interstellaren Materie, bei dem Gas und Staub sich in Sterne und wieder zurück verwandeln. Dieses »Medium« besteht vorwiegend aus Wasserstoff; Helium macht rund ein Viertel der Masse aus und alle anderen Elemente nur ein paar Prozent. Ein Teil davon hat sich seit den ersten drei Minuten nach dem Urknall kaum verändert; anderes wurde von Sternen im Lauf ihrer Existenz ausgestoßen oder besteht aus den Trümmern explodierter Sterne.

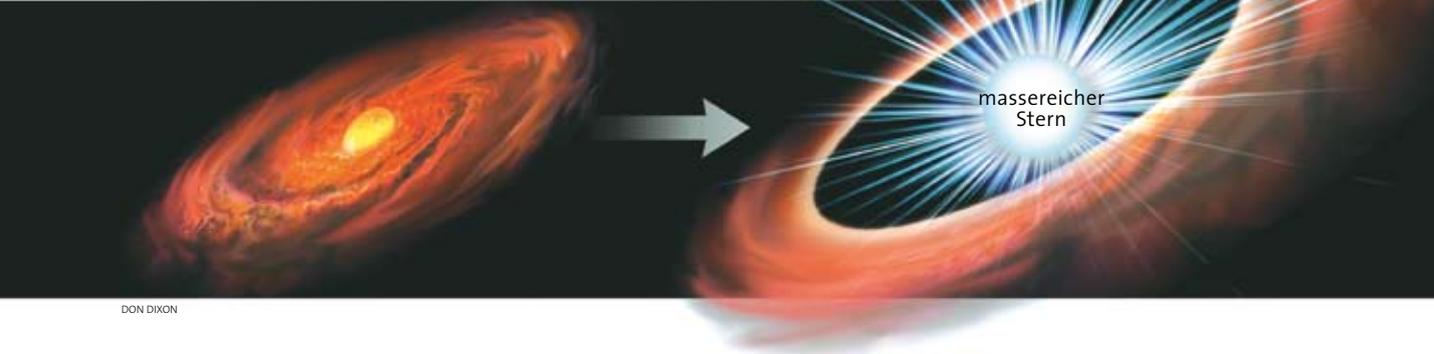
Die stellare Strahlung bricht alle Wasserstoffmoleküle in ihre atomaren Bestandteile auf (siehe Spektrum der Wissenschaft 3/2002, S. 30). Anfangs ist das Gas dünn, mit rund

Der Protostern schrumpft, verdichtet sich und wird zum Stern, sobald Kernfusion einsetzt.



Viertes Problem: Wie entstehen massereiche Sterne?

Oberhalb von 20 Sonnenmassen wird die Leuchtkraft eines neuen Sterns so groß, dass sie eigentlich jede weitere Massenzunahme verhindern müsste.



einem Wasserstoffatom pro Kubikzentimeter. Mit der Zeit kühlt es ab und formt Wolken, ganz ähnlich wie Wasserdampf in der Erdatmosphäre. Der Abkühlungsvorgang ist nicht unkompliziert, denn die Wärme kann nur auf wenige Arten entweichen. Am effizientesten ist die Strahlung, die bestimmte chemische Elemente im fernen Infrarotbereich aussenden, zum Beispiel ionisierter Kohlenstoff bei 158 Mikrometer (tausendstel Millimeter) Wellenlänge. Da die untere Erdatmosphäre diese Wellen nicht passieren lässt, müssen weltraumgestützte Teleskope eingesetzt werden, etwa das 2009 von der Europäischen Weltraumbehörde ESA gestartete Herschel Space Observatory, oder Teleskope in Flugzeugen wie das Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy (SOFIA).

Mit der Abkühlung steigt die Dichte; bei rund 1000 Atomen pro Kubikzentimeter werden die Wolken so kompakt, dass sie die Ultraviolettstrahlung der umgebenden Galaxie blockieren. Nun können Wasserstoffatome durch chemische

Reaktionen mit Hilfe von Staubteilchen Moleküle bilden. Wie Beobachtungen im Radiowellenbereich zeigen, enthalten die Molekülwolken zahlreiche chemische Verbindungen: von Wasserstoff (H_2) bis hin zu komplexen organischen Molekülen, die vielleicht als Grundbausteine irdischen Lebens gedient haben (siehe Spektrum der Wissenschaft 10/1999, S. 26). Danach verliert sich die Spur: Die nächsten Schritte bei der Sternentstehung sind kaum erforscht. Infrarotbeobachtungen haben zwar tief in Staub verborgene Sternkeime enthüllt, doch wie sie sich aus der Molekülwolke bildeten, lässt sich nur schwer ausmachen.

Das Dunkellichtete sich Mitte der 1990er Jahre, als das Midcourse Space Experiment und das Infrared Space Observatory Wolken entdeckten, die mit mehr als 10 000 Atomen pro Kubikzentimeter so dicht sind, dass sie sogar die thermische Infrarotstrahlung verschlucken, die normalerweise die staubigen Regionen durchdringt. Diese so genannten Infra-

Erstes Problem: Der dunkle Ursprung interstellarer Wolken

Allmählich können die Astronomen nachvollziehen, wie aus diffusem interstellarem Gas immer dichtere Wolken entstehen: Im Stadium, das der Bildung von Protosternen unmittelbar vorangeht, formieren sich Wolken, die sogar für Infrarot undurchdringlich sind; sie erscheinen auf dieser Aufnahme des Spitzer-Weltraumteleskops als dunkle Streifen. Die Größe und Masse dieser Infrarot-Dunkelwolken macht sie zu idealen Kandidaten für die Sternentstehung.



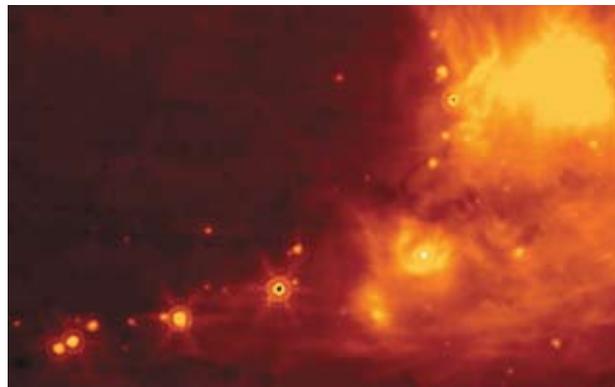
Zweites Problem: Wie der Kollaps beginnt

Die Lehrbücher geben kaum Auskunft darüber, wodurch Wolken instabil werden und kollabieren. Neue Infrarotbilder des Spitzer-Teleskops enthüllen, dass in vielen Fällen benachbarte massereiche Sterne verantwortlich sind.

In der W5-Region der Galaxis hat die Bildung massereicher Sterne (bläulich) in einer Molekülwolke einen Hohlraum entstehen lassen. An seinem Rand liegen Protosterne (unsichtbar eingebettet in weißliches und rosa Gas), die alle ungefähr gleich alt sind. Offenbar wurde ihre Bildung durch die massereichen Sterne ausgelöst, denn andere Ursachen würden nicht so synchron wirken.



Im Sternhaufen NGC 2068 haben sich Protosterne wie Perlen auf einer Schnur angeordnet. Obwohl sie weit verstreut liegen, sind sie fast gleichzeitig entstanden. Auch hier gilt eine Gruppe massereicher Sterne in der unmittelbaren kosmischen Nachbarschaft als wahrscheinlichster Auslöser.



rot-Dunkelwolken sind viel massereicher – 100 bis 100 000 Sonnenmassen – als die in sichtbarem Licht entdeckten Wolken. In den letzten Jahren haben zwei Teams mit dem Spitzer Space Telescope eine umfassende Bestandsaufnahme gemacht: der Galactic Legacy Infrared Midplane Survey Extraordinaire (GLIMPSE) unter Edward B. Churchwell von der University of Wisconsin-Madison sowie der MIPS GAL Survey unter Sean Carey vom Spitzer Science Center.

Dunkelwolken sind anscheinend das fehlende Glied zwischen Molekülwolken und Protosternen. Vielleicht entscheiden sie sogar über die Masse der Sterne. Kleine Wolken kommen häufiger vor als große. Diese Massenverteilung ähnelt derjenigen der Sterne – jedoch haben Wolken stets dreimal so viel Masse wie Sterne. Offenbar endet nur ein Drittel der Wolkenmasse im neuen Stern; der Rest geht im Raum »verloren«. Noch bleibt zu klären, ob die Übereinstimmung der Verteilungen nicht doch bloß zufällig ist.

Was auch immer die Masse eines Sterns festlegt, es bestimmt seine ganze Geschichte. Ein massereicher Stern hat ein relativ kurzes Leben, das mit einer gewaltigen Explosion, einer Supernova, endet; ein leichterer Stern lebt länger und verlischt unauffälliger.

Was löst den Kollaps der Wolke aus?

Auch bei dem zweiten ungelösten Problem – was verursacht den Kollaps? – machen die Astronomen peu à peu Fortschritte. Im Standardmodell der Sternbildung ist ein Kern zunächst im Gleichgewicht: Schwerkraft und Außendruck werden durch thermischen, magnetischen oder turbulenzbedingten Innendruck kompensiert. Der Kollaps beginnt, sobald die Gravitation diese Balance kippt. Aber was ist der Auslöser dafür? Mehrere Ursachen kommen in Frage: Eine äußere Kraft, etwa eine Supernova-Explosion, könnte die Wolke komprimieren, oder der Innendruck könnte nachlassen, weil Wärme oder Magnetfelder sich verflüchtigen.

Charles Lada vom Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics (CfA) und João Alves vom European Southern Observatory (ESO) vermuten den Auslöser im langsamen Nachlassen des thermischen Innendrucks. Durch Beobachtung von Molekülwolken bei Millimeter- und Submillimeter-Wellenlängen im Radio- und Infrarotbereich konnten sie in nahen Wolken zahlreiche relativ ruhige, isolierte Kerne identifizieren. Einige scheinen sich langsam zusammenzuziehen und haben vielleicht gerade begonnen, Sterne zu bilden. Ein ausgezeichnetes Beispiel ist Barnard 335 im Sternbild Adler. Seine Dichte passt genau zu einer Wolke, deren thermischer Druck den Außendruck fast kompensiert. Eine Infrarotquelle im Zentrum könnte das frühe Stadium eines Protosterns darstellen, was bedeuten würde, dass die Balance vor relativ kurzer Zeit in Richtung Kollaps kippte.

Andere Untersuchungen finden Hinweise auf externe Auslöser. Wie Thomas Prebisch vom Max-Planck-Institut für Radioastronomie in Bonn zeigte, haben sich weit verstreute Sterne in der Assoziation Upper Scorpius (im Sternbild Skorpion) fast gleichzeitig gebildet. Es wäre ein unwahrscheinlicher Zufall, wenn der Innendruck unterschiedlicher Kerne

just zu ein und derselben Zeit nachgelassen hätte. Plausibler wäre die Erklärung, dass die Stoßwelle einer Supernova durch das Gebiet fegte und die Kerne kollabieren ließ. Die Indizien sind freilich nicht eindeutig: Da massereiche Sterne den Ort ihrer Geburt durcheinanderbringen, ist es schwierig, die Entstehungsbedingungen zu rekonstruieren. Bei leichteren Sternen lässt sich wiederum wegen ihrer geringen Leuchtkraft schlecht ermitteln, ob sie wirklich simultan entstanden sind.

Das Spitzer-Weltraumteleskop hat diese Fragen einer Antwort näher gebracht. Lori Allen vom amerikanischen National Optical Astronomy Observatory und Xavier P. Koenig vom CfA entdeckten ein frappierendes Beispiel für externe Auslösung in einem Gebiet der Milchstraße namens W5 (siehe Kasten links unten). Ihre Aufnahme zeigt junge Protosterne in dichten Gaswolken, die durch die Strahlung einer älteren Sternengeneration komprimiert wurden. Da Kompression rasch abläuft, müssen diese weit verstreuten Objekte fast gleichzeitig entstanden sein. Beim Auslösen der Sternbildung gibt es demnach kein Entweder-oder wie früher vermutet, sondern ein Sowohl-als-auch.

Trotz aller Mängel erklärt das Standardmodell die Entstehung isolierter Sterne recht gut. Doch die meisten bilden sich in Haufen, und das Modell unterschlägt den Einfluss einer dicht bevölkerten Umgebung. Um diese Lücke zu füllen, haben Forscher in den letzten Jahren zwei konkurrierende Theorien entwickelt, die beide von aufwändigen Computersimulationen gestützt werden.

Nach der einen Theorie spielt die Wechselwirkung zwischen benachbarten Wolkenkernen die Hauptrolle. In der extremen Version bilden sich viele kleine Protosterne, wandern schnell durch die Wolke und konkurrieren darum, das restliche Gas durch Akkretion an sich zu reißen. Einige wachsen viel stärker als andere; die Verlierer verlassen den Haufen oft ganz und werden zu Sternwinzlingen, die durch die Galaxis streuen. Vor allem Ian Bonnell von der University of St Andrews (Schottland) und Matthew Bate von der University of Exeter (England) favorisieren dieses Szenario, die so genannte kompetitive Akkretion.

Gedränge in der Kinderstube

Im Gegenmodell wirkt nicht die Wechselwirkung zwischen Kernen als dominierender Außenfaktor, sondern die Turbulenz im Gas. Sie löst den Kollaps aus, und für die Größenverteilung der Sterne ist darum nicht der Wettbewerb um Material verantwortlich, sondern die unterschiedliche Geschwindigkeit der turbulenten Gasströme. Dieses Turbulenzmodell haben insbesondere Christopher McKee von der University of California in Berkeley und Mark Krumholz von der University of California in Santa Cruz entwickelt.

Die Beobachtungen scheinen für das Turbulenzmodell zu sprechen (siehe Spektrum der Wissenschaft 5/2006, S. 42). Doch die Theorie der kompetitiven Akkretion könnte immerhin auf Gebiete besonders hoher Sternendichte zutreffen. Ein

Drittes Problem: Überfüllte Sternenkrippen



NASA, JPL / CALTECH UND PAULIAS, TEJEBEA, HARVARD-SMITHSONIAN CENTER FOR ASTROPHYSICS

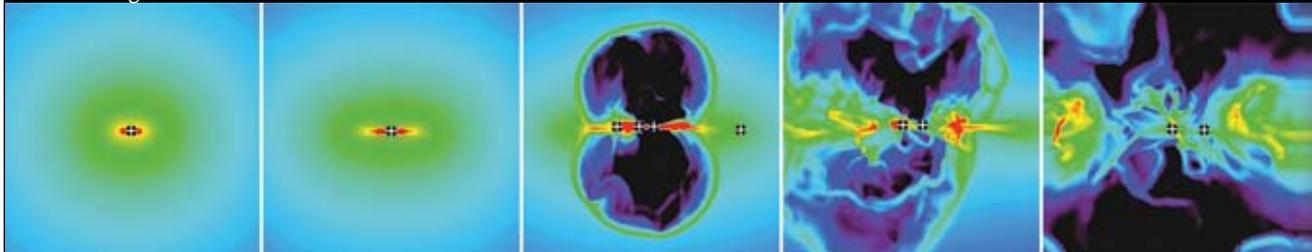
Im Gegensatz zu den Annahmen des Standardmodells können neue Sterne sich bei der Entstehung beeinflussen. Das Spitzer-Teleskop hat ein Beispiel im Weihnachtsbaum-Sternhaufen NGC 2264 gefunden. Hier gibt es eng benachbarte Sterne unterschiedlichen Alters. Bei hoher Auflösung erweisen sich einige der jüngsten »Einzelsterne« als dicht gepackte Protosterngruppen – bis zu zehn in einem Radius von 0,1 Lichtjahren –, die stark aufeinander einwirken müssen.

Viertes Problem: Überwindung der Massenschranke

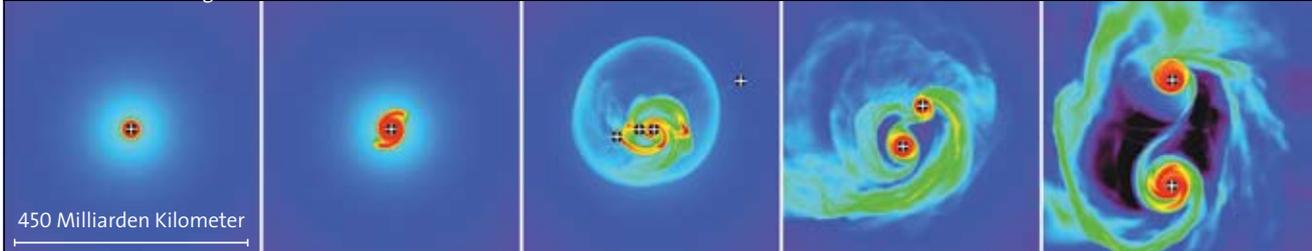
Wie neue Computersimulationen zeigen, wächst ein massereicher Stern nicht gleichförmig und kann deshalb auch vermeintlich unmögliche Größen erreichen. Die vom Protostern emit-

tierte Strahlung treibt Gas weg und erzeugt riesige Leerräume. Doch damit wird der Zustrom von Gas nicht völlig verhindert, da sich zwischen diesen Blasen Materie ansammeln kann.

Dichte längs der Rotationsachse



Dichte rechtwinklig zur Rotationsachse



450 Milliarden Kilometer

17 500 JAHRE NACH BEGINN DES KOLLAPSES:

Ein Protostern ist entstanden, in den fast gleichmäßig Gas fällt. Der Abstieg des Gases setzt Gravitationsenergie frei, die es zum Leuchten bringt.

25 000 JAHRE:

Wenn der Protostern auf rund elf Sonnenmassen angewachsen ist, wird die umgebende Scheibe instabil und nimmt Spiralform an.

34 000 JAHRE:

Sobald der Protostern 17 Sonnenmassen überschreitet, treibt die Strahlung Gas auswärts und erzeugt Blasen. Doch durch die Zwischenräume kann weiter Gas einströmen. Kleinere Protosterne bilden sich.

41 700 JAHRE:

Einer der kleinen Protosterne wächst schneller als der im Zentrum und erreicht bald fast dessen Größe. Die Akkretion verläuft nicht nur räumlich, sondern auch zeitlich ungleichmäßig.

55 900 JAHRE:

Die Simulation hört auf, wenn der zentrale Stern 42 Sonnenmassen erreicht und sein Begleiter 29. Rund 28 Sonnenmassen bleiben als Gas übrig und werden wahrscheinlich letztlich aufgesogen.

AUS: MARK K. KRUMHOLTZ ET AL., FORMATION OF MASSIVE STAR SYSTEMS BY ACCRETION, IN: SCIENCE, VOL. 313, FEB. 2009

sehr interessanter Fall ist der Weihnachtsbaum-Sternhaufen NGC 2264 im Sternbild Einhorn. Im sichtbaren Licht offenbart diese Region die Existenz mehrerer Sterne und großer Mengen von Staub und Gas – Kennzeichen der Sternentstehung. Das Spitzer-Infrarotteleskop enthüllt darin einen dichten Cluster von Sternen in unterschiedlichen Entwicklungsphasen. Dieser Haufen liefert einen Schnappschuss genau derjenigen Stadien, in denen entweder Turbulenz oder Akkretionswettbewerb ihre Spuren hinterlassen.

Gewichtsprobleme

Die jüngsten Sterne – erkennbar an dem besonders hohen Anteil langwelliger Strahlung – drängen sich zu einer engen Gruppe zusammen; ihr mittlerer Abstand beträgt nur 0,3 Lichtjahre. Dieses regelmäßige Muster ist zu erwarten, wenn dichte Kerne in der Molekülwolke unter ihrer Schwerkraft kollabieren. Demnach legen die Anfangsbedingungen in der Wolke den Weg zum Kollaps fest. Doch obgleich die Beobachtungen das Turbulenzmodell stützen, erscheinen auf den Aufnahmen auch vermeintliche Protosterne, die sich bei hoher Auflösung als dicht gepackte Gruppe entpuppen – in einem Fall zehn Quellen in einem Radius von nur 0,1 Lichtjahren. Wegen der dort herrschenden hohen Dichte muss zumindest in kleinem Maßstab kompetitive Akkretion stattfinden.

Somit gibt es wie beim Auslösemechanismus auch bei der Wirkung der Sternumgebung kein simples Entweder-oder. Je nach Lage der Dinge können sowohl Turbulenz als auch Akkretionswettbewerb beteiligt sein. Die Natur scheint jede Möglichkeit zu nutzen, einen Stern zu erzeugen.

Massereiche Sterne sind zwar selten und kurzlebig, doch für die Entwicklung von Galaxien spielen sie eine wichtige Rolle. Durch Strahlung und ausgesandte Teilchen reichern sie das interstellare Medium mit Energie an, und falls sie am Ende als Supernovae explodieren, verstreuen sie schwere Elemente. Die Milchstraße ist übersät mit Blasen und Supernova-Resten, die von solchen Sternen stammen – aber die Standardtheorie vermag ihre Entstehung kaum zu erklären. Sobald ein Protostern eine Schwelle von rund 20 Sonnenmassen überschreitet, sollte der Druck seiner Strahlung eigentlich die Gravitation überwinden und verhindern, dass das Gebilde weiterwächst. Außerdem zerstreut der Sternwind – von einem derart massereichen Himmelskörper kontinuierlich ausgesandte Teilchen – die umgebende Wolke, beschränkt dadurch sein Wachstum noch mehr und stört obendrein die Bildung benachbarter Sterne.

Einen Ausweg aus dem Dilemma weisen dreidimensionale Simulationen, die Krumholz und seine Mitarbeiter kürzlich durchgeführt haben. Demnach verläuft das Sternwachstum überraschend kompliziert. Der einfallende Materiestrom erweist sich als äußerst ungleichmäßig: Dichte Regionen wechseln mit Blasen, durch welche die Strahlung bevorzugt nach außen dringen kann. Deshalb muss der Strahlungsdruck kein Hindernis für weiteres Wachstum sein. Das dichte einströmende Material bildet zudem gern Begleit-

sterne; das erklärt, warum massereiche Sterne selten allein zu beobachten sind. Astronomen suchen nun mit dem Spitzer-Teleskop nach einer Bestätigung des Modells. Das ist schwierig, denn diese seltenen und kurzlebigen Sterne lassen sich nur schwer im Entstehungsstadium entdecken.

Zum Glück stehen bald neue Instrumente für diese Suche zur Verfügung. Das Herschel-Weltraumteleskop sowie SOFIA, das an Bord einer Boeing 747 über immerhin 99 Prozent des atmosphärischen Wasserdampfs hinwegfliegt, werden im fernen Infrarot- und Submillimeterbereich operieren, wo Sterngeburten am besten zu sehen sind. Mit ihrem hohen räumlichen und spektralen Auflösungsvermögen können sie die Geschwindigkeitsmuster in interstellaren Wolken darstellen. Bei längeren Wellenlängen wird der in den chilenischen Anden in Bau befindliche Atacama Large Millimeter Array (ALMA) ab 2012 feine Details einzelner Protosterne erfassen.

Mit den neuen Observatorien lässt sich der komplette Lebenszyklus der interstellaren Materie verfolgen – von atomaren Wolken über Molekülsammlungen und prästellare Kerne bis zu Sternen und wieder zurück zu diffusem Gas. Die Forscher hoffen auch, sternbildende Akkretionsscheiben mit genügend hoher Winkelauflösung abzubilden, um den Einfall von Materie aus der Wolke zu verfolgen und die Wirkung unterschiedlicher Umgebungen auf Sterngeburten zu vergleichen.

Die Ergebnisse dürften weite Bereiche der Astrophysik befruchten. Alles, was wir am Himmel sehen – Galaxien, interstellare Wolken, Sterne und Planeten –, hängt aufs Engste mit der Sternentstehung zusammen. Unsere gegenwärtige Theorie ist nicht schlecht, aber lückenhaft. Mehr und mehr entdecken wir in den Lücken ungeahnt reichhaltige Prozesse. ~

DER AUTOR



Erick T. Young ist Direktor der Science Missions Operation beim Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy (SOFIA). Von 1978 bis 2009 war er Astronom am Steward Observatory der University of Arizona. Er wirkte bei fast jedem Infrarot-Weltraumteleskop als Forscher mit; dazu gehören der Infrarot Astronomical Satellite, das Infrared Space Observatory, die NICMOS-Kamera und die Wide Field Camera 3 an Bord des Hubble-Weltraumteleskops sowie das in Bau befindliche James Webb Space Telescope.

QUELLEN

Krumholz, M.R. et al.: The Formation of Massive Star Systems by Accretion. In: Science 323, S. 754–757, 2009
Young, E.T. et al.: Spitzer and Magellan Observations of NGC 2264: A Remarkable Star-Forming Core near IRS-2. In: Astrophysical Journal 642, S. 972–978, 2006

WEBLINK

www.uclick.org/~krumholz/movies/krumholz07a.mpg
Simulation der Entstehung eines massereichen Sterns durch den Astrophysiker Mark Krumholz von der University of California in Santa Cruz

Virtuelle Welten unter dem Fußboden

Das Phänomen der spiegelnden Reflexion ist uns weniger vertraut, als wir denken. Gelegentlich tritt es sogar mit Schattenbildern in Konkurrenz.

VON H. JOACHIM SCHLICHTING

Am Düsseldorfer Flughafen sprach mich vor einiger Zeit eine ältere Dame an. Gestützt an einen der Pfeiler in der Abflughalle bat sie mich, sie zum Schalter zu geleiten: Sie käme mit den Stufen auf dem Weg nicht zurecht. Zwar konnte ich keine Stufen entdecken, doch als sie sich bei mir unterhakte und ich sie führte, geriet ich fast selbst ins Stolpern. Denn plötzlich wurde auch ich mir der Spiegelwelt bewusst, die sich wie ein Raum unterschiedlicher Tiefen unter meinen Füßen auftat (Bild unten links).

Mit dieser virtuellen Welt sind wir weniger vertraut, als man vermuten mag. Schauen wir uns erst einmal genauer den Boden der Abflughalle an. Hier arbeiten spiegelnde und diffuse Reflexion Hand in Hand. Den Idealfall spiegelnder Reflexion kennen wir vom Spiegel, an dem Licht gemäß dem Prinzip Einfallswinkel gleich Ausfallwinkel reflektiert wird. Dieser besitzt keine ei-

gene Farbe, sondern nimmt gewissermaßen die Farbe der Gegenstände an, die wir in ihm spiegelnd reflektiert sehen.

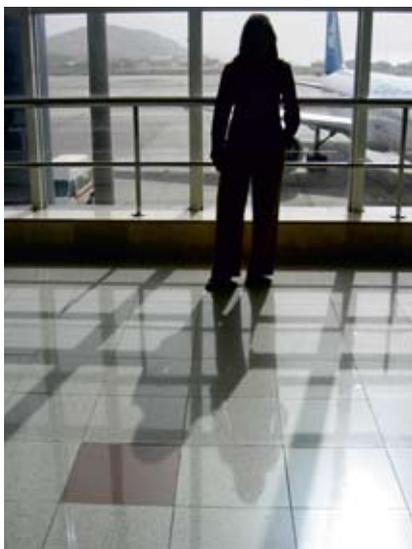
Der Idealfall der diffusen Reflexion liegt wiederum dann vor, wenn auftretendes weißes Licht »zerstreut«, also in alle Richtungen reflektiert wird – etwa von einem matten Autolack. Von diffuser Reflexion sprechen Physiker aber auch, wenn einige Farben des weißen Lichts absorbiert werden und die verbleibende Komplementärfarbe diffus ausgesandt wird. Mit einigem Recht lässt sich darum sogar sagen, dass wir Gegenstände erst auf Grund der diffusen Reflexion überhaupt als solche sehen.

Wie in vielen anderen Fällen haben wir es bei dem glatten Fußboden mit beiden Reflexionsphänomenen gleichzeitig zu tun. Indem der Boden im Bild links unten das auffallende Licht der Lampen und Gegenstände diffus reflektiert, erhält er seine charakteristische Farbe.

Diese wird allerdings überlagert durch das Licht von spiegelnd reflektierten Gegenständen wie den hellen Leuchtstoffröhren oder der roten Fläche links im Hintergrund. Aber auch die ausgedehnten hellen und dunklen Deckenstreifen werden spiegelnd reflektiert. Dies wird an den Fliesen rechts der Säulen offensichtlich, die – obwohl alle identisch – aufgehellt oder abgedunkelt erscheinen. Eine Serie von Fotos, aufgenommen von unterschiedlichen Standpunkten, würde auch zeigen, dass die Helligkeitsunterschiede mit den Positionen mitwandern.

Tauchen wir nun ab in die virtuelle Spiegelwelt, die man rein optisch wie eine völlig reale betrachten kann. Dann lässt sich das Problem der alten Dame physikalisch leicht lösen. Optisch gesehen befinden sich gespiegelte Gegenstände genauso weit hinter dem Spiegel, wie sich die Originale davor befinden. Folglich entsprechen die Deckenteile, die sich von links nach rechts in abnehmender Höhe befinden, in ihrer gespiegelten Variante einem stufenweise ansteigenden Fußboden.

Doch wie gehen wir dem schwierigeren Rätsel auf den Grund, das uns das nebenstehende Bild präsentiert? Ebenfalls als Folge des Wechselspiels von diffuser und spiegelnder Reflexion erweckt die Szene den Eindruck, dass die vor der Fensterfront stehende Frau gleich zwei Schatten besitzt: Jedes ihrer Abbilder erscheint strukturlos und monochrom, ganz wie es für einen Schatten typisch ist. Doch ist nur eine einzige nennenswerte Lichtquelle im Spiel, nämlich die durch die Scheiben scheinende Sonne, und auch unabhängig von dieser Information lässt sich das rechte Abbild als Spiegelbild der Frau identifizieren. Die Ähnlichkeit mit einem Schatten ist al-



Abgrund oder ebener Fußboden? Die Spiegelwelt der Düsseldorfer Flughafenhalle gibt so manchem Reisenden Rätsel auf (links). Zum Beispiel auch dieses: Wirft die Besucherin im Bild rechts einen doppelten Schatten? Oder besitzt sie gar ein doppeltes Spiegelbild?



Während die Schatten der senkrechten Rahmenelemente auf dem Boden »liegen«, »ragen« ihre Spiegelbilder senkrecht in ihn hinein (links). Bei geringer diffuser Reflexion wie auf dem schwarzen Fliesenstreifen rechts treten Spiegelungen deutlich hervor.

lein der Tatsache zu verdanken, dass die gespiegelte Seite der Person von der Sonne wegzeigt – sie sendet also kaum Licht aus, so dass in diesem Fall nicht einmal das Spiegelbild Farbe oder Struktur der Person zu erkennen gibt.

Schatten versus Spiegelbild

Der Schatten führt uns auch vor Augen, dass der Fußboden Licht diffus reflektiert: Kaum blendet eine Person das einfallende Licht aus, wird von den entsprechenden Stellen kein Sonnenlicht mehr ins Auge des Betrachters gestreut. Wäre der Boden hingegen ein perfekter Spiegel, könnte ein Schatten erst gar nicht entstehen.

Und wie verhält sich der Schatten zum Spiegelbild? Ersterer liegt gewissermaßen flach auf dem Boden. Seine Lage hängt einzig davon ab, wie das Schatten werfende Objekt und die Lichtquelle zueinander gelegen sind – und sie verändert sich auch nicht, wenn man ihn aus einem anderen Blickwinkel betrachtet. Ein Spiegelbild scheint hingegen in den fiktiven Raum unterhalb des Bodens hineinzuragen. Und es lässt sich nur von einem bestimmten Punkt aus sehen. Verändert man jedoch die eigene Position relativ zum Spiegel, kommt ein anderes Spiegelbild beziehungsweise eine andere Ansicht des gespiegelten Gegenstands in den Blick.

Präziser lassen sich die Unterschiede zwischen Schatten und Spiegelbild er-

kunden, wenn wir die senkrechten Elemente des Fensterrahmens im Bild oben links betrachten. Wegen ihrer konstanten Breite stellen sie Invarianten dar, deren Abbildern man auf Grund der perspektivischen Verkürzung sofort ansieht, ob sie auf den Betrachter zulaufen oder sich von ihm entfernen. Der auf den Boden projizierte Schatten scheint sich mit zunehmender Entfernung zu verjüngen, wie man es von Bahnschienen kennt, deren Anblick man zum Horizont hin verfolgt. Das Spiegelbild verhält sich genau umgekehrt. Es liegt nicht flach auf dem Boden, sondern ragt in die daruntergelegene Spiegelwelt hinein. So entfernt es sich vom Beobachter und erscheint nach »unten« hin perspektivisch verkürzt. (Man kann auch argumentieren, dass sich die Fensterpfosten nach oben hin vom Beobachter entfernen und schmaler zu werden scheinen, was sich im Spiegelbild entsprechend wiederfindet.) Darüber hinaus scheint das Foto zu belegen, dass sich Spiegelbilder von Schatten auch dadurch unterscheiden, dass sie schmaler sind. Doch das stimmt natürlich nicht. Der kleinere Querschnitt, den die Spiegelbilder der Rahmenelemente im Vergleich zu deren Schatten aufweisen, erklärt sich dadurch, dass der Rahmen seitlich angestrahlt wird: Bei der Projektion des Schattens auf den Boden kommt ein größerer Querschnitt zum Tragen als bei der frontalen Spiegelung.

Der Fußboden, ein Hybrid zwischen Projektions- und Spiegelfläche, wird für die unter ihm liegende Spiegelwelt erst so richtig transparent, wenn die Intensität des spiegelnd reflektierten Lichts gegenüber der diffusen Strahlung überwiegt. Zudem sollten die spiegelnd reflektierten Objekte sehr hell oder der Boden sehr dunkel sein. Für diesen ist dabei unerheblich, ob tatsächlich dunkle Fliesen verlegt wurden oder ob sie hell, aber beschattet sind. In beiden Fällen tritt das diffus reflektierte Licht der dominierenden Lichtquelle in den Hintergrund, so dass sich die spiegelnde Reflexion voll entfaltet. Zu erkennen ist das schon an der dunkleren Fliese und dem direkt anschließenden beschatteten Bereich im rechten Bild auf der linken Seite, die einen Teil des gespiegelten Kopfs mit größerer Prägnanz zeigen. Doch das lässt sich noch eindrucksvoller vorführen. Im Bild oben rechts kann man von einem völlig unscheinbaren Fußboden zu spiegelnden schwarzen Fliesen derselben Oberflächenbeschaffenheit spazieren – und plötzlich sehenswerte Ausblicke auf die in virtuelle Tiefen versenkte Deckenkonstruktion genießen. ∞

DER AUTOR



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

STRAHLENOPTIK

Bezaubernde Bildnisse

Kann man ohne Spiegel fünf Seiten eines undurchsichtigen Würfels gleichzeitig sehen? Allgemeiner: Welche Arten von Bildern kann man fotografieren, sehen oder auf einer Mattscheibe auffangen?

VON NORBERT TREITZ

Was ist ein Bild? »Das, was das Auge sieht«, gibt der Physiker als erste vorläufige Antwort und lässt damit die vielen interessanten Dinge außer Acht, die mein Gehirn tut, bevor mir das Gesehene bewusst wird.

Etwas genauer ausgedrückt besteht ein Bild aus lauter »Bildpunkten«; ein solcher ist da, wo ein kegelförmiges (»divergentes«) Bündel von Lichtstrahlen, von einem leuchtenden Punkt ausgehend, sich wieder zu einem Punkt vereinigt. Dazu ist im Allgemeinen eine

Linse oder ein Hohlspiegel erforderlich; im Auge bewirkt die vereinte Brechkraft von Hornhaut und Augenlinse im günstigen Fall, dass der Bildpunkt gerade in der lichtempfindlichen Netzhaut (Retina) liegt. Ein flächenhaftes Objekt wie eine Zeitungsseite oder eine Hausfassade ergibt ein ebenfalls flächenhaftes Bild auf der Retina, das vielleicht sogar unverzerrt, also im Sinn der Geometrie ähnlich zum Objekt ist.

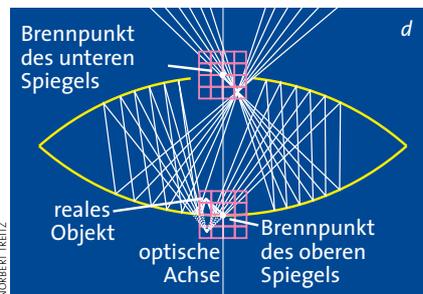
Die geraden oder geknickten Wege des Lichts vom Objekt bis ins Auge sind

Gegenstand der Strahlenoptik, die in den Lehrplänen zum Physikunterricht einen unangefochtenen Dauerplatz besetzt. Man kann die Sache auch im Wellenbild darstellen; das ist interessant für die so genannten Kaustiken (siehe die »Physikalischen Unterhaltungen«, März bis Mai 2007), würde aber hier die Darstellung unnötig komplizieren.

In der idealisierten Welt der Strahlenoptik gibt es die perfekte Sammellinse (Bild rechts oben). Die Ebene, in der sie liegt, teilt die Welt in zwei Hälften: In einer ist das Objekt und in der anderen der Betrachter. In jeder Welthälfte hat die Linse einen Brennpunkt; Licht, das von dort ausgeht, läuft in der anderen Welthälfte parallel zur optischen Achse weiter und umgekehrt. Allgemein sind Lichtwege stets umkehrbar. Sehr ferne Objekte wie die Sonne darf man als unendlich fern und damit das von ihr ausgehende Lichtbündel als parallel auffassen. Dieses sammelt sich im Brennpunkt, der in diesem Fall seinem Namen alle Ehre macht.

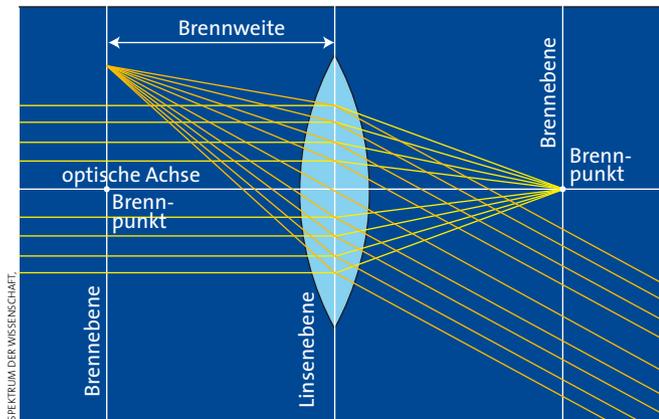
Das durch eine Linse erzeugte Bild nennen die Physiker ein reelles Bild; es ist wirklich da, wo man es sieht, denn man kann es auf einer Mattscheibe auffangen. Wenn dagegen die Strahlenbündel zwar divergent von wirklichen Objektpunkten kommen, aber unterwegs gespiegelt werden, orten wir diese Punkte ganz woanders, sogar dort, wo es völlig dunkel ist: Das ist das »virtuelle Bild« aus dem Physikunterricht. Die einfachsten Beispiele mit ebenen Spiegeln haben wir in den allerersten »Physikalischen Unterhaltungen« im Juni 2004 genauer betrachtet.

In den unteren Hohlspiegel des »Mirascope« kommt ein Reißnagel (a) – und scheint im zugeklappten Spielzeug in dem Loch des oberen Hohlspiegels zu schweben (b)! Aber anfassen kann man ihn nicht (c). So kommt das untere der beiden reellen Bilder des Reißnagels zu Stande (d).



FOTOS: CHRISTOPH POPPE

NORBERT TREITZ



Eine idealisierte Sammellinse bricht Lichtstrahlen, die parallel zur optischen Achse (hier von links) einfallen, auf ihren (rechten) Brennpunkt hin. Umgekehrt verwandelt sie ein Strahlenbündel, das von einem Brennpunkt ausgeht, in achsenparallele Strahlen. Ganz allgemein werden Strahlen, die von einem Punkt in einer der beiden Brennebenen ausgehen, zu parallelen (aber nicht unbedingt achsenparallelen) Strahlen und umgekehrt. Brennebenen nennt man die zur Linsenebene parallelen Ebenen durch die Brennpunkte.

Jede Reflexion kehrt die »Händigkeit« einmal um, macht also aus einer rechten Hand eine linke und umgekehrt. Der Innenraum eines allseits innen verspiegelten Würfels ist umgeben von 12 (virtuellen) würfelförmigen Bildräumen der gleichen Händigkeit und 14 ebenfalls virtuellen der umgekehrten. Und das sind nur die erst- bis dritt-nächsten Nachbarzellen des Würfels im unendlichen Raum!

Die Funktionsweise einer Lupe

Schaue ich durch eine Sammellinse auf ein flaches Objekt, das sich in der Brennebene auf der anderen Seite der Linse befindet, so erreichen mich die divergenten Bündel vom Objekt als Parallelbündel. Ich sehe also statt des Objekts ein unendlich großes virtuelles Bild desselben in unendlicher Entfernung. Das ist für mich bequemer als der Blick ohne Lupe, weil mir die Anstrengung erspart bleibt, zum Scharfstellen die Augenlinse stärker zu krümmen – jedenfalls wenn ich normalsichtig bin oder meine Brille oder Kontaktlinsen mich dazu machen.

Sehe ich auch mehr Einzelheiten? Das kommt auf die Brennweite an und auf die Entfernung, in der ich das Objekt sonst betrachten könnte. Für diesen individuell verschiedenen »Nahpunkt«, die Entfernung, auf die ein Mensch die Augen gerade noch akkomodieren kann, pflegt man die »Normsehweite« von 25 Zentimetern anzusetzen. Vergleicht man nun den Blick durch die Lupe mit einem unbewaffneten Blick auf ein Objekt in dieser Entfernung, so ergibt sich als Faktor für die

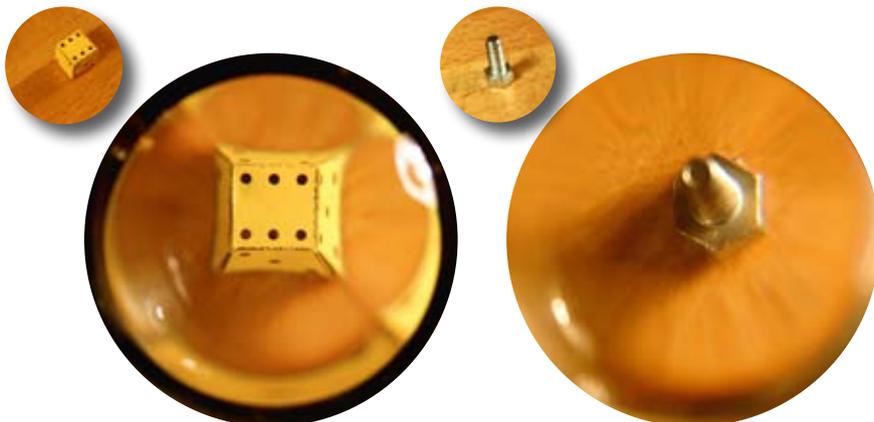
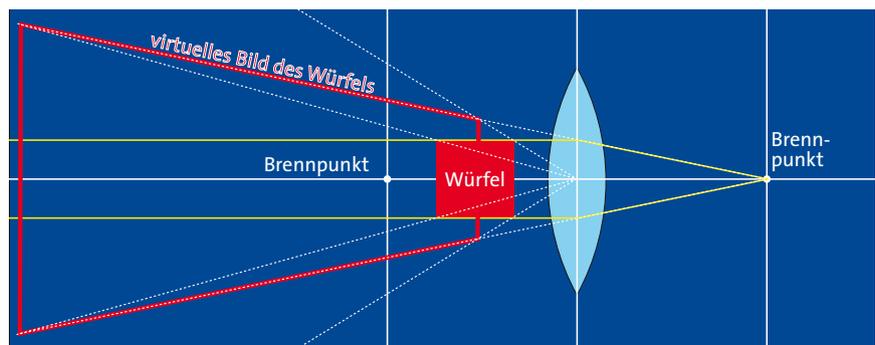
(Lateral-, das heißt Seitwärts-)Vergrößerung das Verhältnis der Normsehweite zur Brennweite der Lupe. Für handelsübliche Lupen beträgt dieses Verhältnis typischerweise 5 oder 2,5. Lupen für Briefmarkenfrende haben oft eine Ablagefläche in ihrer Brennebene, so dass die kleinen Kunstwerke ohne Weiteres mit fernakkommodiertem Auge zu betrachten sind.

Man kann Objekte auch näher an die Lupe heranrücken, allerdings muss man dann »auf nah« akkomodieren. Ein

flächenhaftes Objekt, rechtwinklig zur optischen Achse orientiert und zwischen der Lupe und ihrer betrachterfernen Brennebene gelegen, ergibt ein gleichfalls ebenes virtuelles Bild.

Denken wir uns einen Stapel solcher quadratischen Objektflächen, die zusammen einen in Scheibchen zerlegten Würfel bilden. Die beim Zerlegen zerschnittenen Würfelkanten liegen parallel zur optischen Achse. Da achsenparallele Strahlen zu Brennpunktstrahlen gebrochen werden, sind die virtuellen

Ein Würfel, durch eine Lupe betrachtet, liefert ein virtuelles Bild in Form eines Pyramidenstumpfs. Entsprechend erscheint das Gewinde einer Schraube als Kegelstumpf. Abbildungsfehler am Rand der Lupe machen sich störend bemerkbar.



Bilder unserer Würfelscheibchen unterschiedlich große Quadrate, die zusammen den Stumpf einer Pyramide mit Spitze im betrachterseitigen Brennpunkt bilden (Bild S. 57 unten).

Aus dem Objekt mitsamt Lupe kommt das Licht so heraus, wie es aus dem virtuellen Bild an dessen Ort, aber dann ohne Lupe käme. Allein durch Betrachten aus unserer speziellen Position könnten wir den Pyramidenstumpf nicht von der Kombination aus Würfel und Lupe unterscheiden – wenn die Lupe eine ideale Linse wäre.

Normalerweise halten wir das Auge nahe hinter der Lupe, also im Beispiel innerhalb der Pyramide, und sehen nur

das oberste (uns nächste) Quadrat. Von einem durchsichtigen Würfel erscheint wie in der gewöhnlichen Perspektive die nahe Seite größer – jedenfalls auf der Netzhaut. Das Gehirn weiß das richtig zu interpretieren und erkennt trotzdem den Würfel als reguläres Polyeder.

Gehen wir nun mit dem Auge in den uns zugewandten Brennpunkt der Lupe (rechts im Schemabild S. 57 unten), so sehen wir nichts als die quadratische Deckfläche des Pyramidenstumpfs. Dem entspricht die Parallelperspektive: Die nahe und die ferne Würfelseite erscheinen auf der Netzhaut gleich groß, die vier achsenparallelen Kanten dazwischen fallen zu Punkten zusammen.

Nun ist die Parallelperspektive der Grenzfall der gewöhnlichen und daher noch nichts Unnatürliches. Gehen wir aber mit dem Auge weit hinter den Brennpunkt, so sehen wir auf die vier Seitenwände des Pyramidenstumpfs, die in Wirklichkeit die vier Seitenwände des Würfels sind, und natürlich auch auf seine Oberseite. Die Lupe bietet also bei dieser ungewöhnlichen Benutzung eine völlig unnatürliche Perspektive.

Für Experimente empfehlen sich große Lupen und kleine (zentimetergroße) Objekte: Holzwürfel, Stapel von Centmünzen oder ein entsprechend kleiner Zylindermantel aus Papier, der innen anders als außen gefärbt ist.

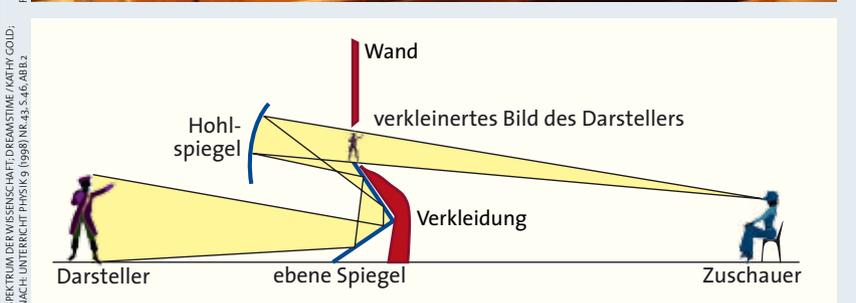
Reelle Bilder

Die Bezeichnung »reelles Bild« ist leicht übertrieben; denn da, wo man das Objekt zu sehen glaubt, ist keins – ebenso wenig wie beim virtuellen Bild. Immerhin kann man an die Position eines realen Bilds einen Projektionsschirm (Mattscheibe oder Leinwand) hinstellen. Von dort starten sehr divergente Bündel, so dass man das »aufgefangene« reelle Bild aus vielen Richtungen sehen kann, auch von hinten.

Für die Praxis interessanter ist allerdings der Fall, dass die Strahlen nicht von einer Mattscheibe in alle Richtungen gestreut werden, sondern unge­stört durch ihre Bildpunkte weiterlaufen. Sie verhalten sich dann wie Strahlen, die von einem echten Objekt an der Stelle des realen Bilds ausgehen würden. Man kann sie einfach ansehen, statt sie aufzufangen, indem man die Augen aus der richtigen Richtung auf sich richtet. Tut man das mit einer Lupe, so hat man ein keplersches Fernrohr oder auch ein Mikroskop.

Schräg von der Seite sieht man reelle Bilder ohne Mattscheibe oder Vergleichbares allerdings kaum. Im Deutschen Technikmuseum in Berlin kann man ein großes »Luftbild« mit einem weißen Stock auffangen, wenn man mit diesem schnell genug durch die Bildebene fuchelt.

Reelle Bilder sind übrigens nicht verpflichtet, zweidimensional zu sein, wenn die Objekte selbst es nicht sind.



Zwergen-Illusion: Das Tanagra-Theater

Hinter der küchenschrankähnlichen Verkleidung (Foto) stecken ein ziemlich großer Hohlspiegel und zwei ebenfalls große ebene Spiegel (Schemabild). Der Hohlspiegel erzeugt von den Menschen verkleinerte kopfstehende reelle Bilder knapp außerhalb seines Brennpunkts und etwas neben seiner Achse. Die beiden ebenen Spiegel kehren die vertikale Dimension um. Da insgesamt drei (also eine ungerade Anzahl) Spiegelungen im Lichtweg sind, hat das fertige Bild die verkehrte Händigkeit.



FOTOS: CHRISTOPH LÖHME



In Wirklichkeit hängt der Spielzeugtiger kopfunter an der Sitzfläche des Stuhls (links); aber weil man sein reelles Bild im Hohlspiegel mit dem echten Objekt verwechselt, scheint er aufrecht auf dem Spiegelbild des Stuhls zu stehen (rechts).

Nehmen wir wieder einen Würfel: Sein reelles Bild mit einer idealisierten Sammellinse ist abermals ein Pyramidenstumpf. Seine Händigkeit (die man sieht, wenn er schraubenförmig bemalt ist) ist die originale. Es werden zwar oben und unten sowie rechts und links vertauscht, was zusammen eine Halbdrehung um die optische Achse ergibt, aber vorne und hinten (entlang dieser Achse) werden getreu zugeordnet.

Verblüffende Täuschungen

Manche Illusionen kommen dadurch zu Stande, dass der Betrachter die Position eines realen oder virtuellen Bilds für die des Objekts hält. In einer Buchhandlung, die gerade umgebaut wurde, hatte man als Abtrennung zur Baustelle eine Wand mit einem großen Spiegel eingezogen, damit der Raum nicht kleiner aussah als sonst. Ich griff in ein Regal und versuchte in dessen virtuelles Bild zu fassen!

Einer der schönsten Versuche zu diesem Thema benutzt zwei gleich große parabolische Hohlspiegel, die eine gemeinsame vertikale Rotationsachse haben und einander derart »anblicken«, dass der Brennpunkt des einen im Scheitelpunkt des anderen liegt. Die Umgebung des oberen Scheitels ist als rundes Fenster offen gelassen; auf die des unteren legt man ein nicht zu großes Objekt, am besten einen Reißnagel, der mit der Spitze und einem Teil seines Rands aufliegt und leicht um diese herumrollen kann. Wer schräg von oben hineinblickt, glaubt das Objekt auf dem oberen Scheitel eines linsen- oder ufoförmigen Geräts mit spiegeln-

dem Dach zu sehen und direkt unter ihm sein Spiegelbild (Bilder S. 56). Tatsächlich sind das aber zwei reelle (!) Bilder mit verschiedener Händigkeit. Das Objekt selbst und sein gewöhnliches Spiegelbild sieht man dagegen beim steilen Blick von oben. Halten Sie der Versuchsperson das Ganze so vor die Nase, dass sie schräg blicken muss. Bei der Aufforderung, den Reißnagel wegzunehmen, befürchtet sie alles Mögliche, nur nicht den Griff ins Leere! Interessant ist, wie schnell das Gehirn beim Erkennen des Widerspruchs zwischen Sehen und Tasten vom zwar inhaltsreichen, aber manchmal problematischen Zeugen zum weitaus zuverlässigeren umschaltet.

Mit nur einem – nicht zu kleinen – Hohlspiegel gelingt der folgende Trick (Bilder oben): Bauen Sie den Spiegel mit waagrecht orientierter Achse auf einem Tisch auf. Ungefähr eine doppelte Brennweite von ihm entfernt stellen Sie einen kleinen Stuhl hin, dessen Unterseite für den Betrachter verdeckt ist. Genau dort kleben Sie kleine Figuren mit den Füßen nach oben an. Aus gewissen Positionen sieht der Betrachter nun deren reelle Bilder auf dem Stuhl stehen, ohne sie als solche zu erkennen, insbesondere wenn der Hohlspiegel keine Beachtung findet, sondern nur unschuldig irgendwo herumsteht.

Im »Kinderreich« des Deutschen Museums in München steht das von Ernst Biedermann erfundene und von der Firma Zeiss gebaute »Tanagra-Theater« (Kasten links). Es sieht aus wie ein großer Schrank mit einem Bühnenfenster für spielzeuggroße Puppen. Hinter

der Rückseite ist ein Podest, auf dem mehrere Leute agieren können. Sie sind dann verkleinert und aufrecht in dem Fenster zu sehen, wenn auch mit der falschen Händigkeit. Die Illusion ist hinreißend, besonders wenn man die in Liliputaner verwandelten und klar sichtbaren lebendigen Menschen persönlich kennt.

Zum Schluss eine kleine Anekdote: Die siebenjährige Marie-Christine und ich sehen ein Video der »Zauberflöte«. Tamino singt »Dies Bildnis ist bezaubernd schön«, aber leider wendet er den Zuschauern die Rückseite des Bilds in seinen Händen zu, weil er es ja selbst betrachten will. Die Kleine geht neben das Fernsehgerät knapp hinter die Bildschirmenebene und versucht – schalkhaft grinsend – zu sehen, wie schön das Bildnis denn nun ist. ~

DER AUTOR



Norbert Treitz ist pensionierter Professor für Didaktik der Physik an der Universität Duisburg-Essen.

QUELLE

Becker, J., Ucke, C.: Zaubertricks aus der »Physik-Boutique«. In: Unterricht Physik 9/1998, S. 46–47

WEBLINK

www.deutsches-museum.de/ausstellungen/kinderreich/tanagra-theater/
Das Tanagra-Theater im Deutschen Museum in München

Der prähistorische Kode

Mysteriöse Zeichen in mehr als 30 000 Jahre alten Höhlenmalereien beschäftigen Urgeschichtler und Archäologen. Offenbar benutzten unsere Vorfahren damals schon Symbolsysteme, um Informationen zu übermitteln. Auch wenn deren Deutung unter Fachleuten noch umstritten ist: Möglicherweise entfaltete sich menschliche Kreativität früher als bisher geglaubt!

Von Kate Ravilious

Die ersten Forscher, die es wagten, durch den sieben Meter langen und gefährlich engen Tunnel zu kriechen, wurden reichlich belohnt. Im Innern der südfranzösischen Chauvet-Höhle entdeckten sie eine atemberaubende, drei Meter hohe Felsenmalerei, die trotz ihres fast ungläublichen Alters von gut 30 000 Jahren locker neben renommierten Kunstwerken der Neuzeit bestehen kann.

AUF EINEN BLICK

DIE SYMBOLISCHE REVOLUTION

1 In zahlreichen bis zu 30 000 Jahre alten Höhlenmalereien finden sich Zeichen, die offenbar über weite Regionen Südeuropas verbreitet waren – ein Wendepunkt für die Kulturen dieser Epoche.

2 Der durchgängige Gebrauch der Zeichen legt nahe, dass die symbolische Revolution schon vor der Ankunft der ersten modernen Menschen in Europa begonnen hatte.

3 Demgemäß müsste der Beginn der kreativen Explosion um zehntausende Jahre in die Vergangenheit vorverlegt werden. Nach einer allerdings umstrittenen These verbreiteten sich die Symbole bereits mit den prähistorischen Stämmen, als diese Afrika verließen.

Im oberen Teil zeigt das Bild in dunklen Farben eine Gruppe majestätischer Pferde, die den Eindruck erwecken, »als würden sie aus der Wand direkt auf einen zuspringen«, so der französische Urgeschichtler Jean Clottes. Er leitete früher die wissenschaftliche Erkundung der Höhle und ist einer der wenigen Menschen, welche die urzeitlichen Gemälde mit eigenen Augen gesehen haben. Unterhalb der Pferde kämpfen zwei ungestüme Nashörner gegeneinander, links erblicken Höhlenbesucher eine sehr plastisch dargestellte Herde prähistorischer Kühe (siehe auch »Im Bestiarum der Steinzeit«, Spektrum-Spezial 1/2006, S. 72).

Trotz dieser urtümlichen Schönheit widmeten sich Paläontologen und Archäologen auch einer Reihe unauffälliger Halbkreise, Geraden und Zickzacklinien an den Felswänden. In zahlreichen Studien konnten sie nachweisen, dass es sich dabei keinesfalls nur um Kritzeleien prähistorischer Künstler handelt; die Zeichen haben vielmehr einen hohen Symbolcharakter. Nach heutigem Wissensstand handelt es sich dabei um einen geschriebenen »Kode«, der allen prähistorischen Stämmen verständlich gewesen sein dürfte, die im Gebiet des heutigen Frankreich lebten (und womöglich auch noch in Nachbarländern).

Die unscheinbaren Formen könnten sich sogar als ähnlich bedeutsam erweisen wie die Felsgemälde trabender Pferde



BILDAGENTUR-ONLINE / TIPS-IMAGES

Dramatische Tierdarstellungen und Jagdszenen dominieren die steinzeitlichen Felsmalereien wie hier in der südfranzösischen Höhle von Lascaux. Lange übersahen Forscher kleine abstrakte Symbole, die damals weit verbreitet waren – etwa Striche, Kreuze (links) und Punktgruppen (oben rechts sowie unten links).

und kämpfender Nashörner. Denn sie zeugen von den ersten Schritten, mit denen sich die Menschheit dem Gebrauch von Schrift und Symbolen näherte.

Bislang galt es unter Anthropologen als gesichert, dass unsere Vorfahren vor 30 000 bis 40 000 Jahren eine Art kreative Explosion durchmachten: Sie begannen abstrakt zu denken und Höhlenwände zu bemalen. Diese These bestätigen zahlreiche Malereien wie diejenigen in der Chauvet-Höhle, die um diese Zeit in allen Teilen Europas entstanden.

Neudatierung der »kreativen Explosion«

Die Schrift hingegen schien erst viel später aufgekommen zu sein: Die bildhaften (piktografischen) Schriften entstanden vor rund 5000 Jahren. Vor allem französische Wissenschaftler hatten sich ernsthaft mit den relativ kleinen und unauffälligen Zeichen im Umfeld der Höhlenmalereien befasst. Den entscheidenden Beweis früher menschlicher Kreativität sahen sie aber in erster Linie in den ausgefeilten Wandzeichnungen.

Forscher wie Jean Clottes hatten in ihren Studien von Zeichen in einigen Höhlen berichtet. »Auch wurde eine komplexe semiotische Interpretation der Zeichen und ihrer Verteilung seit den 1950er Jahren durch Forscher wie André Leroi-Gourhan ausgearbeitet«, berichtet der Kölner Felsbildarchäologe Tilman Lenssen-Erz. Doch schlüssige Deutungen stehen bis heute aus. Eine neue Vergleichsstudie legte 2009 Genevieve von Petzinger, damals Studentin an der University of Victoria im kanadischen British Columbia, unter der Leitung von April Nowell vor. Von Petzinger erfasste sämtliche Zeichen aus 146 französischen Höhlen in einer Datenbank, die den Zeitraum von 35 000 bis 10 000 Jahren vor unserer Zeit abdeckt.

Die Ergebnisse ihrer Studie verblüfften die Forscher: 26 Zeichen, die alle im selben Stil gezeichnet waren, treten an all diesen Orten immer wieder auf. Zwar waren viele der Symbole sehr schlicht – Striche, Kreise oder Dreiecke. Aber aus der Tatsache, dass auch viele der komplexeren Zeichen an mehreren Orten anzutreffen waren, schlossen von Petzinger

und Nowell, dass sie eine übergeordnete Bedeutung haben mussten – und womöglich sogar erste Grundformen geschriebener Kommunikation darstellen.

Weitere Studien bestätigten diese Vermutung. Als von Petzinger einige der Darstellungen an den Höhlenwänden noch einmal genauer untersuchte, fielen ihr auch andere, weniger abstrakte Zeichen auf, die offenbar Details einer größeren Figur darstellten – wie etwa den Stoßzahn eines Mammut ohne den zugehörigen Körper.

Hier repräsentiert ein Teil das Ganze (»pars pro toto«). Dieses Prinzip bezeichnen Linguisten auch als Synekdoche; es kennzeichnet alle bekannten piktografischen Sprachen. Laut von Petzinger und Nowell zeigt es, dass unsere Vorfahren offenbar in der Tat darüber nachgedacht haben, wie sie ihre Vorstellungen symbolisch statt realistisch darstellen

können. Das hätte schließlich zu den abstrakten Symbolen geführt, die die beiden Archäologinnen untersuchten.

»Es war ein Weg, um Information in knapper Form zu vermitteln«, behauptet Nowell. So könnte beispielsweise der Mammutstoßzahn einfach nur ein Mammut dargestellt haben, die Mammutjagd oder auch etwas, was nicht direkt mit der Bedeutung des Tiers zu tun hat. Zu den anderen häufig verwendeten Synekdochen zählen beispielsweise zwei konzentrische Kreise oder Dreiecke (die in Pferde- und Büffelbildern Augen darstellen), Steinbockhörner oder der Buckel eines Mammut. Ein keulenförmiges Zeichen – das entfernt an die Ziffer 1 erinnert – könnte eine stilisierte weibliche Figur sein.

Den eindrücklichsten Beleg für ihre These brachte die Beobachtung, dass bestimmte Zeichen wiederholt in Paaren

Steinzeit-Graffiti

Die französischen Höhlen sind für ihre prähistorische Felsenkunst berühmt. Um die archaischen Gemälde herum untersuchten Archäologen 26 Symbole, die an zahlreichen Stätten auftauchen – über Zeiträume von 25 000 Jahren hinweg.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / EMDE-GRAFIK. NACH: GENEVIEVE VON PETZINGER, ANDRÉ LEROI-GOURHAN, DAVID LEWIS-WILLIAMS UND NATALIE FRANKLIN

auftauchen. Im Negativ dargestellte Hände und Punkte zählen beispielsweise zu den häufigsten – insbesondere in der klimatisch warmen Periode des Gravettien (vor 28 000 bis 22 000 Jahren). In Zeichnungen einer Fundstätte namens Les Trois-Frères in den französischen Pyrenäen entdeckten die Forscher sogar Gruppen aus vier Zeichen: so genannte negative Hände, Punkte, fingerartige und daumenartige Zeichen (Letztere eine seltene Unterkategorie der negativen Hände).

Gleiche Zeichen in 70 Prozent aller Höhlen

Solche Zeichengruppierungen tauchen in frühen piktografischen Schriften generell öfter auf – wobei die kombinierten Symbole für neue Bedeutungen standen. Die Forscher glauben, dass die prähistorischen Europäer über ein ähn-

liches System verfügten. »Das konsistente Auftreten von Zeichenpaarungen deutet darauf hin, dass sie tatsächlich eine Bedeutung hatten«, sagt Nowell. »Wir sehen hier womöglich die ersten Anzeichen eines rudimentären Sprachsystems.«

Als von Petzinger bei einer Konferenz der amerikanischen Paläoanthropologischen Gesellschaft in Chicago 2009 ihre ersten Ergebnisse vorstellte, erregten diese großes Aufsehen. Seitdem haben sie und Nowell weitere Arbeiten zu dem Thema publiziert. Das zur Smithsonian Institution gehörende National Museum of Natural History in Washington, D. C. will die Symbole sogar in seiner Ausstellung zur menschlichen Evolution präsentieren.

»Diese Arbeit ist wirklich beeindruckend«, kommentiert der Paläontologe Iain Davidson, Spezialist für Felsmalereien an der University of New England im australischen New South Wales. »Man erkennt, dass die Menschen damals alle ähnliche Konventionen hatten, um etwas darzustellen.« Petzinger und Nowell vermuteten, dass solche Symbole uns noch viel mehr über prähistorische Kulturen verraten könnten. So versuchten sie im nächsten Schritt zurückzuerfolgen, wo und wann diese Kulturen entstanden waren. Linien erwiesen sich als das Element mit der größten Verbreitung: Sie lassen sich in 70 Prozent der Höhlen nachweisen und tauchen in der ganzen Zeitspanne von 30 000 bis zu 10 000 Jahren vor unserer Zeit auf.

Am zweithäufigsten trat das Symbol »offener Winkel« mit Punkten in Erscheinung. Beide Symbole fanden sich in 42 Prozent der Fundorte – und ebenfalls über den gesamten Zeitraum. Die überwiegende Mehrzahl der verbleibenden Zeichen konnten die Forscher in rund 20 Prozent der französischen Höhlen nachweisen. Ausnahmen bilden die Symbole für Herz, Nieren, Leiter und Spirale, die lediglich in jeweils wenigen Höhlen vorkamen. »Die Spirale sahen wir nur in zwei der 146 untersuchten Höhlen. Das hat mich sehr erstaunt, da sie in vielen späteren Kulturen recht häufig gebraucht wurden«, sagt von Petzinger.

Keine Kultur im vereisten Nordfrankreich

Ursprungsorte dieser Zeichen waren offenbar das Rhonetal, die Dordogne sowie die südliche Region Lot zwischen den heutigen Städten Bordeaux und Toulouse. Von hier aus verbreiteten sie sich über das gesamte heutige französische Territorium. Zu den Ausnahmen zählt das Zickzackzeichen, das zuerst in der Provence auftauchte – und das auch erst relativ spät, nämlich vor rund 20 000 Jahren. Aus Nordfrankreich stammt indes offenbar kein einziges dieser frühen Zeichen. »Der Norden war über lange Zeiträume unbewohnbar, weil dort während der letzten Eiszeit Eispanzer entstanden und vergingen. Daher gab es in dieser Region geringere Möglichkeiten für die unabhängige Entwicklung einer weiteren Kultur«, erläutert von Petzinger.

Zwar mag die Eiszeit die kulturelle Revolution im Norden behindert haben, aber anderswo förderte sie deren Entwick-





PUBLIC DOMAIN

Unter den zahlreichen abstrakten Symbolen, wie hier in der Tropfsteinhöhle von Pech Merle in Südfrankreich, nicht weit von Toulouse, taucht auch die so genannte negative Hand auf. Forscher fanden die 15 000 bis 30 000 Jahre alten Zeichen in 15 Prozent aller Höhlen.

lung. »Die Leute wurden ja gezwungen, nach Süden zu ziehen. Sie versammelten sich am Höhepunkt der letzten Eiszeit, also vor 18 000 bis 21 000 Jahren, in bestimmten Refugien – und um diese Zeit gab es bei den Felsmalereien einen starken Schub«, erklärt Nowell. »Möglicherweise nutzten sie die Zeichen dafür, ihr jeweiliges Territorium zu markieren.«

Die langen Winter in den Höhlen könnten die Menschen zu ihren wundervollen Felsmalereien inspiriert haben. Doch spricht einiges dafür, dass die Zeichen noch viel älter sind: Laut Genevieve von Petzingers Ergebnissen tauchten drei Viertel der Symbole bereits in den allerersten Stätten auf und müssen somit vor mehr als 30 000 Jahren entstanden sein.

»Diese Entdeckung hat mich wirklich überrascht«, sagt von Petzinger. Wenn sich die kreative Explosion vor 30 000 bis 40 000 Jahren zugetragen hätte, so hätte man nach ihrer Erwartung in dieser frühen Phase Hinweise darauf entde-

cken müssen, dass Symbole erfunden und verworfen wurden, wobei bis zur Entstehung eines verständlichen Zeichensystems trotzdem noch viel Zeit verstrichen wäre. Stattdessen sieht es jedoch so aus, als wäre der Zeichenkode vor rund 30 000 Jahren bereits weit gehend etabliert gewesen!

»Wir müssen daher unsere Vorstellungen über die prähistorischen Menschen überdenken«, meint die Paläontologin. »Die unglaubliche Vielfalt und der durchgängige Gebrauch der Zeichen legen nahe, dass die symbolische Revolution schon vor der Ankunft der ersten modernen Menschen in Europa begonnen hatte.« Sollte die Forscherin Recht behalten, müsste der Beginn der kreativen Explosion um zehntausende Jahre vorverlegt werden.

Kamen die Symbole aus Afrika?

Diese These würde auch zu einigen erstaunlichen Funden in Afrika und im Mittleren Osten aus den letzten Jahren passen. So entdeckten Archäologen in der Blombos-Höhle am Kap in Südafrika kürzlich mindestens 75 000 Jahre alte Hämatitstücke (ein Eisenoxid, aus dem rote Farbe gewonnen wurde), in die abstrakte Muster eingraviert waren. Und in der israelischen Felsenhöhle Shkul, 20 Kilometer südlich von Haifa, stießen Ausgräber auf Muschelperlen, die manche Forscher als persönliche Verzierungen interpretieren – und somit als Beleg für eine Symbolkultur vor bereits 100 000 Jahren. Weitere Hinweise könnten aus anderen Höhlen in aller Welt kommen.

In der Tat legt ein Blick auf bereits vorliegende Funde nahe, dass viele der Symbole von Petzingers auch an anderen Stätten auftauchen. So lässt sich etwa das Zeichen »offener Winkel« auch in den Gravierungen der Blombos-Höhle finden. Erlaubt das den Schluss, dass die Symbole sich mit den prähis-



CORBIS / ROBERT HARDING

Aus der Höhle von Lascaux stammt diese Felszeichnung eines Wildpferds. Auffällig sind hier die Symbole direkt oberhalb und rechts des Tiers.

Gekritzelt oder Botschaft eines Steinzeit-Picassos?

Malten unsere Vorfahren ihre prächtigen Kunstwerke mit der Absicht, dass andere sie sehen, oder geschah es nur zur eigenen Erbauung?

Die Höhle von Lascaux in der französischen Dordogne liefert darauf womöglich eine Antwort. Dort sieht man oben an einer der Felswände das Bild einer roten Kuh mit schwarzem Kopf. Betrachtet man das Tier in Augenhöhe aus der Nähe, dann wirkt es von Kopf bis Fuß gestreckt.

Doch vom Boden aus gesehen wirkt die Kuh normal proportioniert. Diese Darstellungstechnik, Anamorphose (Umfor-

mung) genannt, ist in dem Höhlengemälde bereits sehr weit entwickelt – und legt nahe, dass der Maler spätere Betrachter berücksichtigte.

Die Archäologin Suzanne Villeneuve von der kanadischen University of British Columbia konnte zeigen, dass die kunstvoll gemalten Bilder oft an Stellen zu finden sind, wo sie von vielen Leuten gesehen werden konnten. Weniger spektakuläre Bilder fanden sich eher an abseitigen Orten. Vielleicht war es ja nur den steinzeitlichen Picassos erlaubt, die gut exponierten Flächen zu bemalen.

torischen Stämmen verbreiteten, als diese Afrika verließen? Das vertreten zumindest von Petzinger und Nowell. Tilman Lenssen-Erz widerspricht allerdings vehement: »Die in französischen Höhlen gefundenen Zeichen sind viel älter als die in Afrika: Sie stammen aus der Eiszeit, die in der Sahara sind nacheiszeitlich datiert.« Und Iain Davidson, der 18 jener Symbole in Australien entdeckt hat, bezweifelt sogar ihren gemeinsamen Ursprung – und bleibt dabei, dass die kreative Explosion in den unterschiedlichen Weltregionen jeweils unabhängig voneinander vor rund 40 000 Jahren einsetzte.

Geheimnisvolle Bedeutung

Jean Clottes glaubt jedoch, dass von Petzinger und Nowell auf der richtigen Spur sind: »Sprache und abstraktes Denken waren vermutlich schon viel früher als vor 35 000 Jahren gebräuchlich, weil der moderne Mensch bereits vor rund 200 000 Jahren entstand. Wir sollten von der Vorstellung, dass damalige Menschen denken konnten, nicht allzu überrascht sein – sie waren schließlich unsere Ururgroßeltern«, sagt der Paläontologe. Wenn die Menschen tatsächlich damals schon eine Symbolkultur hatten, warum finden wir dann aus der Zeit vor 40 000 Jahren vor unserer Zeitrechnung nicht viel mehr Belege dafür? »Vielleicht wurden Symbole anfangs in vergängliche Dinge wie Holz oder Häute eingraviert, die später verrottet und zerfallen sind«, mutmaßt von Petzinger. Selbst wenn unsere Vorfahren damals bereits auf Höhlenwände gemalt haben, könnte der felsige Untergrund seitdem erodiert sein.

Wann immer die Symbole aufkamen: Die Einführung symbolischer Repräsentation stellte einen Wendepunkt für diese Kulturen dar. Schließlich war es die erste Gelegenheit, um Informationen permanent zu speichern. »Symbole erlaubten den Menschen, über ihre individuelle Lebenszeit hinaus Wissen auszutauschen – ein Meilenstein«, so Nowell.

Eine große Frage bleibt indes offen: Was bedeuteten die Symbole denn nun eigentlich? Ohne einen Rosettastein als Übersetzungshilfe kann man über ihren Sinn nur spekulieren. Jean Clottes ist immerhin davon überzeugt, dass es sich um mehr handelt als alltägliche Notizen – ja dass die Zeichen

eine spirituelle Bedeutung haben könnten. »Sie waren womöglich ein Weg, um mit übernatürlichen Kräften in Kontakt zu treten. Vielleicht gab es spezielle Symbole für besondere Zeremonien, oder sie standen in Zusammenhang mit mythischen Erzählungen«, vermutet der Forscher.

Ein faszinierender Aspekt an dieser Entwicklung ist ihr möglicher Gebrauch zur Täuschung. »Sobald symbolische Äußerungen verstanden werden, wird die Kommunikation flexibler«, meint Iain Davidson. »Ein Ergebnis ist, dass Mehrdeutigkeit auch zum Verbergen der Wahrheit verwendet wird.« Doch ohne einen Schlüssel zur Interpretation der Symbole können wir nicht wissen, ob die damaligen Menschen rivalisierende Stämme mit falschen Anweisungen täuschen oder einfach nur mit ihren Jagdkünsten prahlen wollten. Die Geheimnisse unserer Altvordern bleiben somit im Dunkeln – bislang zumindest. ~

DIE AUTORIN



Kate Ravilious arbeitet als freie Wissenschaftsjournalistin in der britischen Stadt York. Sie hat Geologie studiert und schreibt heute hauptsächlich über Archäologie-, Physik- und Umweltthemen.

© NEW SCIENTIST 2010

QUELLEN

- Balter, M.:** Early Start for Human Art? Ochre May Revise Timeline. In: Science 323, S. 569, 2009
- Marean, C. W.:** Als die Menschen fast ausstarben. In: Spektrum der Wissenschaft 12/2010, S. 58–65
- Vanhaeren, M. et al.:** Middle Paleolithic Shell Beads in Israel and Algeria. In: Science 312, S. 1785–1788, 2006
- Mensch – Mammut – Eiszeit** Spektrum-Spezial 1/2006

WEBLINK

www.bradshawfoundation.com/clottes/
Jean Clottes' Analysen paläolithischer Höhlenmalereien

Werte in der Wissenschaft

Wissenschaft soll objektiv und frei von subjektiven Werten sein. Tatsächlich bewegt sich aber alle Forschung im Spannungsfeld zahlreicher Werte. Doch die Beeinflussung muss den Erkenntnisprozess keineswegs stören!

Von Martin Carrier

Im Jahr 1904 formulierte Max Weber (1864–1920) seine These von der Wertfreiheit der Wissenschaft. Damit meinte der berühmte Soziologe: Keine Erfahrungswissenschaft kann Wertvorgaben oder Normen bindend festlegen. Zwar sei die Wissenschaft in der Lage, Folgen und Nebenwirkungen bestimmter Werthaltungen zu ermitteln, aber selbst könne sie keine Wertmaßstäbe setzen.

Webers These ist in der Folge oft so verstanden worden, dass naturwissenschaftliche Erkenntnis nichts mit Werten zu schaffen habe und dass Werte im Labor nichts zu suchen hätten. Dahinter steht wiederum die Vorstellung, dass Wissenschaft allein der Aufdeckung von Sachzusammenhängen

diene, wie sie unabhängig etwa von menschlichen Wünschen oder Befürchtungen bestünden. Dagegen liege Werten stets eine subjektive Einschätzung zu Grunde. Die Anerkennung eines Zusammenhangs zwischen Wissenschaft und Werten gefährde daher die Objektivität der Wissenschaft. Ich möchte hier deutlich machen, dass trotz der Berechtigung von Webers These Werte in der Wissenschaft eine wichtige Rolle spielen – ja oft sogar eine konstruktive.

In meinen Augen geht es um vier Arten von Werten:

► *Epistemische* oder *kognitive Werte* sind erkenntnisbezogen. Sie präzisieren den Erkenntnisanspruch der Wissenschaft oder die Natur wissenschaftlichen Wissens (im Gegensatz etwa zum Alltagswissen). Zum Beispiel strebt Wissenschaft nach Theorien hoher Erklärungskraft.

► *Ethische Werte* betreffen die Freiheits- und Schutzansprüche von Personen. Zum Beispiel werden Experimente ausgeschlossen, die die Rechte von Menschen oder Tieren verletzen. Ebenso sollen Wissenschaftler für negative Folgen wissenschaftlicher Neuerungen Verantwortung übernehmen.

► *Utilitäre Werte* heben den praktischen Nutzen wissenschaftlichen Wissens hervor, etwa für die Entwicklung der Volkswirtschaft.

► *Soziale Werte* betreffen die Ansprüche gesellschaftlicher Gruppen auf Mitwirkung und Teilhabe – beispielsweise bezüglich der Frage, wie das durch die Wissenschaft entstehende »System des Wissens« sie darstellt.

AUF EINEN BLICK

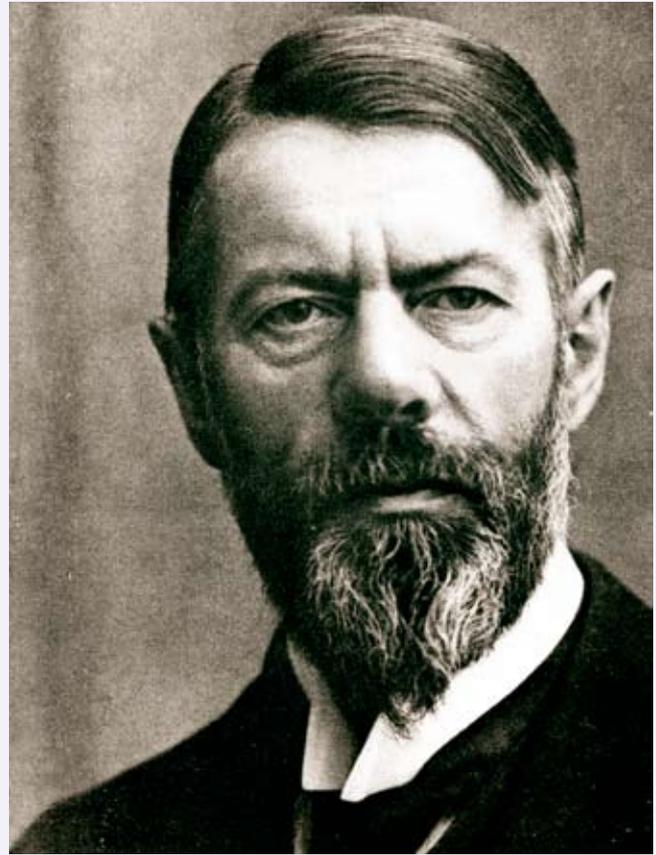
UNTERSCHÄTZTE PRÄGUNG

1 Keine Erfahrungswissenschaft kann Wertvorgaben oder Normen bindend festlegen – so postulierte es der Soziologe Max Weber vor mehr als 100 Jahren. Zwar sei die Wissenschaft in der Lage, Folgen und Nebenwirkungen bestimmter Werthaltungen zu ermitteln. Sie könne aber nicht selbst Wertmaßstäbe setzen.

2 Trotz der Berechtigung von Webers These spielen Werte in der Wissenschaft eine wichtige und oft sogar konstruktive Rolle.

3 Dabei stehen epistemische, ethische, utilitäre und soziale Werte oft in einem Spannungsverhältnis zueinander.

Vor über einem Jahrhundert forderte der Soziologe Max Weber die »Objektivität sozialwissenschaftlicher und sozialpolitischer Erkenntnis« – ein Prinzip, das die Wissenschaft in dieser reinen Form jedoch nicht umsetzte.



Ich will mich im Folgenden beim Einfluss von Werten darauf beschränken, was konkret in das System des Wissens Eingang findet. Dabei sind vor allem zwei Gebiete betroffen: *Forschungsvorhaben* und *Prüfverfahren*. Der Reihe nach:

Forschungsvorhaben. Hier wird oft die Suche nach Wahrheit als das originäre Erkenntnisinteresse der Wissenschaft genannt. Das ist zwar nicht falsch, aber doch ungenau. Es gibt beliebige Mengen unwichtiger Wahrheiten, beispielsweise über die Zahl der Sandkörner am Ozean. Diese sind zu Recht nie Gegenstand der Forschung geworden. Wissenschaft sucht nicht einfach nach Wahrheit, sondern nach *signifikanter* oder *relevanter* Wahrheit. Solche Urteile über Signifikanz oder Relevanz werden anhand von Werten getroffen. Epistemische Werte verdeutlichen den Erkenntnisanspruch der Wissenschaft. So suchen Forscher etwa nach Theorien von hoher Erklärungskraft, bei denen wenige Prinzipien einer Vielzahl von Phänomenen Rechnung tragen.

Forschung als Investition in die Zukunft

Ebenso zielen sie auf Vereinheitlichung, also die Verknüpfung scheinbar getrennter Erfahrungsbereiche. In der Grundlagenforschung ist auch die Wahl von Forschungsgegenständen von epistemischen Werten geleitet. Zum Beispiel wird vor diesem Hintergrund die Teilchenphysik als ein universelles, viele Erfahrungsbereiche vereinheitlichendes Forschungsfeld gerechtfertigt.

Neben den epistemischen Werten prägen auch *utilitäre Werte* die Themen der Forschung. Der lebenspraktische Bedarf beeinflusst dabei, welche Probleme Wissenschaftler bevorzugt angehen. Dadurch treiben sie in vielen Fällen den technologischen Wandel an, der die volkswirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit absichert. Wissenschaft wird ja nicht zuletzt deswegen gefördert, weil wir sie als Infrastrukturinvestition betrachten, die sich zum Beispiel in Form von Arbeitsplätzen auszahlen soll.

Entsprechend konzentrieren sich Forscher unter dem Einfluss von Wirtschaft und Politik auf Gebiete, die solchen praktischen Nutzen versprechen. Beispiele liefern die Nano- und die Biotechnologie oder die Erforschung der künstlichen Intelligenz sowie der Robotik. Es ist umstritten, in welchem Ausmaß sich eine von utilitären Werten geprägte Auswahl von Forschungsthemen erfolgreich realisieren lässt. Die herkömmliche, vor allem nach dem Zweiten Weltkrieg populäre Vorstellung lautet, dass eine Forschung, die ihre Themen vorwiegend am praktischen Bedarf orientiert, erfolglos bleibe.

Epistemisch orientierte Forscher gehen stattdessen in der Regel wissensgetrieben vor: Sie stellen sich Aufgaben, die sie faszinieren und von denen sie annehmen, dass sie auch zu bewältigen sind. So entwickeln diese Wissenschaftler ihre Theorien durch den Übergang vom Einfachen zum Komplizierten. Anfangs führen sie bestimmte Idealisierungen oder Vereinfachungen ein, die sie mit wachsendem Bearbeitungs-

fortschritt wieder fallen lassen können. Forschungsprobleme stellen sich vor dem Hintergrund bereits gelöster Rätsel und nach Maßgabe der Chancen ihrer Bearbeitung. Bedarfsgetriebene Forschung geht hingegen Fragen nach, die aus Gründen für dringlich gehalten werden, die außerhalb der Wissenschaft liegen. Solche lebenspraktisch bedeutsamen Themen könnten jedoch zu komplex sein, um zu diesem Zeitpunkt wissenschaftlich angemessen behandelt werden zu können, oder zu sehr von künftigen Fortschritten auf anderen Wissensgebieten abhängen. Beispiele sind Krebstherapie und Genetik, auf die ich weiter unten eingehe.

Gemäß dieser traditionellen Argumentation ist die Wissenschaft oft überfordert, wenn sie plötzlich schnelle Lösungen für dringliche praktische Probleme präsentieren soll. Statt bedarfsgetriebener Forschung sei zunächst breite Grundlagenforschung erforderlich, heißt es dann meist. Nur sie könne am Ende die Basis dafür bereitstellen, auch praktische Fragen erfolgreich zu bearbeiten. Wissenschaft könne eben nicht für alle Probleme Lösungen anbieten, sondern müsse sich auf die von ihr tatsächlich beherrschten Bereiche beschränken. Utilitären Werten sei am besten gedient, wenn man sich auf die wissensgetriebene Grundlagenforschung verlasse.

Inwieweit dieser Denkansatz zutrifft, diskutieren Wissenschaftsphilosophen heute kritisch. Zwar gibt es durchaus Beispiele für die behauptete Überforderung der Forschung durch Probleme mit praktischer Bedeutung. So scheiterte zum Beispiel der von Präsident Nixon 1971 erklärte »War on Cancer«, das amerikanische konzertierte Programm zur Krebsbekämpfung. Prävention und Therapie von Krebs sollten damals mit einer detailliert ausgearbeiteten Abfolge von Forschungsprojekten umfassend in Angriff genommen werden. Dieses Vorhaben blieb jedoch ohne die angestrebten therapeutischen Erfolge. Im Rückblick wird deutlich, dass das dafür erforderliche Grundlagenwissen seinerzeit noch gar nicht zur Verfügung stand, so dass sich die Forschung mit der Lösung dieser praktischen Probleme übernahm.

Akzeptable Hypothesen müssen mehr leisten, als mit den Tatsachen übereinzustimmen

Demgegenüber stehen Beispiele erfolgreich geplanter Forschung. Als das Humangenomprojekt in den frühen 1990er Jahren begann, ließ sich das menschliche Genom mit den verfügbaren Technologien noch gar nicht sequenzieren. Die Forscher gingen also bewusst das Risiko ein, auf entsprechende technologische Revolutionen bei den Analysegeräten setzen zu müssen – und diesmal behielten sie Recht! Hier ließ also fehlendes Wissen das Projekt nicht scheitern. Vielmehr bildete das ehrgeizige, ja anfangs fast utopische Ziel einen angemessenen Anreiz für die erfolgreiche Umsetzung.

Auch viele weitere Fälle innovativer Industrieforschung sprechen gegen die Annahme, dass Forschung, die sich gezielt auf praktische Herausforderungen richtet, immer fruchtlos bleiben müsse. Allerdings lässt sich bei einem gegebenen Fall im Vorfeld nur schwer prognostizieren, ob be-

darfsgetriebene Forschung Erfolg verspricht oder ob stattdessen eine vorgeschaltete wissensgetriebene Phase angemessener wäre. Klar ist, dass die Forscher vor Ort in beiden Fällen einen Rahmen für freies Gestalten besitzen müssen und dass eine kleinteilige Kontrolle durch das Projektmanagement neuartigen Einsichten und kreativen Lösungen eher den Weg versperrt. Gute Ergebnisse setzen fast immer voraus, dass Forscher hinreichend flexibel agieren dürfen, um auch unerwartete und unkonventionelle Optionen verfolgen zu können.

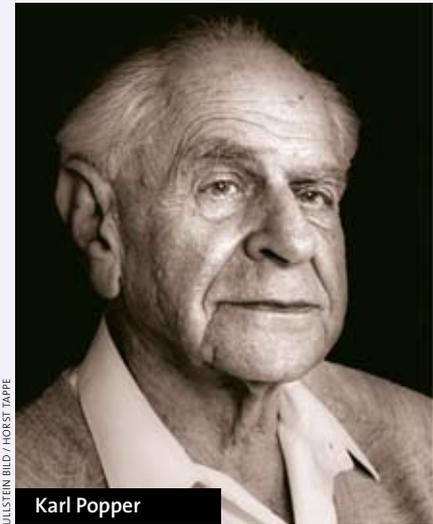
Nun zu den Prüfverfahren: Werte beeinflussen nicht nur die Auswahl von Forschungsproblemen, sondern auch die Prüfverfahren für Hypothesen. Natürlich geht es bei jeder solchen Untersuchung zunächst um die Übereinstimmung mit den Tatsachen. Aber diese ist weder notwendig noch hinreichend dafür, eine Hypothese zu akzeptieren. Passt die Behauptung nicht zu den Befunden, so wird die betreffende Hypothese keineswegs immer sogleich aufgegeben. Vielmehr suchen Forscher zunächst andere Erklärungen für die unerwartete Abweichung, etwa die Wirkung zusätzlicher Einflussfaktoren. Nicht selten werden solche Faktoren tatsächlich auch entdeckt, so dass die These zu Recht nicht gleich verworfen wurde.

Akzeptable Hypothesen müssen zudem über den Einklang mit der Erfahrung hinausgehen. Dabei handelt es sich gerade um die schon genannten epistemischen Werte. Ein Beispiel: Würde man zur Erklärung von zehn Phänomenen auch zehn separate Hypothesen benötigen, nämlich jeweils eine pro Phänomen, dann würden die Experten keine dieser Hypothesen für annehmbar halten. Stattdessen würden sie Hypothesen in Betracht ziehen, bei denen eine geringe Zahl ausreicht, eine Vielzahl unterschiedlicher Phänomene zu verstehen. Solche Hypothesen zeichnen sich also durch eine hohe Erklärungskraft aus.

Manche Wissenschaftler und Wissenschaftsphilosophen behaupten, dass epistemische Werte im Gegensatz zu utilitären Werten stehen würden. Im Besonderen sollen Einflüsse aus Politik und Wirtschaft dazu führen, dass sich Wissenschaftler durch Macht und Geld von ihrem Erkenntnisauftrag abbringen lassen. Solche Wissenschaft würde dadurch einseitig, oberflächlich und degenerierte in uninspirierte Routineprojekte.

Derartige Bedenken zielen auf die pragmatische Haltung nutzenorientierter Forschung. Diese würde gleichsam die epistemische Eindringtiefe verringern und die Fähigkeit der technischen Kontrolle dem Erkenntnisgewinn vorziehen. Der Vorwurf lautet also, dass utilitäre Werte epistemische Werte aus der Wissenschaft vertreiben.

Die Kritik kann sich durchaus auf Indizien stützen. Auf den zweiten Blick stellen sich diese jedoch als wenig beweiskräftig heraus. Ein Beispiel für die angeblich verringerte Eindringtiefe der Forschung liefert in der Genetik die Entdeckung von so genannten Trigger- oder Starter-Genen. Diese lösen Genkaskaden aus und eignen sich daher zur Steuerung der Genexpression. Ein Beispiel dafür ist das Gen *Eyeless*.



Wenn soziale Werte die Forschung beeinflussen, ist es nicht immer um deren Qualität geschehen. So schadete der kirchliche Druck Galileo Galilei zwar persönlich, seiner Forschung aber nur wenig.

Der Philosoph Francis Bacon forderte, alle subjektiven Perspektiven in der Forschung auszuschalten. Dagegen sah Karl Popper die Objektivität als Wettstreit kontrastierender Sichtweisen.

Dessen verschiedene Versionen setzen in einer Vielzahl von Spezies die Bildung von Augen in Gang.

Der springende Punkt dabei ist: Die technische Manipulation von *Eyeless* erlaubt es, die Entstehung der Augen zu steuern, ohne dass die zu Grunde liegenden Prozesse entschlüsselt und verstanden wären. Eingriffe können sich also dem Anschein nach auf solche Beziehungen stützen, ohne dass man unbedingt die dahinterstehenden Ursachenketten durchschaut haben muss. Deshalb vertraten Biotechnologen in den 1990er Jahren gerne die Ansicht, dass Biotechnologie und Biowissenschaft zu einem guten Teil voneinander unabhängig seien. Da sich mit Trigger-Genen Zellen mit spezifischen Eigenschaften erzeugen ließen, könne sich die Forschung auf diese genetischen Steuerungsprozesse beschränken. Ein breiterer Kontext, insbesondere jener der Wechselwirkung zwischen Genen und Proteinen, brauche aus technologischem Blickwinkel nicht einbezogen zu werden.

Soziale Werte bei der Deutung menschlicher Fossilien

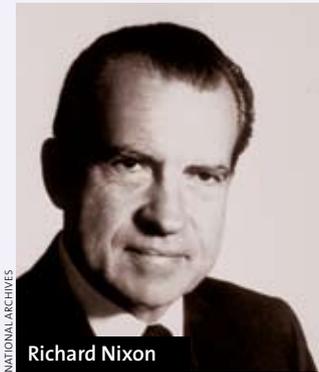
Tatsächlich führte die spätere Entwicklung aber gerade in die entgegengesetzte Richtung und hat die Autonomie der Genomik zu Gunsten ihrer Verknüpfung mit der Proteomik beseitigt. Die Genaktivität wird durch eine Vielzahl von Faktoren gesteuert, die, so zeigte sich rasch, für einen gezielten Eingriff durchaus bekannt und beherrscht sein müssen. Anders als *Eyeless* wirkt etwa das Gen *Distalless* je nach zellulärem Kontext ganz unterschiedlich. In Raupenembryos zum Beispiel löst seine Expression die Bildung von Extremitäten aus. In ausgewachsenen Schmetterlingen erzeugt es dagegen farbige Augenflecken auf den Flügeln. Offenbar ist die Einbettung einer Verallgemeinerung in den Kontext für einen verlässlichen Eingriff von entscheidender Bedeutung. Die

epistemische Eindringtiefe wird also durch utilitäre Werte nicht zwangsläufig beeinträchtigt.

Auch soziale Werte fließen in die Beurteilung wissenschaftlicher Hypothesen ein. Dies geschieht in der Regel nicht, wie man vermuten könnte, durch äußeren politischen Druck. Zwar gibt es Beispiele für äußere Eingriffe – der bekannteste ist sicherlich der Fall Galilei und sein Konflikt mit der Kirche. Aber die Wirksamkeit der Eingriffe bleibt beschränkt. Soziale Werte wirken stattdessen gleichsam von innen heraus und entfalten ihren Einfluss ganz ohne externen Zwang in den Köpfen der beteiligten Wissenschaftler.

Dies wird insbesondere dann spürbar, wenn starke gesellschaftliche Werthaltungen auf eine unklare Datenlage treffen. So versuchte die Hirnforschung des 19. Jahrhunderts, physiologische Eigenschaften wie Hirngewicht, Windungsreichtum oder Ausprägung des Stirnhirns mit individuellen und ethnischen Unterschieden von Intelligenz und Charakter zu verknüpfen. Nach heutigem Verständnis sind alle diese Faktoren viel zu grob, um etwas über psychologische Qualitäten auszusagen. Das hat aber Hirnforscher nicht daran gehindert, solche Zusammenhänge zu postulieren, welche überdies eindeutig die sozialen Wertungen der damaligen Epoche widerspiegeln. Kritik an diesen Behauptungen führte nur zu Umdeutungen des Denkansatzes, nicht zu seiner Aufgabe.

Ähnlich spiegeln sich in der Deutung prähistorischer menschlicher Fossilien die sozialen Werte der betreffenden Forscher wider. Frühere Interpretationen einschlägiger Funde gingen nicht selten vom Rollenmodell des Mannes aus, der auswärts dem Broterwerb nachgeht, während die Frau im Umkreis des Hauses Vorräte sammelt und die Familie versorgt. Als sich das Rollenmodell der Gegenwart zum erwerbstätigen Paar wandelte, traten plötzlich zuvor ignorierte Grab-



Richard Nixon

NATIONAL ARCHIVES



James Watson

COLD SPRING HARBOR LABORATORY

Nixons »War on Cancer« scheiterte, während das »Human Genome Project«, anfangs geleitet von James Watson, Erfolge feierte.

beigaben für Frauen in den Fokus der Forschung, die darauf verwiesen, dass auch sie an Jagd und Krieg teilnahmen.

Soziale Werte scheinen also das Denken der Forscher zu verzerren. Demnach wäre hier eine wertfreie Betrachtung einzufordern. Tatsächlich heißt es bei dem englischen Philosophen Francis Bacon (1561–1626), wissenschaftliche Objektivität verlange, alle rein subjektiven Perspektiven abzulegen und den Forschungsgegenstand uneingeschränkt zur Geltung zu bringen. Aber die Forschungspraxis verdeutlicht, dass es unrealistisch wäre, die Aufgabe aller Einseitigkeiten zu fordern. Deshalb hat der Wissenschaftstheoretiker Karl Popper (1902–1994) diesem ein anderes Verständnis von Objektivität entgegengesetzt, nämlich in Form einer wechselseitigen Kritik.

Die Kontrolle der Vorurteile

Methodologisch qualifizierte Forschung zeichnet sich laut Popper durch die Kontrolle von Vorurteilen aus. Konkurrenz mit anderen Ansätzen halte Irrtümer und Einseitigkeiten in Schach. Entsprechend beruhe die Objektivität der Wissenschaft gerade nicht auf der Objektivität der einzelnen Wissenschaftler. Es sei vielmehr der Wettstreit kontrastierender Sichtweisen, aus dem neue Erkenntnis gewonnen werde. Dieses pluralistische Verständnis Poppers vermeidet Bindungen und Interessen nicht, sondern balanciert sie im kritischen Diskurs durch entgegengesetzte Verpflichtungen und Interessen aus.

Noch einmal zu den Forschungsvorhaben. Mit dieser Sichtweise lassen sich auch die Auswirkungen utilitärer Werte auf die Wissenschaft neu betrachten. Wie schon beschrieben, liegen die Defizite anwendungsorientierter Forschung weniger bei den Verfahren der Hypothesenprüfung als bei der Auswahl von Forschungsproblemen. Wissenschaft mit einer bedarfsgetriebenen Forschungsagenda ist auf wirtschaftlichen Erfolg ausgerichtet. Sie wird daher oft auch als kommerzialisierte Forschung kritisiert. Allerdings bringt die Themenwahl anhand von utilitären Werten zunächst so etwas wie eine demokratische Perspektive ein. Denn nur solche

Neuerungen sind Gegenstand kommerziell getragener Forschung, von denen erwartet wird, dass sie von vielen gewollt werden. Andererseits entstehen Einseitigkeiten daraus, dass zwar alle Kunden Menschen sind, aber nicht alle Menschen auch Kunden. Zum Beispiel konzentrieren sich die großen Pharmafirmen zumeist auf die Therapie von Krankheiten, die in den reichen Ländern weit verbreitet sind, während Leiden der Dritten Welt weniger Beachtung finden.

Um solche Schiefen zu korrigieren, wird oft auf Grundlagenforschung gesetzt. Aber auch diese orientiert sich nicht am Gemeinwohl, sondern wählt ihre Themen wissensgetrieben. Wie also ist ein Ausgleich möglich? Dazu bedarf es meiner Meinung nach aus ethischer Perspektive einer Wissenschaft im öffentlichen Interesse, die sich bei der Auswahl von Forschungsvorhaben am Nutzen für die Betroffenen ausrichtet. Die Erforschung des Klimawandels ist ein Beispiel für ein solches Vorhaben von hoher Praxisrelevanz, das weder aus der Grundlagenforschung erwachsen ist noch von der Wirtschaft finanziert wurde.

Wissenschaftler können niemals alles untersuchen; Forschungsprobleme werden immer nach Maßgabe von Werten ausgewählt. Und natürlich kann nicht jedes Forschungsprojekt die Interessen aller Betroffenen gleichmäßig im Blick haben. Deshalb bedarf es aus ethischem Blickwinkel einer Korrektur von Einseitigkeiten der Forschungsagenda durch die Öffentlichkeit oder den Staat. Letztlich müssen wir selbst dafür sorgen, dass Wissenschaft zum Nutzen aller ihren Stellenwert behält oder zurückgewinnt. Beispiele bieten Bürgerkonferenzen, aber auch die Einflussnahme der Wähler auf ihre Regierungen. Bestimmte Formen der Verpflichtung der Wissenschaft auf soziale Werte sind daher durchaus angezeigt oder sogar überfällig. ~

DER AUTOR



Martin Carrier studierte Physik, Pädagogik sowie Philosophie an der Universität Münster und promovierte dort 1984 über Wissenschaftstheorie. 1989 habilitierte er sich an der Universität Konstanz über das Verhältnis von Theorie und Erfahrung in Raum-Zeit-Theorien. Seit 1998 ist er Professor für Philosophie mit Schwerpunkt Wissenschaftstheorie an der Universität Bielefeld.

QUELLEN

- Carrier, M.:** Wissenschaftstheorie: Zur Einführung. Junius, Hamburg, 2. Auflage 2008, Kapitel 6
- Carrier, M. et al. (Hg.):** The Challenge of the Social and the Pressure of Practice. Science and Values Revisited. University of Pittsburgh Press, Pittsburgh 2008

LITERATURTIPP

- Zecha, G. (Hg.):** Werte in den Wissenschaften: 100 Jahre nach Max Weber. Mohr Siebeck, Tübingen 2006
Sammelband mit einer grundlegenden Diskussion von Webers Konzept der Wertfreiheit der Wissenschaft

Nützliche Katastrophen

Immer wieder rasen im Karakorum und im Himalaja Millionen Tonnen von Gestein zu Tal, begraben Dörfer unter sich und stauen Flüsse auf. Doch erst seit Kurzem wissen Geologen, dass die gigantischen Bergstürze vielfach die Voraussetzung für eine Besiedlung der Hochtäler geschaffen haben.

Von Kenneth Hewitt

Mit ungeheuerem Getöse stürzt die Flanke eines Berges zu Tal. Im Nu zieht eine immense Gesteinslawine eine Schneise der Verwüstung durch die Landschaft. Mensch und Tier werden von den dahinrasenden Massen getötet, Dörfer und Straßen unter Schutt begraben. Stoppt der Bergsturz abrupt an einem natürlichen Hindernis, kann er ein ganzes Tal abriegeln. Dann stauen sich harmlose Wasserläufe zu Seen auf, die Ortschaften und Infrastruktur überfluten (siehe Kasten S. 77). Damit nicht genug: Bahnt sich der aufgestaute Fluss irgendwann wieder seinen Weg durch den Schutt und bricht der Damm, bedrohen die ablaufenden Wassermassen die flussabwärts gelegenen Siedlungen.

Man sollte meinen, solchen schwer wiegenden Naturereignissen sei nichts Gutes abzugewinnen. Geologen konzentrierten sich deshalb im Allgemeinen auch darauf, die Ursachen eines Bergsturzes besser zu verstehen, um gefährdete Lagen zu erkennen und Risiken besser einschätzen zu können. Doch mitunter haben diese Naturkatastrophen eine nützliche Seite: indem sie die Landschaft in einer Weise verändern, die Bergbewohnern neue Lebensräume erschließt.

AUF EINEN BLICK

BERGSTÜRZE EN MASSE

1 In den Hochgebirgen des Karakorum, des Hindukusch und des nordwestlichen Himalaja bilden der Indus und seine Zuflüsse enge Täler mit hoch aufragenden Felsflanken und starken Gefällen.

2 Vermutlich ausgelöst durch seltene, aber sehr starke Erdbeben erreichen Bergstürze unter diesen Bedingungen Massen von durchschnittlich 200 Millionen Tonnen, die kilometerweit talabwärts rasen können.

3 Solche Megabergstürze bedrohen Dörfer und Infrastruktur, füllten aber im Lauf der Jahrtausende immer wieder auch die Hochtäler auf und schufen so vielerorts die Grundlage für Besiedlung.

Besonders deutlich wird das im Gebiet des oberen Indus und seiner Zuflüsse, also in den Hochtälern des Karakorum, des Hindukusch und des nordwestlichen Himalaja (siehe Karte S. 74). In den letzten Jahren haben Wissenschaftler dort mehr als 340 große Bergstürze der Vergangenheit nachgewiesen. Fast alle ergossen sich einst über eisfreie Täler. Das heißt, sie gingen erst nach der letzten großen Vereisung (*last major glaciation*; LMG) nieder, vermutlich nach 12 500 bis 10 000 Jahren vor heute. Bei gut 40 Ereignissen ließ sich das Alter genauer eingrenzen: auf 2000 bis 8000 Jahre. Doch obwohl die meisten Bergstürze sich in prähistorischer Zeit ereigneten, prägen sie nach wie vor das Leben in der Region: Dörfer und Kleinstädte, Straßen und Flugfelder, Kulturstätten wie auch touristische Einrichtungen wurden auf Gesteinsmassen gebaut, die vor langer Zeit zu Tal gegangen sind.

Eine unwirtliche Welt

Tatsächlich wären viele Siedlungen und landwirtschaftliche Flächen ohne das Wirken dieser Naturgewalten gar nicht denkbar, denn das obere Indusbecken ist über weite Bereiche eine lebensfeindliche Welt. Zwei Drittel davon liegen mehr als 3500 Meter über dem Meeresspiegel und damit in einem Klima, das keine ständige Besiedlung erlaubt. Gletscher bedecken 20 000 Quadratkilometer, Permafrostböden nehmen noch mehr Fläche ein. Während in höheren Lagen reichlich Schnee fällt, liegen die Talböden im Regenschatten; deshalb sind diese Zonen trocken (aride) oder halbtrocken (semi-aride). Steile Felswände beherrschen das Gelände. Wo sich reißen Ströme tief in das Grundgestein eingeschnitten haben, kann das Leben kaum Fuß fassen.

Dass die Hochgebirgsregion dennoch bewohnt ist, verdankt sich den mächtigen Sedimenten, welche die engen Täler aufgefüllt haben. Wie sich diese Ablagerungspakete überhaupt bilden konnten, gehörte bislang zu den ungelösten Fragen der Geologie. Die entscheidende Rolle der Bergstürze erkannten Forscher erst vor Kurzem.



Mehr als 340 Bergstürze und Gesteinslawinen mit einem Volumen von durchschnittlich je 200 Millionen Kubikmeter Gestein haben Geologen im Hindukusch, im Karakorum und im nordwestlichen Himalaja nachgewiesen (siehe Karte auf der nächsten Seite). Auch wenn sie eine Gefahr für Gebirgssiedlungen darstellen, haben sie diese oft erst ermöglicht. Stauen Felsmassen etwa einen Fluss auf, bleibt fruchtbarer Seegrund als Ackerfläche in der sonst kargen Umgebung zurück. Das Foto oben zeigt das Dorf Hushe in Pakistan. Wie die Landschaft sonst aussehen würde, zeigt eine Schlucht am mittleren Indus (rechts): Der Fluss hat sich tief in das Gestein eingeschnitten, der Talboden ist schmal.

Im Karakorum sind solche massiven Felsabgänge meist eine Kombination großflächiger Rutschungen mit verheerenden Gesteinslawinen. Katastrophal sind diese Ereignisse, weil sie unvermittelt auftreten, enorme Ausmaße erreichen und sich mit hohen Geschwindigkeiten abwärtsbewegen. Denn in diesem zerklüfteten Gebirge stürzt abbrechendes Gestein von steilen Felswänden bis zu 2000 Meter in die Tiefe, die Lawinen donnern kilometerweit talabwärts. Das durchschnittliche Volumen der Sturzmassen ist mit etwa 200 Millionen Kubikmeter das 50- bis 60-Fache dessen, was beispielsweise in den Alpen oder in den Anden vorkommt – der jüngste Bergsturz in Europa ereignete sich 1991 im Schweizer Bergdorf Randa: 31 Millionen Kubikmeter Gestein gingen zu Tal. Zumindest 32 der erwähnten 340 Katastrophen zählten mit mehr als einem Kubikkilometer Gestein so-



BEIDE FOTOS: KENNETH HEWITT

gar zu den so genannten Megabergstürzen; die gewaltigsten darunter erreichten Volumina von über 40 Kubikkilometer.

Wenn dergleichen ins Rutschen kommen, verwandeln die dabei auftretenden Druckkräfte festes Grundgestein innerhalb von weniger als einer Minute zu Schutt, Sand und Staub. Im Nu wird aus der kompakten Felsmasse eine Gesteinslawine, die begleitet von immensen Staubwolken wie auf einem Schmierfilm mit mehr als 100 Kilometer pro Stunde (km/h) zu Tal fährt, mitunter sogar 250 km/h schnell. Sobald die Geschwindigkeit unter diese hohen Werte fällt, kommt die Lawine recht abrupt zum Stillstand. Nach oft nur zwei oder drei Minuten liegen weite Flächen unter Gesteinsbrocken und Staub begraben.

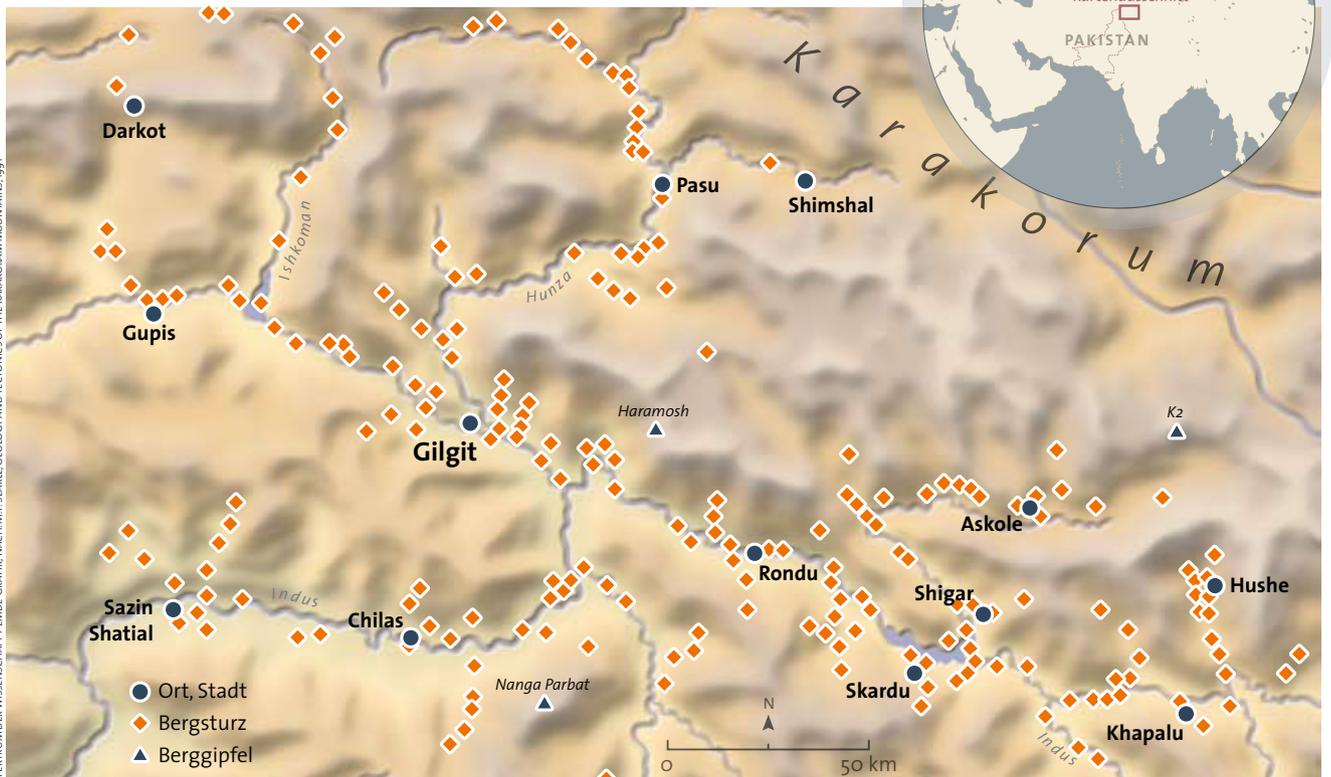
Große Vielfalt von Geländeformen

Die resultierende Oberfläche besteht meist aus großen Felsblöcken, darunter umgibt eine dichte Hülle aus zerstoßenem und pulverisiertem Gestein einen Kern aus größeren Fragmenten. Auf offenem und ebenem Talboden bildet der Schutt eine Schicht aus, die wenige Meter dick ist und in der Draufsicht gelappt wirkt. In stark zerklüftetem Gelände ist die Lage etwas komplizierter. Gesteinslawinen können beispielsweise an einer Talseite hinunterdonnern und an einer gegenüber-

liegenden Steilwand über 500 Meter hoch aufbränden. An Hindernissen stauen sie sich und bilden mächtige Sturzhalden. Wenn die Lawine durch enge Schluchten niedergeht, prallt sie an Kurven und Felsvorsprüngen ab, schwingt zwischen Talflanken hin und her, hebt und senkt sich. Wo Täler verzweigen, teilt sich der Schuttstrom; wo Seitentäler einmünden, kann er diese blockieren. Insgesamt resultiert daraus eine große Vielfalt an möglichen Geländeformen (siehe Grafik S. 76).

Nach menschlichen Zeitmaßstäben sind Bergstürze zwar seltene Ereignisse. Ihre Abrissnischen an Felswänden bleiben jedoch lange bestehen, und die abgelagerten Halden können die Landschaftsentwicklung über Jahrtausende hinweg beeinflussen. Das gilt insbesondere dann, wenn Gesteinslawinen Flusstäler blockieren. Reste von Seesedimenten an den Nebenflüssen des Indus zeugen davon, dass Dutzende von solchen durch Naturgewalten gebildeten Dämmen für Jahrzehnte oder Jahrhunderte Bestand hatten. Mehr als 100 sind sogar bis heute nur unvollständig durchbrochen. Denn beim abrupten Stillstand der Gesteinslawine wird das Material zusammengepresst und verdichtet, so dass es der Erosion widersteht. Die gleiche Wirkung hat es auch, wenn die Lawine so hoch auf einen Gegenhang auflief, dass sich die Barriere

Zwei Drittel des Gebiets, in dem der Autor und andere Geologen nach Formationen suchen, die von Bergstürzen verursacht wurden, liegen oberhalb von 3500 Metern und damit zu hoch für menschliche Siedlungen. Gletscher bedecken hier etwa 20 000 Quadratkilometer. Fast alle bewohnbaren Täler wurden und werden durch gewaltige Gesteinslawinen geprägt.



Hunderte von Metern aufwärts. Auch Schuttzungen, die weit die Täler hinauf- und hinabreichen, können solch eine Struktur stabilisieren.

Solange ein Damm nicht aufreißt, fängt er zunächst Sediment auf. Erst wenn es dem Wasser gelingt, eine Bresche zu schlagen, durchschneidet es die Ablagerungen und trägt wieder Material ab. Das klingt einfach, doch die Realität ist kompliziert. Bei Seesedimenten handelt es sich vorwiegend um dünne Schichten feinkörnigen Materials: Ton, Schluff und Sand, die in das Gewässer hineingespült wurden und sich dort langsam abgesetzt haben. Größeres Material hingegen lagert sich an den Flussufern ab. Hinter einem Bergsturzdamm aber entstehen komplex aufgebaute Gesteinsmassen, in denen unterschiedliche Materialien einander überlappen. Wo Nebenflüsse beim Eintritt ins Tal von Sturzmassen behindert werden, bilden sie zudem auf Grund der verringerten Fließgeschwindigkeit so genannte Schwemmfächer. Die größeren weisen Durchmesser von einigen Kilometern auf und bestehen in der Regel aus einem Gemisch von Fluss- und Bachsedimenten sowie von Schutt, also größerem Material; kleinere, steilere Schwemmfächer enthalten vorwiegend Letzteres.

In der Abtragsphase entwickeln sich die für Ansiedlung und Landwirtschaft so wichtigen Flussterrassen. In flussaufwärts abgelagerten Sedimenten bilden sich Stufen mit anderer Hangneigung und Breite als direkt am Bergsturz oder weiter flussabwärts. Aber auch erosionsbeständigere Gesteine in einer weicheren Umgebung können ein Grund dafür sein, dass sich Terrassen ausbilden. Zudem schneiden die nun nicht mehr blockierten Nebenflüsse Rinnen in die Schwemmfächer ein, während der Hauptfluss an ihrer Front nagt. Beim Durchqueren des Bergsturzdamms folgen die Flüsse nicht unbedingt ihrem ursprünglichen Verlauf, sondern verlegen ihr Bett häufig in anstehendes Gestein oder neue Talbodenabschnitte. Solche sekundären Einschnitte sind dort sogar der häufigste Schluchtentyp. All diese Mechanismen müssen Geologen berücksichtigen, um die durch Bergstürze entstandene Topografie von derjenigen zu unterscheiden, die auf klimatische und hydrologische Veränderungen oder auf tektonische Vorgänge zurückgeht.

Mythen und Legenden – Überlieferungen geologischen Wissens

An den untersuchten Flüssen im oberen Indusgebiet findet man durchschnittlich alle 12 bis 14 Kilometer eine Gesteinslawine, die das jeweilige Tal überquert hatte. Bergsturzdämme waren in allen Entwicklungsstadien anzutreffen – mit weit reichenden Konsequenzen: Intakte Dämme im Oberlauf verhindern beispielsweise eine Aufstauung von Sedimenten weiter flussabwärts. Die Strömung eines Flusses nimmt ab, wenn er einen See durchquert oder flachere, aufgeschüttete Bereiche oberhalb eines Damms passiert. Ihm fehlt dann die Kraft, an weiter flussabwärts gelegenen Dämmen zu nagen. Umgekehrt gelangen aus kollabierenden Barrieren große Sedimentmengen stromabwärts, die sich dort wieder ablagern können. Die vielen, einander überschnei-



Meist fließen der obere Indus sowie seine Zu- und Nebenflüsse nicht direkt im Grundgestein, sondern über mächtige, ausgedehnte Talfüllungen aus Sedimenten. Erst seit Kurzem ist klar, dass diese letztlich eine Folge gewaltiger Bergstürze sind. Das Foto zeigt das Skardu-Becken östlich des Nanga Parbat.

denden Abfolgen von Ablagerung und Abtragung prägen den Materialtransport des Indussystems.

Ich selbst befasse mich mit dem Thema, seit ich 1986 im Karakorum Augenzeuge eines Bergsturzes wurde. Dabei kenne ich die Region schon seit den 1960er Jahren durch meine Gletscherforschung. Eine Weile wohnte ich in einer Schäferhütte in dem Ort Kor-Kor-Tsok-Boo im Tal des Flusses Shigar. Dort fallen Geländerücken auf, die den Talboden queren. Sie sind von Felsblöcken bedeckt und werden deshalb von den Einheimischen lapidar als Ghoro Cho, als »Haufen großer Steine« bezeichnet (siehe Bild S. 77 oben). Eines Abends, nach dem gemeinsamen Mahl, entschloss sich Apo (Großvater) Haji Ali, mir deren »wahre« Geschichte zu erzählen. Wir saßen um das offene Feuer, die Tiere schliefen bereits in den Ställen, und mein Gastgeber begann seine Geschichte: »Vor langer Zeit befand sich dort, wo heute der Ghoro Cho liegt, eine große und wohlhabende Stadt. Ein reisender heiliger Mann kam dorthin und bat den Herrscher um Nahrung und Unterkunft. Doch er wurde abgewiesen, auch von anderen reichen Leuten. Schließlich gewährte ihm eine arme Frau ein Dach über dem Kopf und teilte ihr Essen mit ihm. Am nächsten Morgen hieß er sie, zu Quellen hoch über dem Talboden

hinaufzuklettern. Er selbst stieg auf der anderen Seite auf und schlug mit seinem Pilgerstab auf den Fels. Ein großer Teil des Berges brach ab und begrub die Stadt, ihren Reichtum und Stolz.«

Am nächsten Morgen begleitete mich der Geschichtenerzähler und zeigte mir die große Narbe in der Bergflanke, die der heilige Mann geschlagen habe. Ihr gegenüber lag das Dorf Mango mit seinen Quellen. Haji Alis Geschichte ähnelt vielen anderen Legenden des Karakorum und dürfte eher Mythos als Tatsachenbericht sein. Doch die Details sind bemerkenswert, denn sie verraten gutes »Stammeswissen« über die geologischen Vorgänge.

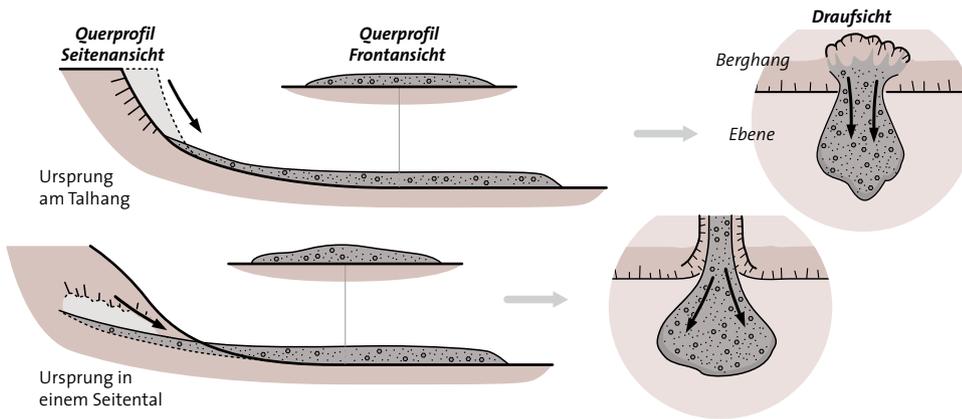
Forscher im Irrtum

Als ich die Narbe an der Bergflanke untersuchte, stellte sich heraus, dass dort das gleiche grüne, kristalline Gestein ansteht, aus dem auch die Felsblöcke des Ghorcho bestehen. Nur 100 Meter unterhalb von Mango entdeckte ich dieselben grünlichen Einlagerungen – den Rand des Bergsturzes.

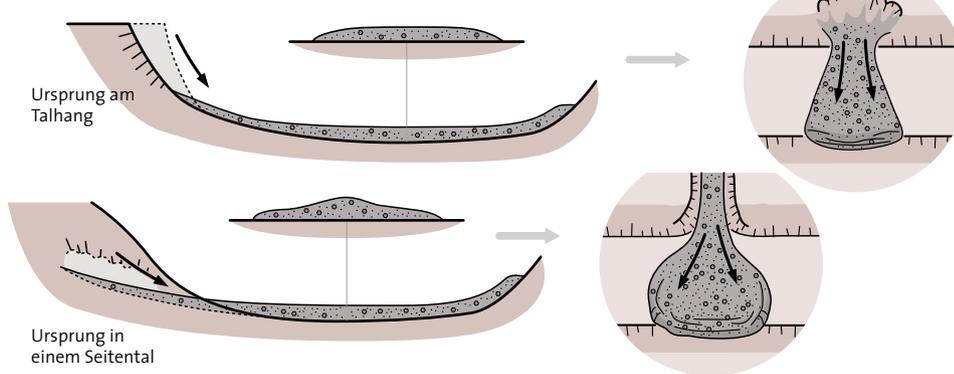
Der Ghorcho ist Forschern schon seit mehr als einem Jahrhundert bekannt, doch lang galt er als Moräne, als von Gletschern während der Eiszeit abgelagerter Schutt. Ich selbst war schon mehrmals dort gewesen und hatte zunächst keinen Grund gesehen, daran zu zweifeln. Doch bei den Felsblöcken und anderen sichtbaren Bruchstücken handelt es sich zweifellos um das Gestein des Gegenhangs. Wie umfangreiche Mineral- und Elementanalysen an Probenmaterial zeigten, ist sogar der feinste Staub identisch zusammengesetzt. Gletscher waren einst tatsächlich in das Tal geflossen, hatten aber recht unterschiedliche, variantenreiche Gesteinstypen transportiert – genau wie die heutigen Flüsse. Außerdem zeigen Bergsturstrümmer, egal ob klein oder groß, den verräterischen kantigen Charakter von zerbrochenem und gestauchtem Material. Moränen hingegen enthalten verschiedene Partikelformen, darunter Steine, die durch Schmelzwasserströme rund geschliffen wurden.

Zwar ist die Bestimmung der Gesteinstypen für den Geowissenschaftler Alltag, wie auch die der Partikelformen für

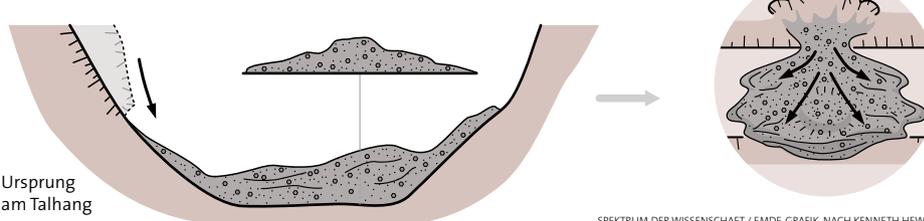
Einfacher (unbeschränkter) Auslauf



Geringes Aufbranden



Starkes Aufbranden



Die Strukturen, die sich durch Bergstürze ergeben, hängen zum einen ab von der Topografie des Geländes, von dem das Gestein abgebrochen ist, und zum anderen von der des Tals, in dem sie abfließen. Die Grafik zeigt einige Grundformen, doch in der Realität sind die Prozesse komplexer. So können die Felsmassen im Extremfall an Gegenhängen mehr als 500 Meter vertikal emporbranden oder auf ihrem Weg talabwärts an den Seitenwänden immer wieder abprallen.

SPKTRUM DER WISSENSCHAFT / EMDE-GRAFIK, NACH KENNETH HEWITT

Dämme aus Sturzmassen, die Flüsse blockierten, brechen manchmal ganz plötzlich auf. Häufig ist das Material aber sehr fest und wird nur nach und nach abgetragen. Dann entstehen Schwemmlandebenen, Terrassen und andere vom Wasser geschaffene Geländeformen, wie hier die Felsrücken des Ghoros Cho.



KENNETH HEWITT

Der Bergsturz von Attabad

Am 4. Januar 2010 riss ein Bergsturz Teile des Ortes Attabad im nordpakistanischen Hunzatal mit sich (oben links im Kreis). 17 Menschen wurden getötet, 26 Häuser zerstört. Die Sturzmassen stauten den Fluss Hunza. Am 7. Juli 2010, als dieses Bild vom NASA-Satelliten Earth Observing-1 aufgenommen wurde, war der Stausee bereits fast 22 Kilometer lang und etwa 115 Meter tief, hatte rund 250 Häuser sowie den Karakorum Highway (Bildmitte) überschwemmt und gut 25 000 Menschen von der Außenwelt abgeschnitten. Weil der Gesteinsdamm jederzeit brechen konnte, evakuierte die Regierung etwa 20 000 Be-

wohner von stromabwärts gelegenen Siedlungen (nicht im Bild). Ende Januar begann man, eine Abflussrinne durch den Damm zu graben, doch die Arbeiten gingen nur langsam voran. Zum Glück kollabierte der Damm nicht, als der See Ende Mai überlief; wenige Wochen später hatte sich der Wasserspiegel stabilisiert. Der Überlaufstrom ist innerhalb des Kreises als kurze, weiße Linie zu erkennen. Doch noch kann keine Entwarnung gegeben werden, und es ist bislang unklar, ob und wann die Bewohner in ihre Häuser zurückkehren können. Auch eine Verlegung des Karakorum Highway wird diskutiert.



NASA

Nahe dem Dorf Gol befand sich einst ein 500 Meter tiefer und mindestens 90 Kilometer langer, durch einen Bergsturz aufgestauter See. Die Bewohner kultivieren hier robuste Nutzpflanzen auf kleinen Flächen fruchtbaren ehemaligen Seebodens und nutzen die Schutthügel als Viehweide. 1996 begrub ein durch heftige Regenfälle ausgelöster neuerlicher Bergsturz viele der Felder wieder unter sich.



den Sedimentologen. Doch in diesem Fall hielt niemand derlei Untersuchungen für erforderlich. Die maßgeblichen Forschungsarbeiten aus der Zeit zwischen den 1850er und den 1980er Jahren interpretierten den Ghoru Cho als Glazialform, als charakteristischen Vertreter derselben drei oder vier eiszeitlichen Vergleitscherungen, die beispielsweise auch die Alpen betroffen hatten.

Der Ghoru Cho kann ein unfreundlicher Ort sein. Von Weitem wirkt er dunkel und abweisend. Großteils handelt es sich um Ödland, über das Tag für Tag Staubstürme hinwegfegen. Es liegt zu weit vom Wasser entfernt, um ackerbaulich genutzt zu werden, weshalb es vorwiegend als Weideland dient. Die Schäferfamilien wohnen mit ihrem Vieh in Höhlen unter den größten Felsblöcken. Viele Geschichten ranken sich um die diversen Geländestrukturen. Sie handeln von Wölfen, Bären und Tigern, die dort Schutz suchten, ranken sich um gefährliche Dschinns und Helden aus der Gesar-Sage, einem Epos über den Kampf des tibetischen Königs Gesar gegen das Böse in der Welt. (Das Shigar-Tal gehört zu Baltistan, das stark von der tibetischen Kultur geprägt wird.) In diesen Erzählungen verbirgt sich viel Erfahrungswissen, das beim alltäglichen Kampf um das Überleben hilft, aber auch ein Gefühl für die Geschichte der Region vermittelt.

Wie nachhaltig Megabergstürze die Lebensbedingungen eines Tals verändern können – auch zum Guten –, beweist der Ort Gol, eine grüne Oase zwischen nackten Felswänden. Der Schutt von gleich zwei solchen Ereignissen staut dort den Indus auf eine Länge von elf Kilometern. Auf dem größten Teil dieser Strecke entstand von Felsblöcken bedecktes Ödland. Ähnlich wie der Ghoru Cho wird es saisonal als Weideland und Jagdgebiet genutzt. Außerdem sammeln Schäfer dort ballenweise Beifuß (*Artemisia*) als Räuchermaterial.

Gol selbst liegt auf der Zunge einer Gesteinslawine, die fünf bis sechs Kilometer talaufwärts floss. Inmitten gewaltiger Blöcke stehen Häuser und Schulen, eine Moschee und eine Apotheke. Dazwischen liegt vielerorts fruchtbares Ackerland – es ist der ehemalige Boden des durch den Bergrutsch aufgestauten Sees. Einst war er mindestens 90 Kilometer lang und dort, wo sich heute das Dorf befindet, gut 500 Meter tief. Bauernhöfe und Felder verteilen sich auch auf Flussterrassen, die dokumentieren, auf welchen Wegen sich der Indus mit der Zeit wieder sein Bett gebahnt hat.

Eine Startbahn auf altem Seegrund

Die Einwohner von Gol kennen ebenfalls viele Geschichten aus alten Zeiten. Diese berichten von einem See und von Booten, die an Stellen vertäut waren, die weit oberhalb des heutigen Flusses liegen. Sie erzählen von einer Katastrophe, durch die der See entstand, und von einer Flut, die das Tal herabkam und den See wieder zerstörte. Auch diese Überlieferungen dürften kaum historische Abläufe wiedergeben. Vielmehr sind es Versuche, die topografischen Gegebenheiten zu verstehen. Schließlich fand der Bergsturz, auf dessen Schutt das Dorf steht, nach der Datierung meines Teams vor 4300 Jahren statt (± 170 Jahre), also lange bevor das Gebiet dauerhaft besiedelt wurde.

Wie Gol liegen auch viele weitere Orte in einem Gelände, dessen Topografie auf die beschriebenen geologischen Prozesse zurückzuführen ist. Die Häuser von Skardu und Khapalu, den Hauptorten der Region Baltistan im pakistanisch verwalteten Teil Kaschmirs, stehen auf einstigen Gesteinslawinen. In Skardu und Gilgit wurden die Flughäfen auf Terrassenniveaus angelegt, die letztlich durch Bergsturzdämme entstanden. Beim Rollen über die Startbahn von Skardu passiert



Der als UNESCO-Weltkulturerbe vorgeschlagene Palast Baltit thron auf dem Schutt eines Bergsturzes, der vor Jahrtausenden von steilen, etwa 2000 Meter höher gelegenen Berghängen niederging und 1,5 Kubikkilometer Gestein in Bewegung setzte. Obwohl die Region jeden Reisenden Gefahren aussetzt, führte hier schon vor mindestens 2000 Jahren der buddhistische Pilgerweg zwischen dem Indischen Subkontinent, China und Tibet entlang.

man Wände aus feinkörnigen, gelben Sedimenten – Ablagerungen eines ausgedehnten Sees, den ein Bergsturz aufgestaut hatte.

Wie stark solche Ereignisse das Leben im Karakorum beeinflusst haben, belegen auch die ältesten Zeugnisse menschlicher Anwesenheit: jahrtausendealte Felszeichnungen und Inschriften auf Blöcken, die Gesteinslawinen dort abgelagert haben, und auf Vorsprüngen, die von solchen Lawinen umgeleitete Flüsse einst abschliffen. Anscheinend sahen Reisende, die dem Lauf der Flüsse durch das Gebirge folgten, in diesen Orten heilige Plätze. Die größte Ansammlung von Petroglyphen, die wohl bis zu 5000 Jahre alt sind, findet sich am Indus zwischen der Rakhiot-Brücke und Shatial, unterhalb des Nanga Parbat. Vielleicht flößte die Landschaft mit dem alles überragenden Achttausender den Menschen einst besondere Ehrfurcht ein. Leider drohen viele der einmaligen Zeugnisse der Geschichte heute einem geplanten Stausee zum Opfer zu fallen.

Auch aus jüngerer Zeit gibt es solche Zeichnungen, die in den so genannten Wüstenlack, eine Oxidschicht auf der glatten Felsoberfläche, eingeritzt worden sind. Denn vom 1. bis zum 10. Jahrhundert n. Chr. folgten buddhistische Pilger auf ihrem Weg zwischen dem Indischen Subkontinent und China oder Tibet den Tälern des Indusystems im Karakorum. Sie markierten den Weg mit Bildern des Buddhas und Darstellungen von Stupas (buddhistischen Reliquienscheinen), mit Fingerabdrücken und Inschriften.

Eine berühmte Fundstätte ist der Haldikish, auch als Heiliger Fels von Hunza bekannt (siehe Bild S. 80 oben). Er ist von vor- und nachbuddhistischen Petroglyphen bedeckt, die eine Zeitspanne von mehreren tausend Jahren abdecken. Einst gingen dort 1,5 Kubikkilometer Gestein von den Wän-

den des Ultar-Gletschers nieder. Als der Fluss Hunza durch die Blockade auf einen Felsvorsprung umgelenkt wurde, schnitt er eine Klamm ein und hinterließ in der Talmitte zwischen dem neuen und dem ursprünglichen Flussbett einen Sporn – besagten Heiligen Fels. Etwa 500 Meter weiter hangaufwärts bilden die Sturzmassen das Fundament für den Palast Baltit, der vermutlich über 700 Jahre alt ist und 2004 von der UNESCO eine Auszeichnung für die erfolgreich durchgeführte Restaurierung erhielt (siehe Bild oben).

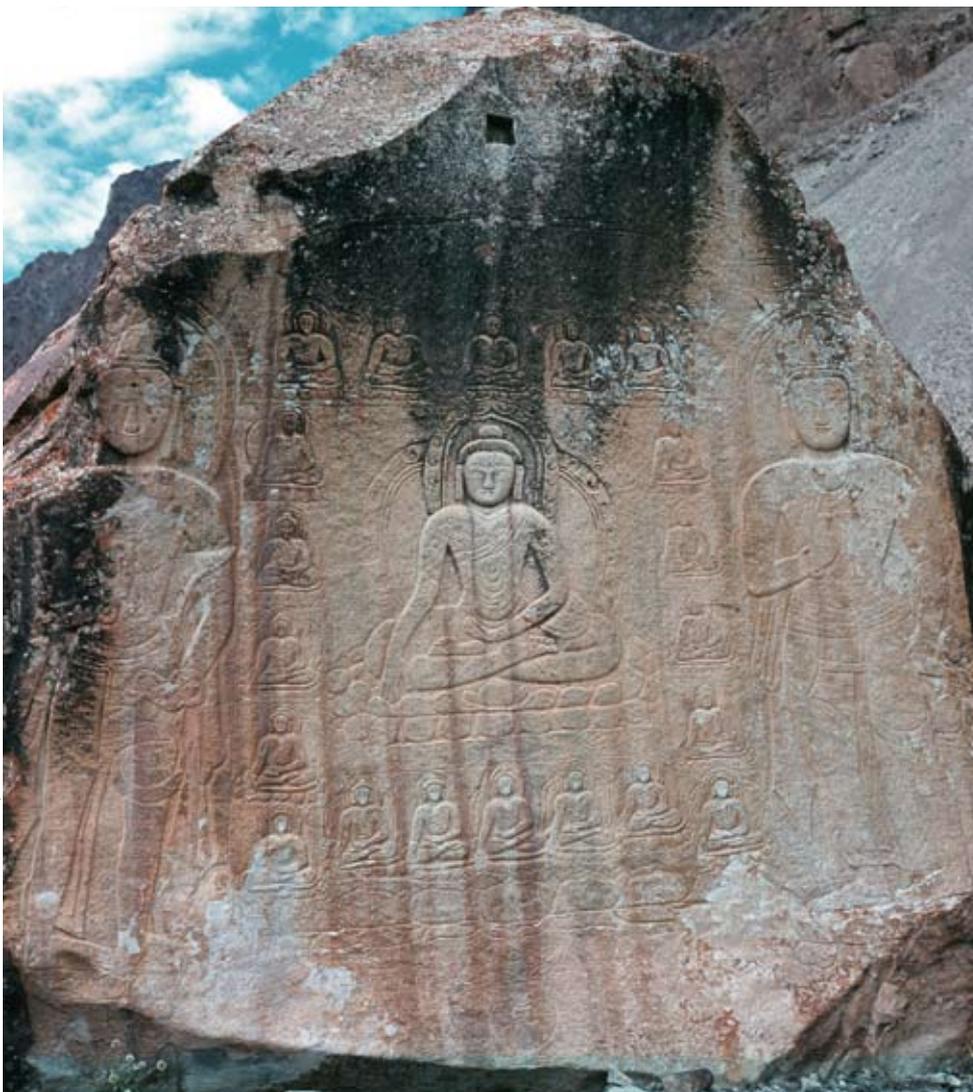
Heute erreicht man den Haldikish auf dem Karakorum Highway. Diese Fernstraße von Pakistan nach China folgt Schluchten in den Bergketten des Nanga Parbat und des Karakorum. Das Straßenbett liegt auf Terrassen und Schuttfächern, die ihre Entstehung Bergsturzdämmen verdanken. Brücken überqueren die Täler an Engstellen, die im Zuge der beschriebenen geologischen Prozesse entstanden. Auf den 275 Kilometern zwischen Sazin und Sost überquert der Karakorum Highway mehr als 40 gewaltige Bergstürze.

Schwer abzuschätzende Risiken

Freilich darf man bei all diesen positiven Aspekten die Gefahren nicht übersehen. Die schlimmsten historischen Überschwemmungen am oberen Indus wurden 1841 und 1858 durch Bergrutschdämme hervorgerufen. Das aus den aufgestauten Seen überlaufende Wasser überflutete Siedlungen und unterbrach Kommunikationsleitungen, so wie erneut 2010 oberhalb von Attabad geschehen (siehe Kasten S. 77). Auch während sich Sediment hinter den Dämmen abgelagert, gibt es Risiken: Schuttströme, Regengüsse und das Schmelzwasser der Gletscher suchen sich nun andere Wege. Selbst das Material alter Gesteinslawinen kann durch Starkregen oder Schlammfluten erneut in Bewegung geraten, wie 1996



Der Felsen Haldikish im Hunzatal (Bildmitte) gilt Einheimischen seit Jahrtausenden als heilige Stätte, wie Petroglyphen auch aus vorbuddhistischer Zeit dokumentieren. Er entstand, als ein Bergsturz den Fluss Hunza in ein neues Bett lenkte. Dieser schnitt im Lauf der Zeit das Tal aus dem Gebirge; der Heilige Felsen widerstand der Erosion.



In den Fels geritzte Buddhafiguren samt Inschriften sind weit verbreitet in den Tälern des Indus und seiner Nebenflüsse, durch die der Pilgerweg durch den Karakorum verlief. Einige dürften 5000 Jahre alt sein. Bei den hier gezeigten Beispielen handelt es sich wahrscheinlich um die bekanntesten. Sie wurden in einen Felsblock graviert, den ein Bergsturz südlich von Skardu herangebracht hatte.

BIBLIOTHEK DER WISSENSCHAFTEN, FELSILDKUNST



Wenn durch Bergstürze aufgestaute Seen allmählich austrockneten, blieben oft Terrassen zurück. Dank der fruchtbaren Sedimente lassen sich dort Feldfrüchte anbauen, wie am Fluss Braldu im Norden von Pakistan. Oft sind dies sogar die einzigen geeigneten Flächen in den kargen Hochgebirgstälern.

in Gol geschehen. Dort wurden Felder unter Schutt begraben, Felsblöcke rissen Häuser nieder.

Den Menschen des Karakorum sind diese Gefahren bekannt. Sie wählen daher Bauplätze sorgfältig aus und beobachten kritische Felspartien, um sich vor Felsabbrüchen und Muren zu schützen. Gegen die beschriebenen Bergstürze helfen solche Vorsichtsmaßnahmen freilich nur bedingt, denn es handelt sich hierbei um Vorgänge ganz anderer Größenordnung. Umso dringlicher ist es, ihre Ursachen zu kennen.

So lassen sich die Megabergstürze im Karakorum keinesfalls allein mit stürmischem Wetter erklären. Höchstwahrscheinlich waren oft seismische Kräfte am Werk. Die Bergstürze von 1841 wurden nachweislich durch ein Erdbeben ausgelöst. Instabilitäten, die zu dem Ereignis von 2010 führten, können auf ein Erdbeben von 2002 zurückgeführt werden. Diese wie auch die Katastrophe von 1858 zählen allerdings zu den kleineren Gesteinslawinen, obwohl sie durchaus beträchtliche Zerstörungen anrichteten, unter anderem deshalb, weil ihre Dämme so rasch nachgaben. Viele prähistorische Lawinen aber waren noch um ein bis drei Größenordnungen gewaltiger. Dementsprechend bedurfte es auch heftigerer Erdbeben als Auslöser.

Warten auf das nächste Beben

Seltsamerweise herrscht jedoch im Karakorum derzeit seismische Ruhe. Messinstrumente verzeichnen für das Skardu- und das Shigar-Becken nur gelegentliche und schwache Erschütterungen, obwohl Geologen gerade in dieser Region immerhin 16 gewaltige Bergstürze nachgewiesen haben, darunter drei der Megaklasse und neun davon vor 4000 bis 2000 Jahren. Selbst das schwere Beben von 2005 im benachbarten Kaschmir, das eine Stärke von 7,6 auf der Richterskala erreichte, hätte dergleichen nicht auslösen können.

Die Ergebnisse der Bergsturzforschung passen zur Hypothese von Geologen wie Peter Molnar und Roger Bilham, bei-

de an der University of Colorado in Boulder. Sie gehen der Frage nach, warum im Himalaja eigentlich keine gravierenden Erdbeben auftreten, obwohl dort die Indische und die Eurasische Platte aneinanderstoßen (und dabei das Gebirge vor Jahrmillionen auffalteten). Die Forscher vermuten, dass sich die tektonischen Spannungen nur in sehr langen Intervallen von mindestens 500 bis 1000 Jahren entladen, dann allerdings in Megaerdbeben der Stärke 8 oder 9. Die Konsequenz daraus ist alarmierend: Der nordwestliche Himalaja scheint überreif für ein solches Riesenbeben!

Gegenwärtig besteht jedoch keine Möglichkeit, sie vorherzusagen. Unabhängig davon müssen dringend mehr Anstrengungen unternommen werden, um die Auswirkungen eines Megabergsturzes zu minimieren. Höhere Standards im Bauwesen könnten zumindest in einiger Entfernung von den Epizentren der Beben Todesopfer vermeiden. Im Moment jedoch wächst die Gefahr eher noch, da die Städte expandieren und der Bau von Staudämmen und Fernstraßen in die natürlichen Gegebenheiten eingreift. Zudem geht das Wissen der Einheimischen über die Bergwelt und damit das Gefahrenbewusstsein allmählich verloren, da traditionelle Lebensweisen als altmodisch gelten. Diese bedenklichen Entwicklungen gibt es nicht nur im Karakorum, sondern auch in allen anderen Hochgebirgen. Bei einigen finden sich ebenfalls Hinweise auf vereinzelte Riesenbeben als Ursache solcher Katastrophen. Auch wenn Bergstürze in den Kordilleren, in den Alpen oder im Kaukasus bescheidener ausfallen – gefährlich sind sie gleichwohl. ☞

DER AUTOR



Kenneth Hewitt ist emeritierter Professor für Geografie und Umweltforschung sowie wissenschaftlicher Mitarbeiter am Cold Regions Research Centre der Wilfrid Laurier University in Waterloo (Kanada). Einen Schwerpunkt seiner Forschung bilden Risiko- und Katastrophentheorie.

© AMERICAN SCIENTIST 2010

QUELLEN

Hewitt, K.: Catastrophic Rock Slope Failures and Late Quaternary Developments in the Naga Parbat-Haramosh Massif, Upper Indus Basin, Northern Pakistan. In: Science Reviews 28, S. 1055–1069, Juni 2009

Hough, S. et al.: Kashmir Valleay Megaeearthquakes. In: American Scientist 97, S. 42–49, 2009

Korup, O. et al.: Fluvial Response to Large Rock Slope Failures; Examples from the Himalayas, the Tien Shan, and the Southern Alps of New Zealand. In: Geomorphology 78, S. 3–21, 2006

Schuster, R. L.: Impacts of Landslide Dams on Mountain Morphology. In: Evans, S. G. et al. (Hg.): Landslides from Massive Rock Slope Failure. NATO Science Series. Dordrecht, Springer 2006, S. 521–550

WEBLINK

<http://daveslandslideblog.blogspot.com/>

Aktuelle Informationen zu Bergstürzen weltweit, präsentiert von Geografen Dave Petley von der Durham University

Ozeane in Gefahr

Durch die Zunahme von Kohlendioxid in der Atmosphäre wird das Meerwasser saurer. Das gefährdet Wachstum und Vermehrung der unterschiedlichsten Organismen, vom Plankton bis zu Kalmaren.

Von Marah J. Hardt und Carl Safina

Langsame Spermien – das ist wirklich ein Problem.« Jonathan Havenhand unterstreicht die Tragweite seiner Aussage mit einem energischen Kopfnicken. »Das bedeutet weniger befruchtete Eier, weniger Jungtiere und geringere Bestände.« Gemeinsam fahren wir im Taxi durch die Hügel entlang der Nordküste Spaniens. Wir sind auf dem Weg zu einem internationalen Symposium über die Frage, wie sich der Klimawandel und die Zunahme

von Kohlendioxid (CO₂) in der Atmosphäre auf die Weltmeere auswirken. Unser Gespräch dreht sich um die relativ neue Erkenntnis, dass die veränderte Zusammensetzung des Meerwassers nicht nur die Kalkstrukturen mariner Lebewesen schädigt, sondern auch Zellen, Gewebe und Organe. Ein fundamentaler Mechanismus der Arterhaltung wird dabei in Mitleidenschaft gezogen: die sexuelle Fortpflanzung. Das ergaben Laborexperimente, die Havenhand in an der Universität Göteborg (Schweden) durchgeführt hat.

Umweltforscher bezeichnen die Versauerung der Meere durch Kohlendioxid, das mit Wasser zu Kohlensäure reagiert, gelegentlich als das zweite CO₂-Problem. Der sinkende pH-Wert erschwert es den Korallen, Muscheln und Schnecken, ihre Skelette und Schalen zu bilden. Noch bedrohlicher aber ist, dass die Übersäuerung grundlegende Körperfunktionen aller marinen Organismen beeinträchtigen kann, gleichgültig ob mit oder ohne Kalkgerüst. Indem sie Wachstum und Reproduktion stört, gefährdet sie den Bestand ganzer Arten. Es ist daher höchste Zeit, der Versauerung Einhalt zu gebieten, bevor sie die marine Nahrungskette irreparabel schädigt, von der alles Leben im Meer abhängt – und indirekt auch die Menschheit.

Dadurch, dass die Ozeane Kohlendioxid aus der Luft aufnehmen, mildern sie die Auswirkungen des Treibhausgases auf das Klima. Aktuell beträgt die CO₂-Konzentration der

AUF EINEN BLICK

ÜBERSÄUERTE MEERE

1 Weil die Ozeane immer mehr von dem Kohlendioxid aufnehmen, das die Menschheit in großen Mengen in die Atmosphäre freisetzt, steigt der Säuregrad des Meerwassers.

2 Experimente mit Ruderfußkrebse, Meeresschnecken, Seeigeln und Schlangensternen zeigen die Folgen der Versauerung. Die Tiere benötigen viel Energie zur Bewahrung ihres inneren Säure-Basen-Gleichgewichts. Das beeinträchtigt ihr Wachstum und ihre Fortpflanzungsfähigkeit.

3 Bei der hohen Geschwindigkeit, mit der die Ozeane derzeit versauern, können sich zahlreiche Tierarten wahrscheinlich nicht schnell genug anpassen. Ihr Aussterben würde die marine Nahrungskette massiv stören und auch die Fischerei in Mitleidenschaft ziehen.



JAMIE CHUNG

Atmosphäre etwa 390 Teile pro Million (*parts per million*; ppm). Sie läge wesentlich höher, würden sich nicht jeden Tag 30 Millionen Tonnen des Gases im Meer lösen. Insgesamt landet etwa ein Drittel des vom Menschen produzierten Kohlendioxids in den Ozeanen. Das bremst zwar die globale Erwärmung, jedoch um den Preis der Übersäuerung des Meerwassers. Robert H. Byrne von der University of South Florida in Tampa hat nachgewiesen, dass der Säuregehalt des Pazifiks zwischen Hawaii und Alaska bis in 100 Meter Tiefe allein in den letzten 15 Jahren um sechs Prozent zugenommen hat. Weltweit ist der mittlere pH-Wert der obersten Wasserschichten seit Beginn der industriellen Revolution um 0,12 auf etwa 8,1 gesunken. Das mag geringfügig erscheinen. Die pH-Skala ist jedoch logarithmisch. Einem Rückgang um 0,12 entspricht daher eine Zunahme des Säuregehalts um satte 30 Prozent.

Der pH-Wert gibt die Konzentration von Wasserstoffionen (H^+) an. In neutralem Wasser beträgt er 7,0. Bei niedrigeren Werten ist eine Lösung sauer, bei höheren basisch. Ein pH von 8,1 liegt zwar im schwach basischen Bereich; die beobachtete Abnahme um 0,12 zeigt jedoch einen Trend zur Versauerung an.

Eine derart rasche Änderung des pH-Werts wie in jüngerer Zeit haben die Meeresbewohner seit Jahrmillionen nicht erlebt. Paläontologischen Untersuchungen zufolge ging bei vergleichbaren Verschiebungen in der Vergangenheit prak-

tisch alles Leben im Meer zu Grunde. So ereignete sich vor 250 Millionen Jahren das schlimmste Artensterben aller Zeiten, weil gewaltige Vulkanausbrüche den CO_2 -Gehalt der Luft verdoppelten. Mehr als 90 Prozent aller marinen Spezies wurden damals ausgelöscht. Die chemisch völlig veränderten Ozeane waren vier bis fünf Millionen Jahre lang eine biologische Wüste.

Anstieg des Säuregehalts um 150 Prozent

Wenn wir Menschen weiterhin im aktuellen Tempo Treibhausgase produzieren, wird der CO_2 -Gehalt der Atmosphäre im Jahr 2050 bei 500 ppm liegen und bis zum Ende des Jahrhunderts 800 ppm erreichen. Dann könnte der pH-Wert der oberen Meeresschichten 7,8 oder gar 7,7 betragen, was einem Anstieg des Säuregehalts um 150 Prozent gegenüber vorindustriellen Zeiten entspräche.

Die meisten Menschen stellen sich das Meer einfach als riesiges Wasserbecken vor. Tatsächlich besteht es jedoch aus zahlreichen Schichten, die sich in Temperatur und Salzgehalt unterscheiden. Die wärmste und salzärmste reicht von der Oberfläche bis in 50 bis 200 Meter Tiefe, in manchen Regionen auch tiefer. Dank genügend Sauerstoff und Licht gedeiht in dieser Schicht das Phytoplankton, das als erstes Glied der Nahrungskette mit Hilfe von Sonnenstrahlung Kohlenhydrate herstellt – ähnlich wie die Pflanzen an Land. Von diesen

einzelligen Algen ernährt sich das Zooplankton, das aus winzigen Krebstieren oder auch Fischlarven besteht. Es wird seinerseits von kleinen Fischen gefressen, die wiederum größeren Meerestieren als Nahrung dienen und so weiter.

Winde vermischen oberflächennahe und tiefere Wasserschichten. Dabei gelangt Sauerstoff in die Tiefe, Nährstoffe kommen nach oben. Zum Stofftransport zwischen den Schichten tragen aber auch Tiere bei, lebende wie tote. So wandern die Ruderfußkrebse jede Nacht im Schutz der Dunkelheit von mittleren und sogar tieferen Schichten in die Phytoplanktonzone, um sich am reichhaltigen Büfett zu bedienen, das vom Tageslicht bereitete wurde. Viele räuberische Fische und Kalmare folgen ihnen, während Tiefseebewohner darauf warten, dass Teile des Überflusses in Form der Kadaver abgestorbener Organismen herabrieseln. Während ihres Auf- und Abstiegs passieren all diese Tiere Wasserschichten

mit unterschiedlichen pH-Werten. Deshalb könnten sie Schaden nehmen, wenn sich das Tiefenprofil verändert.

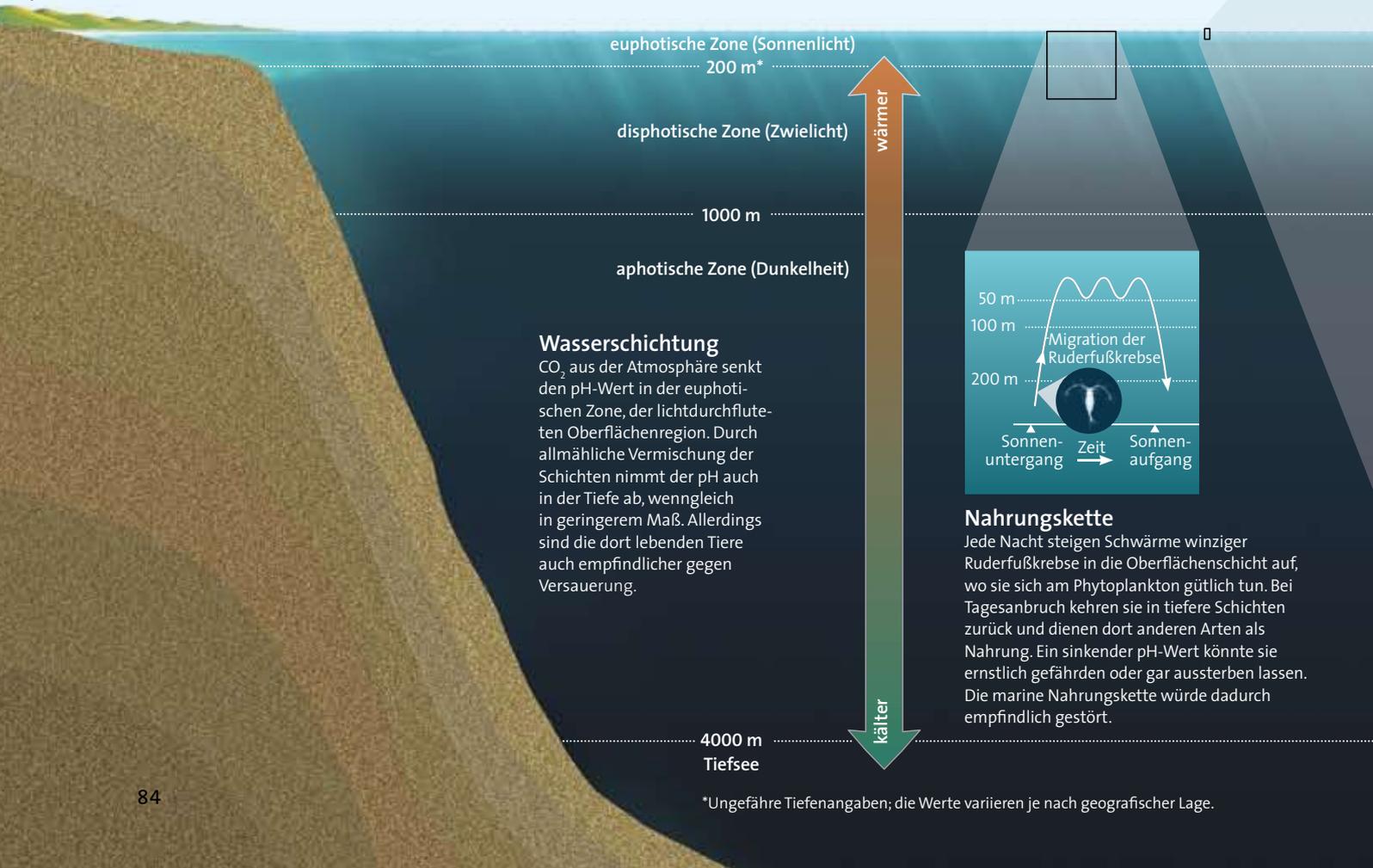
Für die Meerestiere bedeutet saureres Wasser in aller Regel, dass sie mehr Energie benötigen, um ihre innere pH-Balance wiederherzustellen oder zu erhalten – auf Kosten von Wachstum und Reproduktion. Schon bei geringfügig höherer CO₂-Konzentration im Meerwasser gelangt das zusätzliche Kohlendioxid umgehend durch Diffusion in den Körper kiemenatmender Organismen, wo es mit dem Blutplasma reagiert. Die dabei gebildeten Wasserstoffionen senken den pH-Wert von Körperflüssigkeiten und Geweben.

Die Meeresbewohner erhalten das innere Säure-Basen-Gleichgewicht bei solchen Störungen mit verschiedenen Maßnahmen aufrecht. So produzieren sie basische Anionen wie Hydrogenkarbonat, die als Puffer wirken und überschüssige Wasserstoffionen abfangen. Außerdem pumpen sie

Eingriff in das marine Ökosystem

Meerwasser ist relativ stabil geschichtet, weil mit der Tiefe – bei fallender Temperatur und steigendem Salzgehalt – seine Dichte zunimmt. In der obersten, sonnendurchfluteten (euphotischen) Schicht gedeihen die Algen des Phytoplanktons, das als unterstes Glied der marinen Nahrungskette dient. Es ernährt insbesondere die Ruderfußkrebse, die zwischen den Schichten auf- und abwandern (Mitte links). Diese bilden dann ihrerseits die Nahrungsgrundlage für das Leben in größeren Tiefen. Weil die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre steigt, löst sich mehr von dem Gas im Meerwasser. Dort entsteht daraus Kohlensäure (Mitte rechts). Die resultierende Versauerung ist bereits messbar (ganz rechts). Wie Experimente nahelegen, dürfte sie Meeresbewohner in verschiedenen Tiefen teils massiv schädigen.

GEORGE RETSICK



Letztere zwischen Zellen und Zellzwischenräumen hin und her. Schließlich drosseln sie ihren Stoffwechsel, um weniger Wasserstoffionen aufzunehmen und so die Phasen niedrigeren pHs »auszusitzen«.

So raffiniert diese Mechanismen sind, taugt doch keiner dafür, dauerhafte pH-Verschiebungen auszugleichen. Wenn ein Organismus sein Säure-Basen-Gleichgewicht gegen äußere Einflüsse aktiv aufrechterhalten muss, kostet das zusätzliche Energie. Außerdem können die Notmaßnahmen grundlegende Lebensfunktionen wie Proteinsynthese und Immunabwehr beeinträchtigen.

Säurepuffer nur kurzfristiger Notbehelf

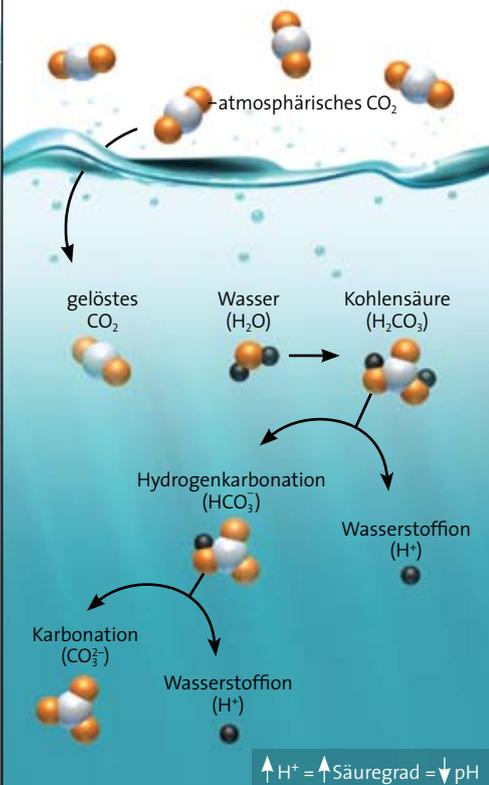
Die meisten Lebewesen verfügen über eine gewisse Pufferkapazität. Fische und andere bewegungsaktive Meerestiere fangen so zum Beispiel den vorübergehenden Säureüber-

schuss im Gewebe beim schnellen Schwimmen ab. Das Phänomen kennen auch Sportler. Wenn bei intensiver Belastung die Sauerstoffversorgung nicht mehr ausreicht, schalten die Muskeln auf anaeroben (sauerstoffunabhängigen) Energiestoffwechsel um, der weniger effizient ist und zusätzliche H^+ -Ionen erzeugt. Der interne Säurepuffer der Fische reicht jedoch nicht aus, um eine pH-Verschiebung über längere Zeit zu kompensieren.

Bei allmählicher Versauerung über Zehntausende von Jahren hinweg kann sich eine Tierart eventuell anpassen. Dann setzen sich mit der Zeit zufällige Mutationen durch, die zum Beispiel bewirken, dass mehr Puffermoleküle produziert werden. Dies ist jedoch kaum möglich, wenn sich gravierende Veränderungen in wenigen hundert Jahren oder noch schneller vollziehen. Laufen sie im Labor gar binnen Tagen oder Wochen ab, sterben sämtliche Versuchstiere.

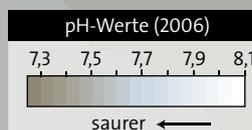
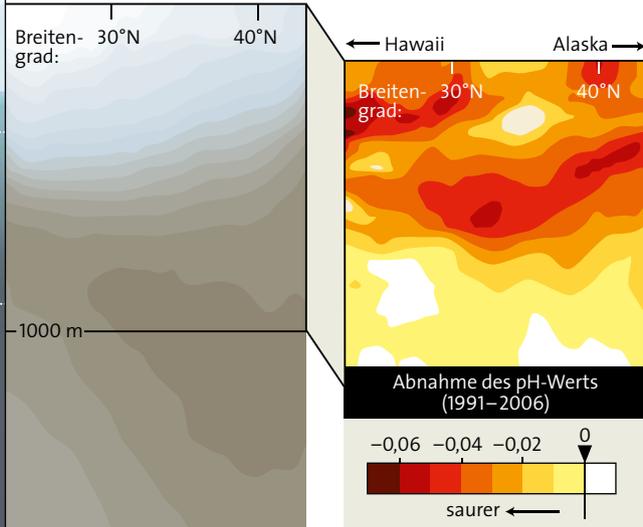
Wie Kohlendioxid das Meerwasser ansäuert

Kohlendioxid aus der Luft löst sich im Wasser und reagiert mit ihm zu Kohlensäure. Diese gibt ein Wasserstoffion (H^+) ab. Das zurückbleibende Hydrogenkarbonat (HCO_3^-) kann weiter dissoziieren. Mit zunehmender H^+ -Konzentration steigt der Säuregrad, und der pH-Wert sinkt entsprechend.



Steigender Säuregrad

In nur 15 Jahren ist der pH-Wert im Oberflächenwasser des Pazifiks auf einem Längsschnitt zwischen Hawaii und Alaska um sechs Prozent gesunken. Das ergaben Messungen von Wissenschaftlern der University of South Florida in Tampa. Der pH ist normalerweise an der Oberfläche am höchsten (links), weil dort Reaktionen ablaufen, die H^+ -Ionen verbrauchen. Zu größeren Tiefen hin nimmt er allmählich ab; unter etwa 3000 Metern bleibt er praktisch konstant.



Ein Abfall des pH-Werts kann speziell für Tiefseebewohner wie Riesenkalmar problematisch sein. Sie leben in einem besonders stabilen Milieu und sind deshalb kaum auf Veränderungen eingestellt. Auch aus diesem Grund erscheinen Überlegungen höchst fragwürdig, für den Klimaschutz große Mengen Kohlendioxid in die Tiefsee zu pumpen. Das könnte verheerende Folgen für den Bestand zahlreicher Tierarten haben.

Die Versauerung der Ozeane schädigt aber nicht nur erwachsene Meerestiere, sondern vor allem auch frühe Entwicklungsstadien. Das zeigt eine wachsende Anzahl von Forschungsarbeiten. Schon das allererste Lebensstadium, die Befruchtung, kann beeinträchtigt sein. Wie Havenhand uns während der gemeinsamen Taxifahrt erklärt, bewegten sich die Spermien des australischen Seeigels *Heliocidaris erythrogramma* um 16 Prozent weniger und schwammen 12 Prozent langsamer, wenn seine Mitarbeiter den pH-Wert des Wassers um 0,4 verringerten – was in dem bis 2100 erwarteten Bereich liegt. Der Befruchtungserfolg der Tiere sank um 25 Prozent. Frei lebende Seeigel könnten durch eine solche Entwicklung im Bestand gefährdet sein. Zwar setzen sie Millionen von Spermien und Eizellen frei, doch die Samenzellen bleiben nicht lange funktionsfähig. Sie müssen binnen weniger Minuten eine Eizelle finden und befruchten. Im bewegten Wasser des Ozeans sind träge Spermien dazu möglicherweise nicht mehr in der Lage.

Die Versauerung gefährdet auch frühe Larvenstadien verschiedener Spezies. Das ergaben Versuche von Samuel Dupont, einem Institutskollegen von Havenhand in Göteborg. Setzte er Larven von Schlangensternen – Verwandten der gewöhnlichen Seesterne – um 0,2 bis 0,4 erniedrigten pH-Werten aus, entwickelten sich viele abnormal. Weniger als 0,1 Prozent überlebten mehr als acht Tage. Außerdem schlüpfen, wie eine andere Untersuchung ergab, aus Eiern der Stumpfen Strandschnecke *Littorina obtusata* bei reduziertem pH weniger Larven – und diese waren nicht so lebhaft wie üblich.

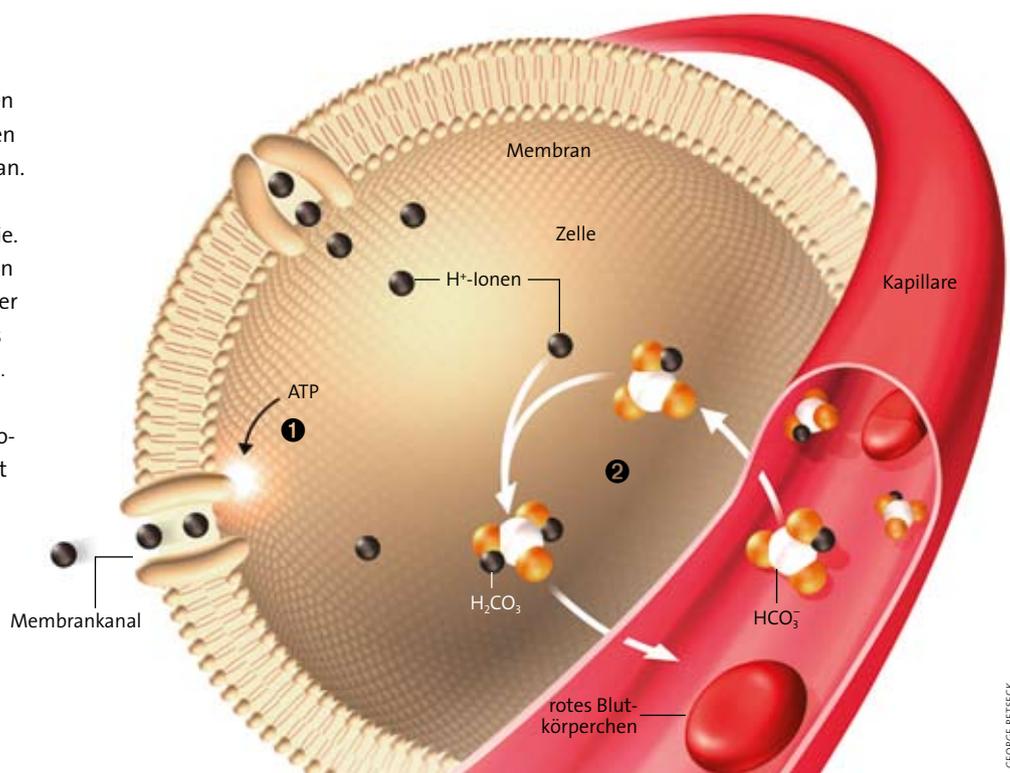
Wachstumshemmung in saurerem Wasser

Zwar ist eine plötzliche Absenkung des pH-Werts um 0,2 bis 0,4 im Laborversuch weitaus drastischer als die Milieuänderungen, denen frei lebende Tiere ausgesetzt sind, und manche Spezies können sich allmählichen Veränderungen durchaus anpassen. Doch für andere dürfte selbst eine geringe Versauerung bedrohliche Folgen haben. So vermuten Forscher in der pH-Änderung des Meerwassers den Grund für das massive Sterben von Austernlarven vor der Küste Oregons, das Züchter dort in große Schwierigkeiten bringt.

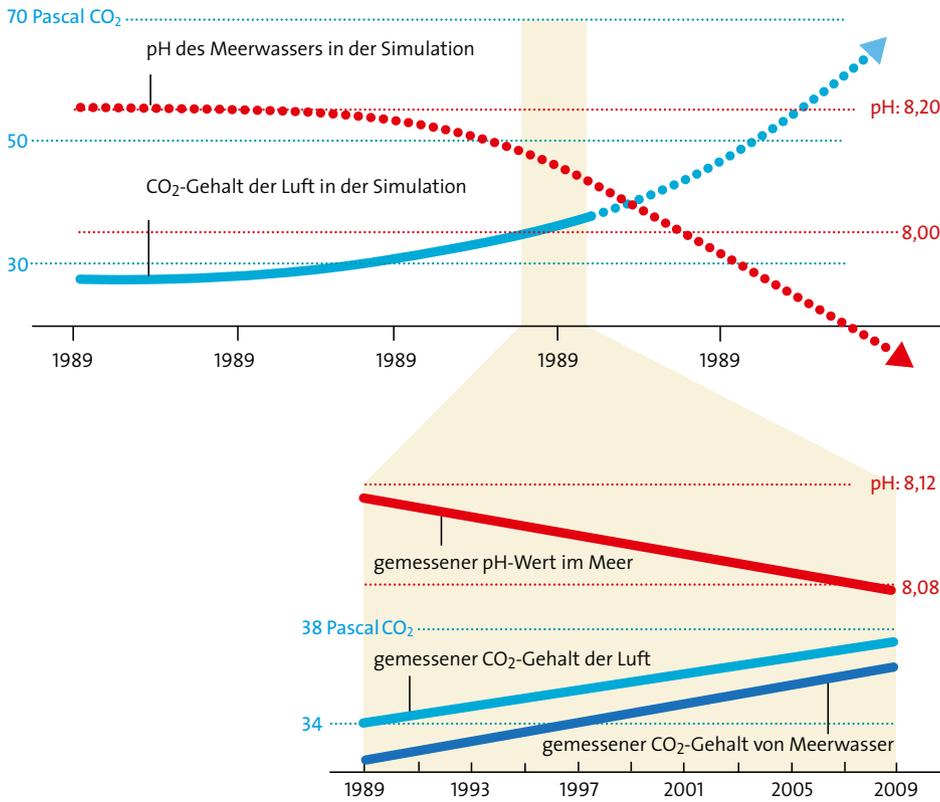
Auch nach dem Larvenstadium wirkt sich die Versauerung auf viele Meerestiere negativ aus. Das belegen Experimente mit Seeigeln der Arten *Hemicentrotus pulcherrimus* und *Echinometra mathaei* sowie der Kegelfechterschnecke *Strombus luhua* aus dem Jahr 2005. Forscher der Universi-

Das Ringen um Neutralität

Bei erhöhter CO_2 -Konzentration im Meerwasser dringen mehr Wasserstoffionen in den Körper der Meeresorganismen ein und säuern das Gewebe an. Es gibt Gegenmaßnahmen, doch alle verbrauchen Energie. So können die Zellen H^+ -Ionen durch Membrankanäle, die der Energieträger ATP öffnet, aus dem Zellplasma pumpen (1). Eine andere Möglichkeit besteht darin, mehr Puffermoleküle wie Hydrogenkarbonat (HCO_3^-) zu produzieren, die H^+ -Ionen binden und wegschaffen (2).



GEORGE RETSECK

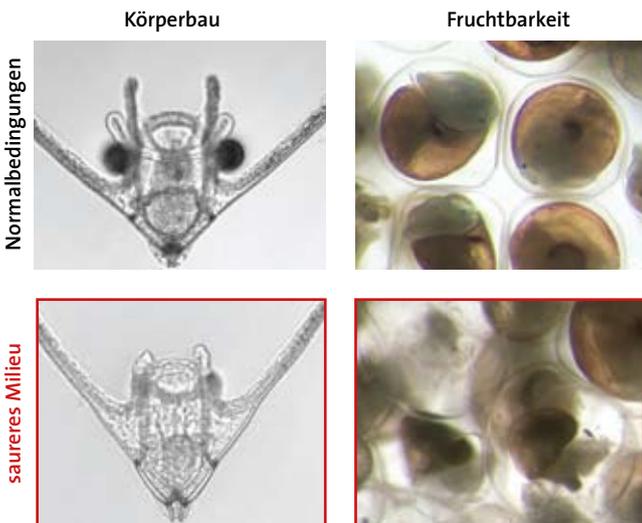


Simulation und Messwerte im Vergleich

Die Vorhersagen von Klimamodellen für die Entwicklung des pH-Werts von Meerwasser (oben) zeigen denselben Verlauf wie Daten einer Messstation der University of Hawaii in Manoa im zentralen Nordpazifik zwischen 1989 und 2009 (unten).

Missgebildete Meerestiere

Wie Laborexperimente ergaben, beeinträchtigt saureres Meerwasser die Entwicklung und Fruchtbarkeit von Meerestieren. Bei einem pH von 8,1, dem derzeitigen Normalwert, entwickelten sich aus Schlangensterne-Embryonen innerhalb von acht Tagen ausgereifte, symmetrische Larven (links oben), bei pH 7,7 hingegen entstanden deformierte Exemplare, die nicht die volle Reife erreichten. Eier von Meeresschnecken, die bei pH 8,05 befruchtet und bebrütet wurden, enthielten Embryonen, die binnen 18 Tagen Schalen bildeten (rechts oben). Bei pH 7,6 dagegen blieben einige Eier leer, und die Embryonen waren auch am Versuchsende noch schalenlos.



LARVEN (LINKS) AUS: SAMUEL DUPONT ET AL., NEAR-FUTURE LEVEL OF CO₂-DRIVEN OCEAN ACIDIFICATION (...), IN: MARINE ECOLOGY PROGRESS SERIES, VOL. 373, 2008; EIER (RECHTS): ROBERT ELLIS, UNIVERSITY OF PLYMOUTH

tät Kioto (Japan) ließen sie sechs Monate lang in Wasser leben, durch das sie Luft leiteten, die 200 ppm mehr CO₂ enthielt als die heutige Atmosphäre. Unter diesen Bedingungen wuchsen die Tiere deutlich langsamer als normal. Sie blieben also länger klein – ein Zustand, in dem sie in freier Natur leichter gefressen würden. Außerdem setzte die Geschlechtsreife später ein.

Durch die Versauerung kommen einige Phytoplanktonarten auch nur schwerer an Eisen, das sie für ihr Wachstum benötigen. Die Aufnahme des Spurenelements kann sich nach Untersuchungen von Forschern an der Princeton University (New Jersey) um 10 bis 20 Prozent vermindern, wenn der pH-Wert um 0,3 zurückgeht. Das ist beunruhigend; denn abgesehen von der grundlegenden Rolle des Phytoplanktons für die marine Nahrungskette produziert es auch einen Großteil des Sauerstoffs, den wir zum Atmen brauchen.

In anderen Experimenten wuchsen die Arme des im Sediment lebenden Schlangenters *Amphiura filiformis* bei niedrigerem pH zwar schneller, doch die Muskelmasse ging deutlich zurück. Die Tiere brauchen aber starke Muskeln, denn mit deren Hilfe wühlen sie sich in den Boden ein, um Nahrung zu finden und Fressfeinden zu entkommen. Bei Miesmuscheln schwächte eine Abnahme des pH-Werts um 0,3 bis 0,5 binnen eines Monats die Immunreaktion.

Verminderte Muskelkraft, Immunschwäche und Fortpflanzungsprobleme können die Population vieler mariner Organismen langfristig dezimieren – mit ungünstigen Fol-

»LSD« bei Meerestieren

Die zunehmende Versauerung des Meerwassers stört biochemische Vorgänge im Körper vieler Meeresorganismen. Dabei beobachten Forscher auch eher skurrile Effekte.

Zum Beispiel nutzen viele Meerestiere schwache Geruchsreize, um Beute, Sexualpartner und geeignete Lebensräume zu finden. Bestimmte Anemonenfische (Bild) entscheiden anhand anziehender und abstoßender Geruchswahrnehmungen, in welchem Riff und in welcher Seeanemone sie sich ansiedeln. Wurden Larven in Meerwasser aufgezogen, dessen pH-Wert um 0,2 bis 0,4 Einheiten niedriger war, schwammen sie auf Quellen negativer Reize zu und ignorierten positive Signale. Ihre Nasalorgane erscheinen anatomisch normal. Nach Ansicht der Wissenschaftler stört die Versauerung die Übertragung chemischer Signale im Nervensystem. Weitere Untersuchungen müssen zeigen, inwieweit das LSD genannte Phänomen (kurz für *lost smell disorder*) die Fischpopulationen weltweit gefährden könnte.

Komplexe pH-abhängige Wechselwirkungen zwischen Molekülen im Meerwasser steigern oder vermindern auch die akustische Wahrnehmung. Wenn der pH-Wert der Ozeane um weitere 0,3 Einheiten abnimmt (was in dem bis 2100 vorherge-



sagten Bereich liegt), könnte sich der Schallpegel um 40 Prozent erhöhen. Obwohl bisher keine Untersuchungen einen direkten Zusammenhang zwischen dem Anstieg der Lautstärke durch die Versauerung und der Sterblichkeit mariner Organismen belegen, ist der Befund alarmierend; denn viele Meerestiere, insbesondere Säuger, nutzen Schall zur Orientierung, Kommunikation, Jagd und Partnerwerbung.

NATURE PICTURE LIBRARY / GEORGETTE DOUWMA

gen nicht nur für die betroffenen Spezies, sondern auch für viele andere Arten, deren Ernährung und Lebensbedingungen von ihnen abhängen. Zum Beispiel halten Seeigel durch ihre Beweidung Korallenriffe und Braunalgenwälder (Kelpwälder) gesund, und Schlangensterne, die den Meeresboden durchwühlen, ermöglichen vielen Spezies erst das Einnisten im Sediment.

Für einige Meeresbewohner bedeutet ein saureres Milieu sogar schlicht und einfach das Ende. Bei Experimenten mit Ruderfußkrebsen der Art *Paraeuchaeta elongata*, die vor der Küste Kaliforniens häufig vorkommen, starb binnen einer Woche die Hälfte der Tiere, wenn sie in Wasser gehalten wurden, dessen pH-Wert um 0,2 erniedrigt war. Das ist insofern

brisant, als unsere bevorzugten Speisefische – vom Tunfisch über den Lachs bis zur Goldbrasse – von Meerestieren leben, die ihrerseits hauptsächlich Ruderfußkrebse fressen.

Manche Fischarten wie zum Beispiel der Gefleckte Seewolf (*Anarhichas minor*) erweisen sich in Laborversuchen indes als erstaunlich pH-tolerant. Der Grund: Sie haben eine hohe Pufferkapazität und speichern in ihren Geweben Sauerstoff. In diesem Fall ist das günstig, weil Blut unter sauren Bedingungen nicht mehr so leicht Sauerstoff aus dem Wasser aufnehmen kann. Auch solchen Fischen nutzt ihre hohe Anpassungsfähigkeit allerdings wenig, wenn der Bestand ihrer Beutetiere zurückgeht.

Andere Arten sind zudem weniger gut gerüstet. Motorisch hochaktive Kalmare zum Beispiel haben keinerlei Sauerstoffspeicher; sie verbrauchen das Gas sofort nach der Aufnahme. Weniger Sauerstoff in ihrem Blut würde sie bei der Jagd, der Flucht vor Fressfeinden und der Suche nach Sexualpartnern beeinträchtigen. Der kommerziell gefangene Kurzflossenkalmar *Illex illecebrosus* zeigt solche Einschränkungen bereits bei einer Abnahme des pH-Werts um 0,15.

Die vorliegenden Laborergebnisse und geologisch-paläontologischen Daten zeigen: Eine Ansäuerung der Ozeane setzt Meerestiere zusätzlichem Stress aus. Das ist umso schlimmer, als diese heute zum Teil schon unter den Folgen menschlicher Aktivitäten wie Erwärmung und Verschmutzung des Wassers sowie Überfischung zu leiden haben.

Laborexperimente dauern Wochen bis Monate. Klimaänderungen vollziehen sich dagegen in Jahrzehnten bis Jahr-



Die Scripps Institution of Oceanography in La Jolla (Kalifornien) verteilte Ende 2009 Bojen mit CO₂- und pH-Sensoren im Pazifik. Die Geräte liefern Daten für Forschungsprojekte, die bessere Vorhersagen darüber ermöglichen sollen, wie sich die Versauerung des Meeres weiterentwickeln wird.

HTTP://MOORING.USDEU

hundertern. Vielleicht ist das lang genug, dass sich manche Spezies anpassen können – insbesondere Arten mit kurzen Generationszeiten. Doch bei säureempfindlichen Spezies mit längerem Reproduktionszyklus reichen 90 Jahre – die Zeitspanne, in der mit einer Abnahme des pH-Werts um 0,3 bis 0,5 Einheiten zu rechnen ist – für eine genetische Adaptation schwerlich aus.

Selbst wenn die Fruchtbarkeit nur wenig zurückgeht, kann das auf Dauer verhängnisvoll sein. Denn normalerweise sterben Arten ja nicht plötzlich aus, sondern verlöschen durch allmähliche Abnahme der Individuenzahl über längere Zeiträume. Schon bei einem Rückgang um ein Prozent pro Generation kann eine Spezies in weniger als einem Jahrhundert auf immer verschwinden.

Bislang verringert sich der pH des Meerwassers etwa 100-mal so schnell wie in den Jahrtausenden zuvor. Daran wird sich bei den derzeitigen Emissionstrends auch nichts ändern. Ohne Gegenmaßnahmen herrschen im Meer also bald Bedingungen, denen seine Bewohner nie zuvor ausgesetzt waren. Eine Anpassung daran ist auch deshalb schwierig, weil sich die Auswirkungen der Versauerung und anderer Stressfaktoren gegenseitig verstärken. So verengen erhöhte CO₂-Spiegel den Temperaturbereich, in dem ein Organismus überleben kann. Korallen und Algen zum Beispiel leiden in saurerem Wasser eher unter Hitzestress.

Korallenriffe besonders stark bedroht

Klimaforscher fordern nahezu einhellig eine Drosselung des CO₂-Ausstoßes, um die globale Erwärmung auf ein erträgliches Maß zu begrenzen. In die Reduktionsziele sollten aber auch die Gefahren einfließen, die von saurerem Meerwasser ausgehen. Ein tief greifender Wandel der marinen Ökosysteme als Folge eines ungebremsten Säureeintrags würde sich auf die gesamte Nahrungskette auswirken. Betroffen wären also auch Arten, die wir Menschen intensiv nutzen. Ferner würden unter Umständen potenzielle Quellen von Wirkstoffen für die Pharmakologie und Biomedizin vernichtet.

Experten verlangen daher, dass der pH-Wert des Meerwassers bis Ende des Jahrhunderts um maximal 0,1 Einheiten zurückgehen dürfe. Dazu müsste der CO₂-Gehalt der Luft auf 350 ppm verringert werden – was sich ohnehin mehr und mehr als vernünftiges Ziel globalen Klimaschutzes herauskristallisiert. Eine Stabilisierung bei 450 ppm im Jahr 2100, die einige Fachleute vorschlagen, würde den pH-Abfall auf 0,2 Einheiten begrenzen. Doch selbst das ließe die tropischen Korallenriffe vermutlich absterben. Auch wären einige Meerestiere nicht mehr im Stande, Schalen zu bilden – vor allem solche, die in den Gewässern rund um die Antarktis leben. Dort lösen sich nämlich Kalkgehäuse und Skelettstrukturen wegen der kalten Temperaturen und der besonderen Zirkulationsverhältnisse rascher auf als in anderen Meeren. Nicht zuletzt ist es wesentlich einfacher, eine weitere Versauerung zu verhindern, als ihre Folgen rückgängig zu machen. Natürliche Puffersysteme würden Hunderte bis Tausende von Jahren brauchen, den Säuregehalt auf vorindustrielle Werte zurückzubringen.

Abgesehen von politischen Maßnahmen zum Klimaschutz kommt dem Aufbau einer Infrastruktur zur Überwachung der Ozeane große Bedeutung zu. Dringend nötig wäre ein weltweites Netzwerk, das kontinuierlich Daten zum pH-Wert des Meerwassers liefert. Ein internationales Team unter Leitung von Richard Feely vom Pacific Marine Environmental Laboratory in Seattle und Victoria J. Fabry von der California State University in San Marcos hat einen Plan entwickelt, wie sich die pH-Überwachung in bereits existierende Programme zur Beobachtung der Meere wie OceanSITES integrieren ließe. Sinnvoll sind auch Vorhaben wie das California Current Ecosystem Interdisciplinary Biogeochemical Moorings Project, das Ergebnisse von Laborexperimenten mit Felddaten vergleicht, um zu gewährleisten, dass die Versuche unter realistischen Bedingungen stattfinden.

Letztlich lässt sich der Versauerung der Meere nur durch den Umstieg auf erneuerbare Energiequellen begegnen. Entscheidend ist, den Verbrauch fossiler Brennstoffe drastisch zu senken. Das würde der gesamten Menschheit zugutekommen – und nicht nur den Meeren. ~

DIE AUTOREN



Marah J. Hardt arbeitet als Ökologin, Journalistin und Beraterin auf Hawaii. Zuvor war die Expertin für Korallenriffe am Blue Ocean Institute in Cold Spring Harbor (New York) tätig.

Carl Safina ist Gründungsvorstand des Blue Ocean Institute und Professor an der Stony Brook University (New York). Er hat zahlreiche Bücher zu ökologischen Themen veröffentlicht.

QUELLEN

Fabry, V.J. et al.: Impacts of Ocean Acidification on Marine Fauna and Ecosystem Processes. In: ICES Journal of Marine Science 65, S. 414–432, April 2008

Naud, M.-J., Havenhand, J.N.: Sperm Motility and Longevity in the Giant Cuttlefish, *Sepia Apama* (Mollusca: Cephalopoda). In: Marine Biology 148, S. 559–566, 2006

LITERATURTIPP

Doney, S.C.: Das Meer wird sauer. In: Spektrum der Wissenschaft 6/2006, S. 62–69
Grundlegender Artikel über die Versauerung der Meere, der ausführlich die Folgen für Organismen mit Kalkstrukturen beschreibt

WEBLINKS

www.epoca-project.eu
Europäisches Projekt zur Meeresversauerung, dem mehr als 100 Forscher angeschlossen sind

www.oceanacidification.net
Portal mit Fakten, Videos und Neuigkeiten zur Versauerung der Meere, gefördert von der australischen Ocean Ark Alliance

www.wbgu.de/wbgu_sn2006.pdf
Sondergutachten des Wissenschaftlichen Beirats der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen zur Zukunft der Meere von 2006

COMPUTER

Die Zukunft der **MIKROCHIPS**

Man mache alle Bauteile immer kleiner: Dieses Rezept, das der Computerindustrie 40 Jahre beispiellosen Fortschritts bescherte, stößt heute an elementare physikalische Grenzen. Um die Erfolgsgeschichte dennoch fortzuschreiben, verfolgen Ingenieure aktuell eine Vielzahl neuer Ideen.

Von Mark Fischetti



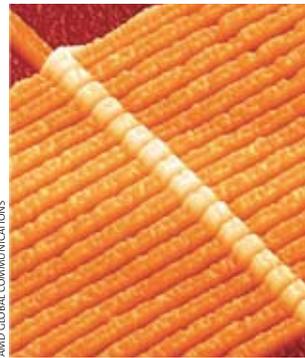
Auf einem Prozessorchip des Typs Phenom X4 von AMD sind 758 Millionen Transistoren untergebracht. Das kleine Bild zeigt den Chip in Originalgröße.

Vor nunmehr 35 Jahren gab der Elektronikpionier Gordon Moore eine damals äußerst kühne Prognose ab: Die Komplexität der Chips mit integrierten Schaltkreisen, die damals gerade ein paar Jahre alt waren, werde sich alle zwei Jahre verdoppeln. Je nachdem, was man unter »Komplexität« versteht – die Anzahl der Bauelemente pro Quadratzentimeter, die Rechenleistung oder auch die Rechenleistung pro Dollar –, ist an Stelle der zwei Jahre vielleicht eine andere Zeitspanne einzusetzen. Aber davon abgesehen hat sich diese Vorhersage, heute längst als »Moore's Gesetz« bekannt, mit bemerkenswerter Genauigkeit bewahrheitet. Durch ständige Innovationen in der Halbleitertechnik sind die Transistoren auf den Chips immer kleiner und die Wege für die elektrischen Signale entsprechend immer kürzer geworden. Das Resultat: Heute können wir für dasselbe Geld die milliardenfache Rechenleistung kaufen wie vor 30 Jahren!

Allen Entwicklern war jedoch bewusst, dass es so nicht beliebig weitergehen kann. Ein Transistor, der weniger als zehn Atome dick wäre, enthielte einfach nicht mehr genug bewegliche elektrische Ladungen, um wie gewohnt zu funktionieren. Und schon lange bevor diese prinzipielle Grenze erreicht ist, stößt die Herstellung auf praktische Probleme. Winzige Transistoren auf derart engem Raum unterzubringen, ist so schwierig, dass die Herstellungskosten oder die Ausschussquote – oder beides – explosionsartig ansteigen. Die abermals kürzeren Wege würden zwar kürzere Schaltzeiten möglich machen. Aber beim ungeheuer raschen Ein- und Ausschalten würden die Transistoren so viel Wärme abstrahlen, dass sie buchstäblich gegrillt würden.

Bereits vor einigen Jahren war die Geschwindigkeit, mit der die einzelnen Elemente schalten, an ihre – durch die Hitzeentwicklung definierte – Grenze gestoßen. Um dennoch die Leistung weiter hochzutreiben, verfielen die Entwickler auf den Trick, mehrere Rechenwerke (»Prozessoren«) auf ein und demselben Chip anzuordnen und parallel arbeiten zu lassen: die »Multicore-Chips«.

Doch spätestens jetzt scheint es für Moores Gesetz wirklich eng zu werden. Wie lässt sich gleichwohl die Rechenleistung der Chips weiter steigern? Die Ingenieure verfolgen verschiedene Ideen: Man könnte



Prototyp des »Crossbar Design«: An jedem Kreuzungspunkt zwischen den Nano-Drähten – 17 von ihnen verlaufen parallel, einer quer darunter – sitzt ein Memristor. Die rasterkraftmikroskopische Aufnahme zeigt ein Modell von Hewlett-Packard.

- ▶ völlig neue Bauprinzipien (»Architekturen«) erproben;
- ▶ die Nanotechnik so weit treiben, dass man einen Chip Atom für Atom aufbauen kann;
- ▶ andere Techniken der Informationsverarbeitung perfektionieren, insbesondere den Quantencomputer und den Biocomputer.

Auf den folgenden Seiten werfen wir einen Blick auf eine Reihe neuerer Entwicklungen, die sich überwiegend bereits im Prototypstadium befinden. Sie bieten in der Tat die Aussicht, dass sich das rasante Entwicklungstempo, an das wir uns gewöhnt haben, in den nächsten 20 Jahren fortsetzt.

Architektur: Kreuz und quer

Die kleinsten derzeit kommerziell produzierten Transistoren haben einen Durchmesser von 32 Nanometern; das sind etwa 96 Siliziumatome nebeneinander. Bei 22 Nanometern sehen die Hersteller die Grenze für die heute üblichen und über die Jahrzehnte immer weiter verfeinerten Lithografiertechniken.

Eine neue Technologie holt aus Schaltelementen dieser Größenordnung eine deutlich höhere Rechenleistung heraus: das »Crossbar Design«. Das Prinzip stammt aus der klassischen Telefonvermittlungstechnik; der hergebrachte deutsche Name ist »Koppelfeld«. Wenn es darum geht, eine beliebige von zahlreichen Eingangsleitungen mit einer beliebigen Ausgangsleitung zu verbinden, legt man die Eingangsleitungen parallel zueinander in eine Ebene, die Ausgangsleitungen – durch eine Isolierschicht getrennt – quer dazu in die Ebene darüber und an jeden Kreuzungspunkt einen Schalter. Die Isolierschicht ist gerade mal ein Molekül dick, und an die Stelle der Schalter treten so genannte Memristoren: elektronische Elemente, die wie Transistoren zwei wohl unterschiedene Zustände annehmen und damit die binären Zahlen 0 und 1 darstellen können, mit denen alle Computer arbeiten. Zusätzlich hat ein Memristor auch Eigenschaften einer Speicherzelle (Spektrum der Wissenschaft 1/2011, S. 86). Damit ist er im Stande, innerhalb eines Crossbars elementare Rechenoperationen durchzuführen, und ersetzt in dieser Funktion ungefähr 10 bis 15 Transistoren.

In den Laboratorien von Hewlett-Packard haben Computorentwickler bereits Prototypen von Crossbars aus Titan- und Platindrähten mit einem Durchmesser von 30 Nanometern hergestellt (Bild oben). Dabei verwendeten sie Materia-

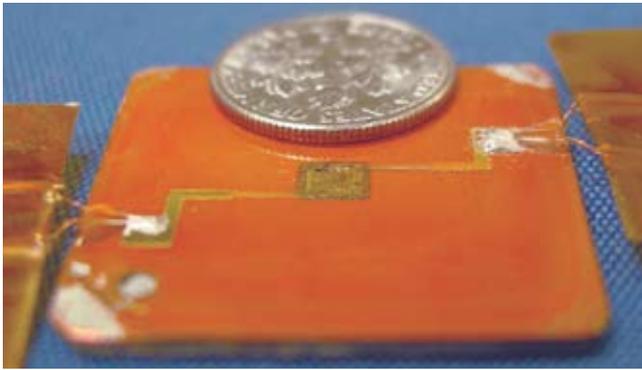
AUF EINEN BLICK

NEUE IDEEN FÜR SCHNELLERE COMPUTER

1 In den letzten 40 Jahren ist die Leistung integrierter Schaltkreise durch Verkleinerung ihrer elementaren Bauteile um das Milliardenfache angestiegen.

2 Eine weitere Miniaturisierung stößt an grundlegende physikalische Grenzen.

3 Entwickler verfolgen verschiedene Strategien, die Leistung trotzdem weiter zu steigern: neue Architekturen, neue Materialien sowie gänzlich neue Konzepte wie Quantencomputer und biologische Rechner.



Ein »Kühlpflaster« (*cooling patch*, goldfarbenes Quadrat in der Mitte) aus Bismuttellurid leitet die Wärme von einem viel größeren, oben auf ihm zu befestigenden Chip (nicht abgebildet) zu einer dünnen Wärmedissipationsschicht (orange). Beide zusammen nehmen weniger Raum ein als heute übliche Wärmesenken.

lien und Verfahren, die den bereits für die Halbleiterindustrie optimierten ähnlich sind. Die Forscher glauben, den Drahtdurchmesser bis auf acht Nanometer verringern zu können. Andere Gruppen arbeiten an derselben Architektur mit den Materialien Silizium, Titan und Silbersulfid.

Kühlung: Flüssigkeit oder Gebläse

Bis zu einer Milliarde Transistoren auf einem Chip produzieren im Betrieb pro Quadratzentimeter so viel Hitze wie ein Bügeleisen oder mehr. Diese abzuführen, bevor das Bauteil selbst Schaden nimmt, ist eine große technische Herausforderung. Der Lüfter eines PCs kann die ungefähr 100 Watt Energieabgabe pro Chip gerade noch bewältigen. Wo für ein Gebläse kein Platz ist, arbeiten die Entwickler an völlig neuen Verfahren: Bei dem Notebook MacBook Air etwa dient das glatte Gehäuse aus Wärme leitendem Aluminium als Wärmesenke, und im Power Mac G5 von Apple strömt eine Kühlflüssigkeit durch Mikroröhren an der Unterseite des Prozessochips.

Flüssigkeit in unmittelbarer Nähe zu Elektronik ist allerdings eine heikle Sache; außerdem haben kleine tragbare Geräte wie Smartphones einfach keinen Platz für Kühlröhren – und für einen Ventilator schon gar nicht. Einer Forschungsgruppe bei Intel ist es gelungen, die Ummantelung eines Chips mit einem dünnen, aus mehreren Schichten aufgebauten Überzug (einem *superlattice*) aus Bismuttellurid zu versehen (Bild oben). Dieses thermoelektrische Material verwandelt das Temperaturgefälle in elektrische Energie – und kühlt dadurch den Chip.

Das Start-up-Unternehmen Ventiva baut auf der Grundlage von Forschungsergebnissen aus der Purdue University in West Lafayette (Indiana) winzige Festkörper-»Lüfter«, die keinerlei bewegliche Teile enthalten. Ähnlich den auch im Haushalt genutzten geräuschlosen Luftreinigern erzeugen sie mit Hilfe der so genannten Koronaentladung, die um einen elektrischen Leiter herum entsteht, einen Luftzug: Ein

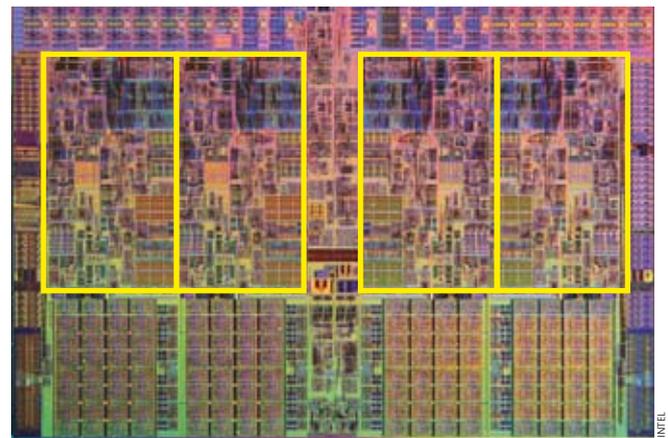
leicht konkaves Gitter aus Strom führenden Drähten erzeugt ein mikroskopisches Plasma; die Ionen in dieser gasartigen Mischung treiben die Luftmoleküle von den Drähten weg in Richtung einer angrenzenden Platte. Ein solcher Lüfter ist weitaus kleiner als ein konventioneller mechanischer Ventilator, macht aber deutlich mehr Wind.

Andere Forscher arbeiten an Ventilatoren, die von einem Stirlingmotor angetrieben werden. (In einem Stirlingmotor wird das Arbeitsgas in einem Zylinder abwechselnd erwärmt und gekühlt und treibt durch seine Ausdehnung beziehungsweise Kontraktion einen Kolben an.) Sie sind zwar noch etwas sperrig, verbrauchen aber keinen Strom; ihre Energie beziehen sie allein aus dem Temperaturunterschied zwischen den heißen und den kalten Bereichen des Chips.

Mehrfachkerne: Paralleles Rechnen

Je kleiner ein Transistor ist, desto rascher kann er zwischen seinen beiden Zuständen hin- und herschalten. Entsprechend höher lässt sich die Taktrate einstellen, das ist die Anzahl der Befehle pro Zeiteinheit. Allerdings erreichen die Chips im Bereich von drei bis vier Gigahertz (Milliarden Befehle pro Sekunde) die Grenze zur Überhitzung. Um dennoch die Leistung weiter steigern zu können, setzten die Designer zwei Prozessoren (*cores*, »Kerne«) auf ein und denselben Chip. Die rechnen jeder für sich nicht schneller als zuvor, erreichen aber, da sie parallel arbeiten, die doppelte Leistung (Spektrum der Wissenschaft 3/2005, S. 90). Stand der Technik sind inzwischen vier Prozessoren pro Chip (»Quad-Core«), beispielsweise im Intel i7 (Bild unten) oder im AMD Phenom X4; Entwickler experimentieren heute mit bis zu 32 Stück.

Wie bei jeder arbeitsteiligen Fertigung kommt es entscheidend darauf an, die Arbeit auf die verschiedenen Prozessoren so aufzuteilen, dass der Leerlauf minimiert wird. Vor allem soll ein Prozessor möglichst wenig stillstehen müssen, weil er auf Daten vom Kollegen warten muss. Das Problem stellt sich schon beim i7, der in Notebooks eingebaut wird, und in verschärfter Form bei den Höchstleistungsrechnern,



In dem Chip i7 von Intel arbeiten vier Prozessorkerne (gelb eingerahmt) parallel.

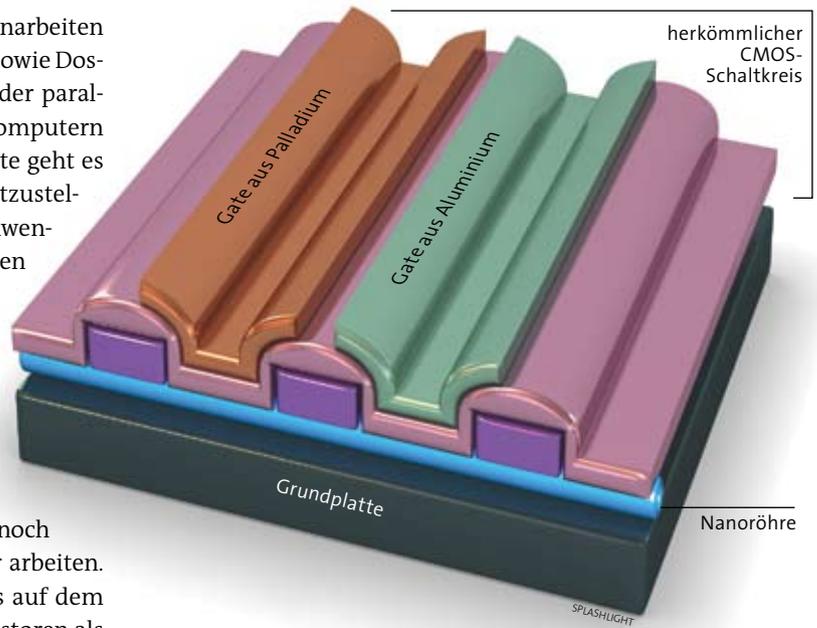
bei denen viele tausend Prozessoren zusammenarbeiten müssen (Spektrum der Wissenschaft 8/2008, S. 19 sowie Dossier 2/2007 »Supercomputing«). Die Grundlagen der parallelen Programmierung für den Einsatz in Supercomputern stammen aus den 1980er und 1990er Jahren. Heute geht es vor allem darum, Sprachen und Werkzeuge bereitzustellen, mit denen Softwareentwickler die zahllosen Anwendungen für gewöhnliche Computer programmieren können. Microsoft Research stellt dafür die Programmiersprache F# zur Verfügung; aus der frühen Sprache Erlang, die von Joe Armstrong und anderen in der schwedischen Firma Ericsson entwickelt wurde, sind Nachfolger wie Clojure und Scala hervorgegangen.

In naher Zukunft werden vermutlich in Computern für den Privatgebrauch Dutzende oder noch mehr Prozessoren auf einem Chip nebeneinander arbeiten. Jeder von ihnen nimmt nur einen Teil des Platzes auf dem Chip ein und enthält entsprechend weniger Transistoren als der einzige Prozessor, der bisher den ganzen Chip beherrschte; aber alle zusammen sind deutlich schneller.

Dünnere Materialien: Nanoröhren und Selbstmontage

Bereits seit einem Jahrzehnt preisen Fortschrittspropheten die Nanotechnologie als Lösung aller möglichen Probleme in Medizin, Energieversorgung und natürlich auch Chipproduktion an. Und eigentlich sei die Aktivität der Halbleiterindustrie, nämlich Chips mit immer winzigeren Transistoren herzustellen, bereits eine Form von Nanotechnologie.

Die aktuellen Ziele sind allerdings anspruchsvoller: Es geht darum, gezielt spezielle Moleküle zu entwerfen und herzustellen. Zum Beispiel wären aus Kohlenstoffnanoröhren zusammengesetzte Transistoren deutlich kleiner als die heute gängigen (Spektrum der Wissenschaft 10/2007, S. 84). Ingenieuren bei IBM gelang es, in einem ansonsten herkömmlich aufgebauten komplementären Metalloxid-Halbleiterschaltkreis (CMOS) das Silizium als leitendes Substrat durch eine Kohlen-

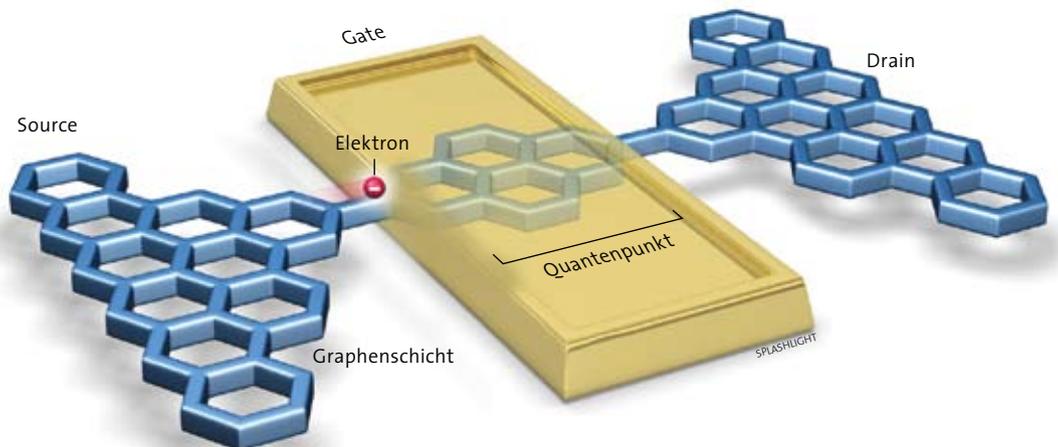


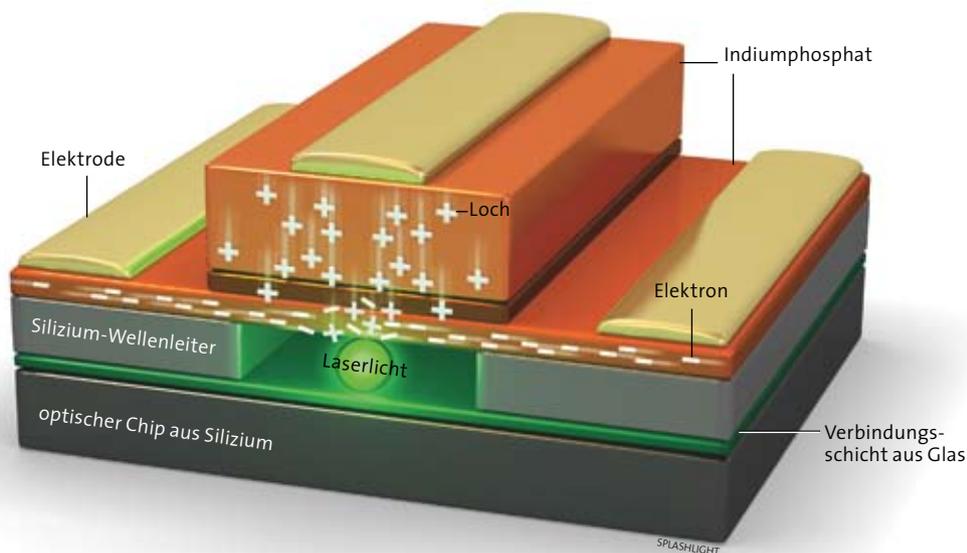
Einzug der Nanotechnologie in die Chipfertigung: Ein konventioneller Ringoszillator-Schaltkreis liegt über einer Nanoröhre aus Kohlenstoff, welche die einzelnen Bauelemente elektrisch verbindet.

stoffnanoröhre zu ersetzen (Bild oben). Einer der Beteiligten war Jörg Appenzeller, der schon 1995 an der RWTH Aachen über Transportphänomene in Halbleiterstrukturen promoviert hatte. Heute entwickelt er als Chef einer Arbeitsgruppe an der Purdue University Transistoren aus Nanoröhren.

Solche Strukturen Atom für Atom aufzubauen, kann äußerst diffizil sein, vor allem unter den Bedingungen der Massenproduktion. Wie schön wäre es, wenn die Moleküle von selbst ihren Platz finden würden! Dann würde man das Material einfach anrühren und mit etwas Energie in Form von Wärme, Licht oder Rotationsbewegung versehen, woraufhin es eine vorherbestimmte Anordnung annehmen würde (Spektrum der Wissenschaft 5/2004, S. 20).

Klassische Feldeffekttransistoren bestehen aus einer Deckschicht aus Aluminium (oder neuerdings Polysilizium), einer halbleitenden Siliziumschicht sowie – dazwischen – einer isolierenden Oxidschicht. Ein an der University of Manchester (England) hergestellter Graphentransistor (Schema rechts) hingegen ist nur ein Atom dick. Ein Quantenpunkt lässt immer nur ein einzelnes Elektron von der Source- zur Drain-Elektrode passieren – oder auch nicht, wodurch eine Eins oder eine Null dargestellt wird.





Ein optischer Chip kann schnell rechnen, falls er über eine interne, steuerbare Lichtquelle verfügt. Elektronen und Löcher in Indiumphosphat-Schichten rekombinieren in der Mitte und erzeugen dabei Licht, das sich entlang eines Wellenleiters aus Silizium und durch eine Glasschicht ausbreiten kann.

IBM-Entwickler haben demonstriert, dass diese Selbstmontage (*self-assembly*) gelingen kann. Werden bestimmte Polymermoleküle auf einem Silizium-Wafer verteilt und erwärmt, strecken sie sich und bilden eine wabenartige Struktur mit Poren von nur 20 Nanometer Durchmesser. Dieses Muster kann anschließend in das Silizium eingätzt werden und ergibt einen Speicherchip derselben Größe.

Schnellere Transistoren: Ultradünn Graphen

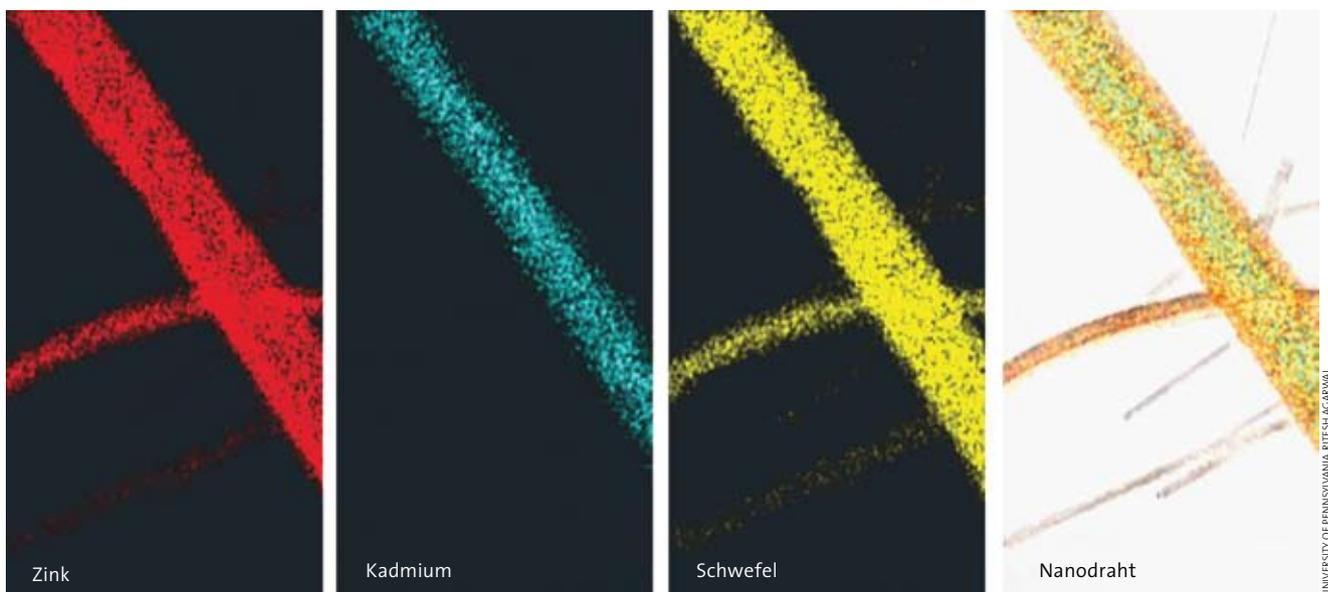
Ein kleinerer Transistor schaltet nicht nur schneller; durch die Verkleinerung verkürzen sich auch die Leitungswege auf dem Chip und damit die Zeit, die ein Signal von einem Bauteil zum anderen unterwegs ist. Nachdem die Verkleinerung an die erwähnten Grenzen stößt, kann man die Laufzeit immer noch verkürzen, indem man den Elektronen eine komfortablere Rennbahn zur Verfügung stellt.

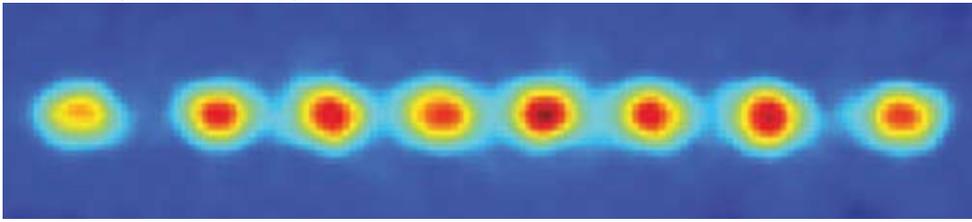
Eine solche bietet das vor sechs Jahren entdeckte Material Graphen. Es besteht aus einer ebenen Bienenwabenstruktur,

an deren Ecken Kohlenstoffatome sitzen (Spektrum der Wissenschaft 8/2008, S. 86). Das Mineral Graphit, Hauptbestandteil von Bleistiftminen, besteht aus mehreren solcher nur ein Atom dicken Schichten übereinander. Reines kristallines Graphen leitet bei Zimmertemperatur Elektronen schneller als jedes andere bekannte Material – viel schneller als heutige Feldeffekttransistoren. Da die Ladungsträger unterwegs sehr wenig Energie durch Streuung oder Kollision mit Atomen im Gitter verlieren, entsteht auch weniger Abwärme.

Weil das Material so neu ist, stehen die Untersuchungen zwar noch ganz am Anfang. Die Forscher sind aber zuversicht-

Ein dünner Nanodraht aus Zink legt sich durch *self-assembly* einen Überzug aus Kadmiumsulfid zu. Die drei linken Bilder zeigen den Anteil von Zink, Kadmium und Schwefel am Produkt. Der Draht erhält dann eine Ummantelung, indem er eine halbe Sekunde lang mit Dimethylzink bedampft wird (ganz rechts).





Mehrere Kalziumionen im Vakuum aufgereiht ergeben eine Kette von Qubits – den Grundelementen eines Quantencomputers.

lich, dass sie Graphentransistoren mit einem Durchmesser von nur zehn Nanometern herstellen können. Aus einer einzigen ein Atom dicken Graphen-»Folie« müsste man zahlreiche Schaltkreise herausätzen können (Bild S. 93 unten).

Optische Rechner: Schnell wie das Licht

Die Entwicklung radikaler Alternativen zu den herkömmlichen Chips steht erst ganz am Anfang; bis zu deren Marktreife wird wohl noch mindestens ein Jahrzehnt vergehen. So wie es aussieht, gilt Moores Gesetz dann immer noch; aber der Rekordhalter wird mit größter Wahrscheinlichkeit kein Siliziumchip mehr sein.

In einem optischen Rechner transportieren nicht Elektronen die Information, sondern Photonen, und das sehr viel schneller, nämlich mit Lichtgeschwindigkeit. Allerdings ist es viel schwieriger, den Fluss des Lichts zu steuern als den elektrischen Strom. Immerhin haben Forscher bereits optische Schalter für die Glasfaserkabel in der Telekommunikation entwickelt – erste Voraussetzung für einen echten optischen Computer. Ironischerweise dient die am weitesten gediehene Entwicklung auf diesem Gebiet dem Ziel, der konventionellen Elektronik auf die Sprünge zu helfen: Für den umfangreichen Datenverkehr zwischen den Kernen eines Multicore-Prozessors erweisen sich Kupferdrähte als so langsam, dass sie den Betrieb aufhalten. Forscher bei Hewlett-Packard entwickeln daher optische Kopplungen, die den hundertfachen Datendurchsatz bewältigen sollen.

Andere Gruppen arbeiten an optischen Bauelementen, die an Stelle von Kupferdrähten den Prozessorchip mit anderen Komponenten im Computer verbinden sollen, zum Beispiel mit Speicherchips und DVD-Laufwerken. Ingenieure bei Intel und an der University of California in Santa Barbara haben mit Hilfe konventioneller Verfahren der Halbleiterproduktion optische »Datenröhren« aus Indiumphosphat und Silizium hergestellt (Bild links oben). Für einen rein optischen Chip müssen wir aber wohl noch auf einige grundlegende Durchbrüche warten.

Molekülrechner: Bauteile aus wenigen Atomen

Was ist die kleinste Form, die ein Transistor, der elementare Baustein eines elektronischen Rechners, überhaupt annehmen kann? Wahrscheinlich lautet die richtige Antwort: ein Molekül.

Ein klassischer Transistor hat drei Anschlüsse namens Quelle (*source*), Tor (*gate*) und Senke (*drain*). Strom fließt von der Quelle zur Senke genau dann, wenn das Tor geöffnet ist – wenn also am Tor eine Spannung anliegt. Im Prinzip könnte

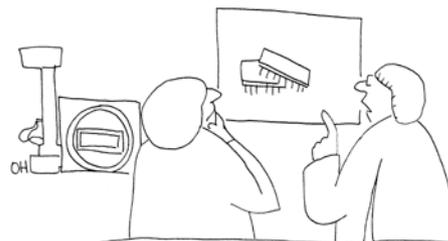
ein Molekül mit einer dreibeinigen Struktur (ähnlich dem Buchstaben Y oder dem Mercedesstern) genau diese Funktion erfüllen. In der Tat haben Forscher an der Yale University in New Haven (Connecticut) und an der Rice University in Houston (Texas) vor zehn Jahren Schalter hergestellt, deren wesentliches Bauteil ein modifiziertes Benzolmolekül war (Spektrum der Wissenschaft 8/2000, S. 38).

Schaltkreise aus Molekülen können im Prinzip um Größenordnungen kleiner sein als solche auf Siliziumbasis. Es erweist sich jedoch als schwierig, aus ihnen komplexe Schaltungen aufzubauen. Forscher hoffen, dieses Problem mittels *self-assembly* lösen zu können. Im Oktober 2009 gelang es einem Team an der University of Pennsylvania, Schaltkreise aus dem Metall Zink und dem Halbleiter Kadmiumsulfid herzustellen – durch chemische Reaktionen, die eine Selbstmontage auslösten (Bild links unten).

Quantencomputer: In den Zuständen 0 und 1 zugleich

Unterhalb der Größe eines Moleküls gibt es nicht mehr viel Gelegenheit zur Miniaturisierung: Kleiner als ein einzelnes Atom, Elektron oder gar Photon kann ein »Bauteil« nicht sein. Aber für das Verhalten solcher Teilchen gilt die Quantenmechanik, und damit tun sich neue Möglichkeiten auf. Ein Quantencomputer könnte auf geringstem Platz komplexeste Operationen ausführen; aber die technische Realisierung bereitet noch gewaltige Schwierigkeiten (Spektrum der Wissenschaft, Dossier 4/2010, »Quanteninformation«).

Quantensysteme aus Atomen oder Elektronen können spezielle Zustände bilden, die so genannten Qubits (für »Quantenbit«). Im Gegensatz zu einem gewöhnlichen Bit, das entweder den Zustand 0 oder den Zustand 1 annehmen kann, entspricht ein Qubit einer quantenmechanischen Überlagerung (»Superposition«) dieser beiden Zustände. Zum Beispiel kann der Spin (Drehimpuls) eines Elektrons



GUT, UNSERE NEUEN MIKROCHIPS PFLANZEN SICH SELBSTSTÄNDIG FORT – LEIDER SIND SIE FÜR NICHTS ANDERES MEHR ZU GEBRAUCHEN !



Rechnen mit Biomolekülen: Ein DNA-Strang (grün, rechts) reagiert mit einem anderen (rot, Mitte) und aktiviert dadurch ein Enzym (gelbes Band).

nicht nur die beiden Zustände aufwärts und abwärts annehmen, sondern auch jede beliebige Mischung dieser Zustände. Entsprechend ist der Informationsgehalt eines solchen Elektrons viel größer als der eines gewöhnlichen Transistors. Statt mit einem speziellen Wert rechnet ein Computer aus Qubits gewissermaßen mit allen möglichen Wertekombinationen zugleich.

Wissenschaftlern an der University of California in Santa Barbara ist es gelungen, mehrere unterschiedliche logische Gatter zur Verarbeitung von Qubits zu erzeugen. Dazu sperrten sie Elektronen in Hohlräume ein, die in Diamanten geätzt worden waren.

Forscher an der University of Maryland und am National Institute of Standards and Technology in Gaithersburg (Maryland) verfolgen einen anderen Ansatz: Sie halten eine Kette aus Ionen zwischen zwei geladenen Platten in der Schwebe (Bild S. 95 oben) und ändern die magnetische Orientierung der Ionen – schreiben also Qubits – mit Hilfe von Lasern. Um nach erfolgter Rechnung zu bestimmen, welche Orientierung ein Ion aufweist, werden die von ihm emittierten Photonen registriert. Das entspricht dem Lesen eines Qubits.

Quantenmechanische Systeme können nicht nur Superpositionen von Zuständen bilden, sondern auch noch »verschränkt« sein. Dabei werden Informationszustände aus vielen Qubits gebildet. Es erscheint denkbar, dass sich daraus leistungsfähige Wege zur Verarbeitung von Informationen und zu ihrer Übermittlung von einem Ort zum anderen ergeben werden.

Biologische Rechner: Lebende Chips

Eine besonders interessante Variante des Molekülrechners arbeitet mit Stoffen, die man üblicherweise in lebenden Organismen antrifft: DNA und RNA, die dort ja auch Informationsverarbeitung betreiben. Während auf einem herkömmlichen Chip von der Größe eines Fingernagels heute eine Milliarde Transistoren Platz finden, wären es in einem

biologischen Prozessor derselben Größe Billionen von DNA-Molekülen. Obendrein könnten nicht nur Tausende, sondern Millionen von ihnen parallel ein und dieselbe Aufgabe bearbeiten.

Erste realisierte biologische Schaltkreise verarbeiten Information, indem Bindungen zwischen Strängen geknüpft oder aufgetrennt werden (Spektrum der Wissenschaft 2/2010, S. 74). Forscher arbeiten zurzeit an »genetischen Computerprogrammen«, die innerhalb einzelner Zellen leben und sich dort replizieren.

Die Herausforderung besteht darin, DNA-Stränge zu »programmieren«, die hinterher frei in der Lösung schwimmen: Allein dadurch, dass sie gelegentlich miteinander reagieren, soll das erwünschte Ergebnis zu Stande kommen. Derartige Computer stehen dann nicht auf dem Schreibtisch, sondern werden in den Blutkreislauf eingespritzt. Dort sollen sie Informationen aus ihrer Umgebung aufnehmen – Beispiel: Stoff A ist im Blut im Überfluss vorhanden, nicht aber Stoff B – und bei Vorliegen gewisser Bedingungen auch auf sie einwirken, zum Beispiel durch Freisetzen eines Medikaments. Forscher am Weizman Institute of Science in Rehovot (Israel) haben bereits ein einfaches Schaltelement mit einer derartigen Funktion aus DNA hergestellt (Bild links oben; siehe auch Spektrum der Wissenschaft 3/2007, S. 66). ∞

DER AUTOR



Mark Fischetti ist Redakteur bei »Scientific American«. Er befasst sich vorwiegend mit Technikthemen.

QUELLEN

Radack, D.J., Zolper, J.C. (Hg.): A Future of Integrated Electronics: Moving off the Roadmap. In: Proceedings of the IEEE 96, 2. Februar 2008

Ran, T. et al.: Molecular Implementation of Simple Logic Programs. In: Nature Nanotechnology 4, S. 642–648, Oktober 2009

WEBLINKS

www.spektrum.de/artikel/999397

Zum Stand der Entwicklung bei den Höchstleistungsrechnern: Bericht von der Internationalen Supercomputer-Tagung 2009

www.azooptics.com/details.asp?NewsID=1524

»New Chips Call on Light Speed«: Darstellung im Optikportal Azooptics zum optischen Chip mit dem Indiumphosphatlasers

www.wissenschaft-online.de/artikel/1057403

»Selbstorganisation malt atomare Linien auf Silizium«: aktueller Bericht zu einer self-assembly von Chloratomen und Methylgruppen auf einer Siliziumoberfläche



Louann Brizendine

Das männliche Gehirn

Warum Männer anders sind als Frauen

Aus dem Amerikanischen von Sebastian Vogel.

Hoffmann und Campe, Hamburg 2010.

319 S., € 20,-

NEUROWISSENSCHAFT

Wann ist ein Mann ein Mann?

Der Herr der Schöpfung ist nur so weit unabhängig in seinen Entscheidungen und Gefühlen, wie es sein männliches Gehirn zulässt.

Männer und Frauen sind gleich. Das steht seit gut 70 Jahren im Grundgesetz, und die Gesellschaft versucht, sich an diesem Grundsatz zu orientieren. Aber irgendwie unterscheiden sich die beiden Geschlechter doch. Der Mann fühlt und lebt einfach anders. Er kämpft um seinen Platz in der Rangordnung, versucht weibliche Wesen zu beeindrucken – und neigt dazu, häufig an »das Eine« zu denken.

Für viele Frauen sind derlei Verhaltensweisen oft schwer verständlich, ja mitunter lächerlich. Und sie machen das Zusammenleben nicht einfacher. Die Partnerin, die ohne ihren eifersüchtigen Begleiter keinen Schritt vor die Haustür tun darf; die schockierten Damen, die sich gerade als die Ursache für eine Prügelei ihrer Anbeter erkennen; die Mutter, die Mühe hat, ihren Sohn vom Computerspiel zu den Hausaufgaben zu holen – sie alle fragen sich: Muss das sein? Ist es ein Erziehungsfehler, oder sind Männer einfach so?

Die amerikanische Psychiaterin und Neurobiologin Louann Brizendine beschreibt in ihrem neuen Buch, was sich im Gehirn und Hormonsystem des Mannes abspielt und welche Auswirkungen dies auf sein Verhalten und seine Gefühle hat. Sie schildert chronologisch jede Epoche seines Lebens, vom kleinen Jungen bis zum gütigen Großvater. Vor allem Punkte, die immer wieder zu Meinungsverschiedenheiten führen, erklärt die Autorin als natürli-

che Folge der geschlechtsspezifischen Unterschiede im Gehirn. Und entgegen vielen Vorurteilen stellt sie heraus, dass Männer weit komplexer reguliert werden, als die meisten Leute glauben.

Das Werk ist eine interessante Kombination aus Sachbuch und Hobbylektüre. Anhand von Erlebnissen ihrer Patienten und eigenen Erfahrungen als Mutter und Ehefrau stellt Brizendine die Eigenschaften des starken Geschlechts dar und führt sie auf neurobiologische und hormonelle Ursachen zurück. Wem die kurze und verständliche Beschreibung innerhalb der einzelnen Kapitel nicht reicht, der findet in den mehr als 400 Endnoten die Kernaussagen der Studien, die als Quellen dienten. Deren Aufzählung erfordert immerhin 69 Seiten Literaturverzeichnis!

Entspannende Einsichten

Für die meisten Leserinnen ist es sicher hilfreich zu erfahren, dass das Lustzentrum des Mannes ihn automatisch dazu veranlasst, einer attraktiven Frau nachzuschauen, egal wie verliebt er in die Seine ist. Oder dass er unter Einfluss von Testosteron dazu neigt, auch neutrale Gesichter seiner Geschlechtsgenossen als unfreundlich oder aggressiv wahrzunehmen. Schon das Wissen um solche Kleinigkeiten kann den Alltag in Partnerschaft und Familie ruhiger und angenehmer gestalten.

Louann Brizendine hat jedoch keineswegs die männlichen Hormone ins

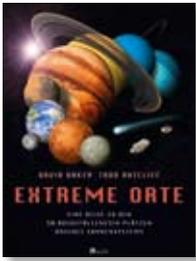
Zentrum ihrer Forschung gestellt – im Gegenteil: Als Professorin für Neuropsychiatrie an der University of California (bis 2007) beschäftigte sie sich vor allem mit weiblichen Hormonen und Stimmungslagen. In der von ihr 1994 gegründeten Women's Mood and Hormone Clinic in San Francisco behandelt sie sowohl Frauen als auch Paare. So hieß ihr erstes Buch denn auch »Das weibliche Gehirn«. Ihre langjährigen Erfahrungen mit den Sorgen und Streitthemen von Männern und Frauen kann man gut aus dem Werk herauslesen.

Die Texte sind amüsant und bildreich geschrieben. Vom »Steuerknüppel in der Hose« bis zum »Club der einsamen Herzen« bringen den Leser viele Beschreibungen zum Schmunzeln. Dennoch bleibt es ein Sachbuch, das logisch und strukturiert Wissen vermittelt. Häufig sieht die Autorin die Ursachen der männlichen Handlungen in unserer evolutionären Vergangenheit – der Mensch ist eben immer noch ein Tier. Das Buch ist auch für Laien gut verständlich, weil Brizendine die entscheidenden Hirnareale und Hormone gleich am Anfang kurz erläutert. Auffällig ist, dass der wissenschaftliche Anhang fast die Hälfte des Buchs ausmacht. Es war der Autorin offenbar wichtig, jede ihrer Thesen zu untermauern.

Zunächst entsteht der Eindruck, als wolle das Buch im Wesentlichen den Frauen helfen, die Männer besser zu verstehen. Aber meiner Meinung nach ist es für beide interessant – sie durchschaut endlich den Hintergrund vieler seiner Verhaltensweisen, während er sich freut, sich selbst besser zu verstehen. Auch wenn sich nicht jeder Mann in den oft etwas extremen Beispielen wiederfindet – ich habe in fast jedem Fall einen Freund oder Verwandten gefunden, auf den sie passen. Alles in allem ein bemerkenswertes Buch: angenehm zu lesen, gut verständlich und mit Sicherheit eine Bereicherung für das Zusammenleben der Geschlechter.

Gabi Warnke

Die Rezensentin ist Neurobiologin und Redaktionspraktikantin bei »Spektrum der Wissenschaft«.



David Baker, Todd Ratcliff

Extreme Orte

*Eine Reise zu den 50 ausgefallensten Plätzen
unseres Sonnensystems*

Aus dem Amerikanischen von Monika

Niehaus. Rowohlt, Reinbek 2010.

283 S., € 24,95

ASTRONOMIE

2010 – Odyssee im Sonnensystem

Einer Irrfahrt gleich reist der Leser dieses Buchs zu den wichtigsten Orten unseres Planetensystems und ihren spektakulären Naturschauspielen.

Wer unseren Nachbarplaneten mit Teleskopen, Spektrografen oder gar Raumsonden auf den Leib rückte, konnte eine Überraschung nach der anderen erleben. Die beiden NASA-Planetologen David Baker und Todd Ratcliff – der eine Experte für atmosphärische, der andere für geologische Prozesse – haben eine Reiseroute zu den eindrucksvollsten Plätzen des Sonnensystems zusammengestellt, die manches mit der Irrfahrt des Odysseus gemein hat. Dieser begegnete auf seinem jahrzehntelangen Weg so exotischen Gefahren wie Zyklopen, Menschenfressern, Zaubерinnen, Mahlströmen und zerstörerischen Stürmen.

Ein Astronaut, der dem in diesem Buch eingeschlagenen Kurs folgt, wäre weit länger als der Held aus Ithaka unterwegs und hätte nicht minder lebensbedrohliche Situationen zu bestehen: Staubwirbel auf dem Mars, so hoch wie der Mount Everest, den Großen Roten Fleck des Jupiters, einen Zyklon, der seit mindestens drei Jahrhunderten ununterbrochen tobt, Vulkane auf dem Neptunmond Triton, deren Lava kälter ist als die Eismassen der Antarktis, den Jupitermond Io, der wahrlich atemberaubend zum Himmel stinkt, und die Atmosphäre von Uranus oder Neptun, die das fiktive Raumschiff mit einem Hagelschauer aus Diamanten traktieren.

Die Autoren haben die Reise zu den 50 – nach gegenwärtigem Kenntnisstand – extremsten Orten des Sonnen-

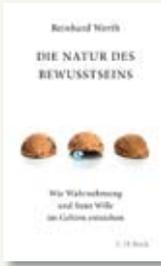
systems nicht nach räumlichen Kriterien («von innen nach außen» oder «von nah nach fern») organisiert, sondern nach thematischen. Dadurch bewegt man sich im Zickzackkurs fort und kehrt des Öfteren auf einen bereits besuchten Himmelskörper zurück, um eine weitere Sehenswürdigkeit kennen zu lernen. Insofern weicht das Buch von klassischen Lehr- oder Sachbüchern ab, was die Eignung als Nachschlagewerk mindert, das Lesevergnügen aber erhöht.

Um dieses sind die Autoren auch überaus bemüht und befleißigen sich einer möglichst umgangssprachlichen Ausdrucksweise, insbesondere am Anfang und am Schluss der vier- oder fünfseitigen Kapitel. Dies wirkt manchmal – besonders für deutsche Geschmäcker – übertrieben flapsig, fast comicartig und will auch nicht so ganz zu den fundierten Sachtexten passen. Die sind nämlich durchaus anspruchsvoll und verwenden allerlei Fachbegriffe – nur leider nicht immer mit der notwendigen Erklärung.

Von der Sonne mit ihren diversen Aktivitäten bis hinaus zur Oortschen Wolke, in der viele Kometen auf ihren Einsatz warten, und der »grünen Grenze« zu den benachbarten Sternsystemen gibt das Werk sehr aktuell den Kenntnisstand über unsere nähere kosmische Heimat wieder. Dass dies nicht in allen Einzelheiten vollständig geschehen kann, versteht sich bei dem handlichen Umfang von unter 300 Sei-



Durch schwerkraftbedingte Kontraktion werden im Inneren des Jupiters rund 70 Prozent mehr Wärme erzeugt, als der Planet von der Sonne empfängt. Das hält die Atmosphäre in ständiger turbulenter Bewegung. Psychedelische Wolken aus Wasser, Ammoniak und Methan hüllen den Sturmplaneten in ein farbenprächtiges Kleid.



Reinhard Werth

Die Natur des Bewusstseins. Wie Wahrnehmung und freier Wille im Gehirn entstehen

C.H.Beck, München 2010. 233 S., € 19,95

Reinhard Werth, Neuropsychologe an der LMU München, setzt sich zum Ziel, das Konzept Bewusstsein wissenschaftlich präzise zu beschreiben. Hierzu stellt er Fälle aus seiner eigenen klinischen Praxis vor, in denen eine Hirnschädigung Teile des Bewusstseins verändert oder zerstört hat, bis hin zum Verlust einer Großhirnhälfte oder gar des gesamten Großhirns. Wie heute praktisch alle Neurowissenschaftler sieht Werth Bewusstsein als Ergebnis der Funktion neuronaler Netzwerke. Stirbt das Gehirn, ist auch das Bewusstsein unwiederbringlich verloren. Gleichwohl plädiert er für die Existenz eines freien Willens, obwohl er Hirnfunktionen als notwendige und hinreichende ursächliche Bedingungen für Willensentscheidungen betrachtet. Ein lesenswertes Buch, das auch zwei Situationen anspricht, in denen die Frage nach der Willensfreiheit von existenzieller Bedeutung wird: bei der Verantwortung für eine Straftat und bei der Patientenverfügung.

HARTWIG HANSER



Angelika Franz

Der Tod auf der Schippe – oder was Archäologen sonst so finden

Theiss, Stuttgart 2010. 192 S., € 14,90

Womit befassen sich Archäologen? Mit der fernen Vergangenheit? Nicht nur. Auch die Reste einer 1969 abgebrannten Hippiekommune und ein soeben außer Betrieb genommenes Auto gehören zu ihren Forschungsgegenständen. Graben sie denn wenigstens? Nicht unbedingt. Manche stellen auch antike Leinenpanzer her und erproben alte Brauzrepte. Die promovierte Archäologin Angelika Franz hat in diesem Buch 40 Geschichten, die zuvor bei »Spiegel online« erschienen waren, zusammengetragen – eine wahrhaft bunte, süffig geschriebene Mischung. Viel öfter als den Tod hätten die Archäologen »etwas ganz anderes auf der Schippe: das pralle Leben«, schreibt sie im Vorwort. Zu dumm, dass die eindrucksvollsten Geschichten von Todesarten erzählen, die man seinem ärgsten Feind nicht wünschen möchte, und sei es nur, weil den Forschern bei einem lücken- und rätselhaften Fund nichts anderes als eine sehr grausige Erklärung eingefallen ist.

CHRISTOPH PÖPPE



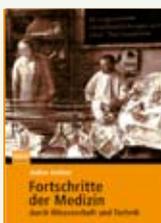
Sarah Blaffer Hrdy

Mütter und andere / Mothers and Others. Wie die Evolution uns zu sozialen Wesen gemacht hat

Aus dem Amerikanischen von Thorsten Schmidt. Berlin Verlag, Berlin 2010. 540 S., € 28,-

Die bekannte amerikanische Primatologin und Anthropologin Sarah Blaffer Hrdy beleuchtet die Wurzeln des Menschseins aus der Perspektive des sozialen Miteinanders. Im Zentrum ihrer Darstellung steht die Fähigkeit des Menschen, sich in andere einzufühlen und daraus deren Handlungsziele zu erschließen. Diese Kompetenzen – zumindest das Bestreben danach – haben schon wenige Wochen alte Kinder in einem hohen Grad. Laut Hrdy waren sie unter urzeitlichen Bedingungen darauf angewiesen, denn die Kinderfürsorge verteilte sich damals auf mehrere Personen. Die Mutter allein wäre überfordert gewesen. Babys mussten darum Zuwendung erkennen und aktiv auslösen können, etwa durch Mimik oder Laute. Hierin unterscheiden sie sich bis heute eindeutig von jungen Menschenaffen. »Emotional modern« wurden Menschen laut Hrdy lange, bevor moderne Kognition auftrat.

ADELHEID STAHNKE



Andras Gedeon

Fortschritte der Medizin durch Wissenschaft und Technik

99 wegweisende Veröffentlichungen aus fünf Jahrhunderten

Aus dem Englischen von Martina Wiese. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2010. 552 S., € 59,95

Es ist eine nette Idee, die Geschichte des medizinischen Fortschritts anhand von historischen Dokumenten darzustellen. Der Farbband zeigt für 99 Durchbrüche zwischen 1528 und 1985 jeweils einen Ausschnitt aus der damaligen Veröffentlichung zusammen mit Originalzeichnungen. Ein kurzer Kommentar stellt den Urheber vor, der in manchen Fällen – wie Albrecht Dürer – nur nebenbei Wissenschaftler war, und ordnet die Entdeckung ein. Die Folgeseiten dokumentieren, wieder anhand von Originalgrafiken und -bildern, was aus der Entdeckung geworden ist. Es macht Spaß, in dem Buch zu blättern und sich von einzelnen Geschichten fesseln zu lassen. Systematisch durchlesen wird es aber wohl nur jemand mit ausgeprägtem Interesse an Medizingeschichte.

GERHARD TRAGESER

ten von selbst. Dennoch werden nicht nur Laien, sondern auch Astronomen oder Geophysiker anderer Fachrichtungen noch die eine oder andere Neuigkeit in dem Buch entdecken.

Die Informationsfülle macht sich schon auf den ersten Blick bemerkbar, denn die Autoren verzichten auf den Einsatz großformatiger Bilder zu Gunsten einer Vielzahl kleinerer Fotos und Infografiken. Obendrein enthalten die Bildunterschriften oft zusätzliches, über das Bild hinausgehendes Material. Der ausufernde Platzbedarf der Abbildungen samt Zubehör und ein ungeschicktes Layout lassen den eigentlichen Haupttext an vielen Stellen zu isolierten Inseln verkommen, was den Lesefluss unnötig stört. Zudem scheinen die Bildunterschriften nicht aus derselben Feder zu stammen wie der Haupttext, denn sie enthalten trotz geringerer Textmenge deutlich mehr Fehler. Inkonsequente oder gar stehen gebliebene englische Bildbeschriftungen sind ein weiterer Minuspunkt.

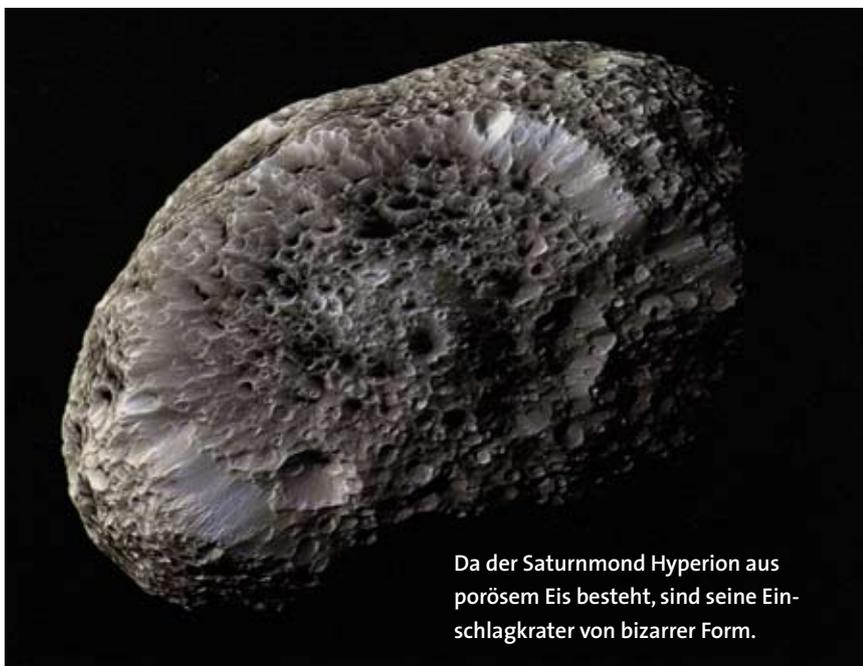
Gelegentlichen sprachlichen und sachlichen Fehlern zum Trotz sind Übersetzung und deutsche Bearbeitung insgesamt auf solidem, leicht überdurchschnittlichem Niveau. Dabei ist anzuerkennen, dass der Verlag die deutsche Ausgabe bereits wenige Monate nach dem Original veröffentlicht hat.

Wer möchte, kann sich auf der (englischen) Webseite extremesolarsystem.com einen Überblick über die Inhalte, die Autoren und ihren Schreibstil verschaffen. Hat man das Buch schließlich gelesen, kann man hier online eine Stimme für sein »Lieblings-Extrem« abgeben. Derzeit führt in der Hitliste die »Extreme Erde« mit sechs Prozent aller Stimmen knapp vor Jupiters Großem Rotem Fleck, Ios Gestank nach faulen Eiern, dem Klima auf Uranus und Neptun sowie dem »Leben im Dunkeln« auf dem Blauen Planeten und – vielleicht – dem Jupitermond Europa.

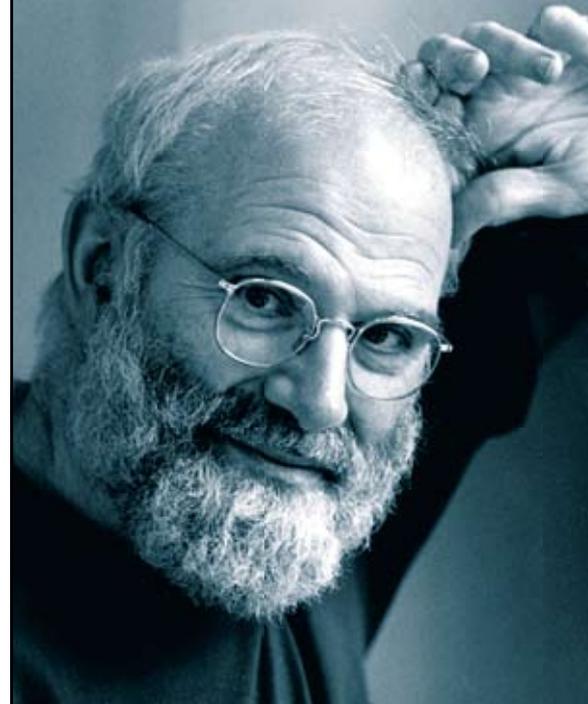
Apropos: Dass das Buch auch die Erde in dieser Ansammlung rekordverdächtiger Orte des Sonnensystems aufführt, ist völlig berechtigt. Mit den Kontinentalplatten, Ozeanen, ihrem einzigartigen Mond, dem Klimageschehen und allem, was auf ihr so krecht und fleucht, ist sie wahrhaft ein Ort, wo »die Extreme sich summieren«. Folgerichtig lassen Baker und Ratcliff die Reise hier zu Ende gehen – gleich der Irrfahrt des Odysseus, der nach 20 Jahren und manch überstandener Gefahr schließlich auch nach Hause kommt.

Oliver Dreissigacker

Der Rezensent arbeitet als Redakteur beim »Physik Journal« und als freier Wissenschaftsjournalist in Mannheim.

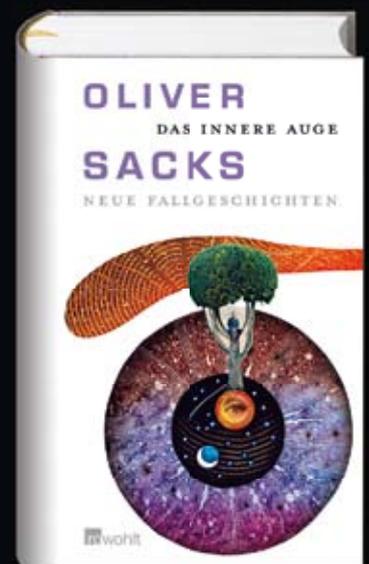


Da der Saturnmond Hyperion aus porösem Eis besteht, sind seine Einschlagkrater von bizarrer Form.



Was das Auge uns erzählt

Der New Yorker Neurologe und Geschichtenerzähler lotet den Zusammenhang von visueller Wahrnehmung und Bewusstsein aus.



Aus dem Englischen von Hainer Kober
288 Seiten. Gebunden
€ 19,95 (D) / € 20,60 (A) / sFr. 30,50 (UVP)



Len Fisher
Schere, Stein, Papier
 Spieltheorie im Alltag
 Aus dem Englischen von Andreas Held.
 Spektrum Akademischer Verlag,
 Heidelberg 2010. 283 S., € 19,95

SPIELTHEORIE

Kooperation ist machbar

Mit großem Optimismus beschreibt Len Fisher Möglichkeiten, die klassischen Dilemmata der Spieltheorie zu überwinden.

Der Chemiker, Physiker und Biologe Len Fisher, nach einer internationalen Karriere derzeit als Gastwissenschaftler an der University of Bristol tätig, hat sich weltweit einen Namen mit gut verständlicher, unterhaltsamer und alltagsbezogener populärwissenschaftlicher Literatur gemacht. Ein Kapitel aus seiner »Reise zum Mittelpunkt des Frühstückseis« (rezensiert in Spektrum der Wissenschaft 6/2003, S. 102) brachte ihm 1999 sogar den Ig Nobel-Preis für nichtswürdige Wissenschaft in Physik ein: für die Bestimmung des optimalen Verfahrens, einen Keks in den Tee zu tunken (vergleiche Spektrum der Wissenschaft 12/2010, S. 32). Mit dem vorliegenden Band wird Fisher seinem Ruf als begnadeter Autor wieder einmal gerecht.

Die noch relativ junge Spieltheorie ist an der Schnittstelle von Mathematik, Soziologie und Psychologie verortet und nimmt auch in den Wirtschaftswissenschaften eine stetig wachsende Rolle ein. Ihr Anliegen ist es, Entscheidungssituationen zu modellieren und aus solchen »Spielen« Strategien für erfolgreiches Verhalten abzuleiten. Damit findet sie überall dort Anwendung, wo Menschen interagieren und Entscheidungen treffen.

Vor allem geht es um die Frage, unter welchen Umständen die Spieler miteinander kooperieren – oder es eben nicht tun, weil sie darin einen individuellen Vorteil für sich sehen. Besonders spannend wird diese Analy-

se, wenn die Spieler durch Kooperation zwar sowohl den Gesamtnutzen maximieren als auch einen hohen eigenen Nutzen einfahren könnten, sich dagegen entscheiden, weil das bei isolierter Betrachtung jedes denkbaren Einzelfalls für sie persönlich vorteilhafter ist, und am Ende weitaus schlechter dastehen als bei gegenseitiger Kooperation. Ein klassisches Beispiel hierfür ist das berühmte Gefangenendilemma (Spektrum der Wissenschaft 2/1998, S. 8).

In den ersten Kapiteln gibt Fisher eine kurze, aber umfassende Einführung in die Spieltheorie. Hauptsächlich geht es ihm jedoch darum, aufzuzei-

Quantenmechanische Pseudotelepathie entzieht eigensüchtigem Verhalten die Grundlage

gen, dass diese Theorie helfen kann, die von ihm identifizierten »sieben sozialen Dilemmas« zu lösen. Das sind neben dem Gefangenendilemma unter anderem die übermäßige Ausnutzung von öffentlichen Gütern (»tragedy of the commons«), Trittbrettfahrerverhalten oder der »Kampf der Geschlechter«: Mann und Frau würden am liebsten gemeinsam etwas unternehmen, können sich jedoch nicht auf einen Vorschlag einigen, sind am Ende getrennt unterwegs und daher unzufrieden. All diesen Dilemmata ist gemein, dass die Beteiligten, ob aus Eigennutz oder aus Misstrauen dem anderen gegenüber, nicht kooperieren, obwohl das sowohl die Ge-

samtauszahlung als auch den eigenen individuellen Nutzen steigern würde – ein grundsätzliches Problem, das in der Spieltheorie seit ihrem Bestehen kontrovers diskutiert wird.

Ausführlich beschreibt Fisher deshalb, welche Bedingungen einer Kooperation förderlich sind: die Möglichkeit, erneut aufeinanderzutreffen (direkte Reziprozität), die Sorge um das eigene Ansehen (indirekte Reziprozität), die Androhung von Strafe, besonders durch die soziale Gruppe (Netzwerkreziprozität), eine Kombination aus goldener Regel und Vergeltungsmaßnahmen, falls der andere Spieler den Kooperationspfad verlässt sowie räumliche und menschliche Nähe der Spieler.

Bekannte Strategien, die das Prinzip der Vergeltung realisieren, sind »Tit for Tat« (»Wie du mir, so ich dir«) und deren Verfeinerung »win-stay/lose-shift«: Hast du gewonnen, bleibe bei deinem Verhalten; hast du verloren, wechsele zum entgegengesetzten.

All diese Umstände erhöhen das Vertrauen darauf, dass sich auch der Partner an die implizite Vereinbarung zur Kooperation halten wird – nach Fisher die wesentliche Voraussetzung dafür, dass Kooperation überhaupt angeboten wird.

Der Autor nimmt eine sehr optimistische Grundhaltung ein: Grundsätzlich seien die sieben Dilemmata immer lösbar. Man müsse nur die Bedingungen des Spiels so gestalten, dass mindestens einer der vertrauensfördernden Mechanismen zur Anwendung kommt und eine Abkehr von der Kooperation unattraktiv erscheinen lässt. So kann der Spieler sich selbst glaubhaft zur Kooperation verpflichten, wofür Fisher mehrere Möglichkeiten aufzeigt: Beide Spieler beziehen eine dritte Person ein, etwa als Schlichter oder Wächter über eine »Kooperationskauti- on«, oder sie stellen eine der genannten Formen von Reziprozität her.

Typischerweise besteht ein Spiel darin, dass alle Beteiligten ihre Entscheidungen für sich treffen, dann alle anderen damit überraschen, aber eben auch selbst von den Entscheidungen der anderen überrascht werden. Das titelgebende Spiel »Schere, Stein, Papier« ist dafür ein einleuchtendes Beispiel. Nun liefert die Quantenkryptografie ein Verfahren, mit dem jeder Spieler seine Absichten vorab und unwiderruflich zur Kenntnis geben kann, aber so, dass andere Spieler ihn dadurch nicht aufs Kreuz legen können. Eine solche Absichtserklärung wäre also nicht »Ich werde unter allen Umständen kooperieren« – was zum Ausnutzen einlädt –, sondern »Ich werde kooperieren, wenn alle anderen das auch tun«.

Alle Absichten zusammen werden mit Hilfe verschränkter Qubits (»Quanten-Bits«) an sämtliche Spieler derart übermittelt, dass alle sich darauf verlassen können, aber niemand die Absichten eines einzelnen Mitspielers erfährt.

Diese quantenmechanische »Pseudo-Telepathie« entzieht dem eigensüchtigen Verhalten die theoretische Grundlage und hat in Laborversuchen tatsächlich zu mehr Kooperation geführt. Noch ist sie nicht im großen Maßstab einsetzbar, eröffnet aber viel versprechende Möglichkeiten für die Zukunft.

Nach diesem Ausblick fasst Fisher schließlich zehn alltagstaugliche Methoden zur Lösung der sieben Dilemmata kurz und prägnant zusammen.

Insgesamt ist das Buch gut lesbar, auch dank der zahlreichen amüsanten Beispiele, die oft aus dem Leben des Autors stammen. Stellenweise fällt unangenehm auf, dass sich Wortwahl und Satzstruktur in der Übersetzung sehr ans englische Original anlehnen, was den Lesefluss jedoch nicht gravierend stört. Fisher kommt fast ohne Fachwörter aus; die wenigen Ausnahmen führt er vorher gut verständlich ein. Er verzichtet auch auf Formeln. Die für die Spieltheorie typischen

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

Auszahlungsmatrizen leuchten mit ihren Smiley-Kombinationen an Stelle der sonst üblichen willkürlichen Zahlenbeispiele auch Fachfremden auf den ersten Blick ein. Sehr hilfreich ist der umfangreiche Anmerkungsapparat mit zusätzlichen Erklärungen, Hintergrundinformationen und Literaturhinweisen.

Güde Thomas

Die Rezensentin steht kurz vor ihrem Magister in Japanologie, Volkswirtschaftslehre sowie Wirtschafts- und Sozialgeschichte an der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg. Seit einer Schülerakademie begeistert sie sich für die Spieltheorie.

www.spektrum.de/aboplus

Der Premiumbereich – exklusiv für Abonnenten von Spektrum der Wissenschaft

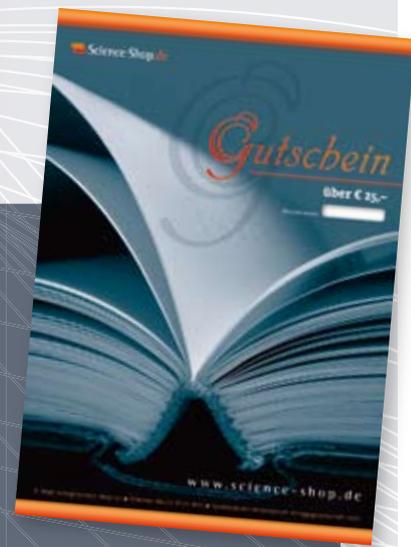


Treue Leser von **Spektrum der Wissenschaft** profitieren nicht nur von besonders günstigen Abokonditionen, exklusiv auf sie warten unter www.spektrum.de/aboplus auch eine ganze Reihe weiterer hochwertiger Inhalte und Angebote, unter anderem:

■ alle **Spektrum der Wissenschaft**-Artikel seit 1993 im Volltext

▶ ein Mitgliedsausweis, dessen Inhaber in zahlreichen Museen und wissenschaftlichen Einrichtungen Vergünstigungen erhält

▶ unter allen Abonnenten verlosen wir jeden Monat 4 Gutscheine im Wert von € 25,- für den Science-Shop.de



Nur Fliegen ist schöner

»Zurzeit lässt ein besonderes Projekt aufhorchen, das die Ford-Motor Company in Amerika in Bearbeitung hat. Es handelt sich um ein Schienenfahrzeug mit dem Na-

men ›Levacar‹, das auf einer kaum millimeterdicken Luftschicht mit einem Tempo bis zu 1600 km/h über Stahl-schienen dahergleiten wird. Der Erfinder ist Dr. A. Kucher, ein Ingenieur auf den Gebieten des Fahrzeug- und Flugzeugbaus sowie der Kälte-

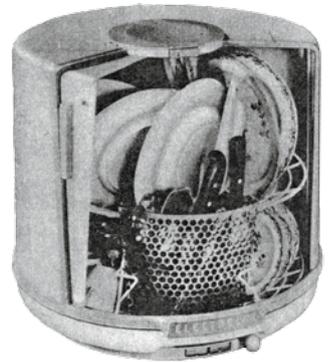
technik. Der ›Levacar‹ ruht auf perforierten Stahlsohlen, aus denen unter hohem Druck Luft austritt, die den 1 mm dicken Luftfilm bildet, der als ideales Schmier- und Gleitmittel dient.« Neuheiten und Erfindungen, Januar/Februar 1961, S. 6

Kombinierte Therapie bei Krebs

»Es liegen heute bereits gesicherte Ergebnisse über die Möglichkeit einer Chemotherapie maligner Tumoren sowohl im Tierversuch als auch in der Klinik vor. So wird wohl die Anwendung der Chemotherapie gleichberechtigt neben die der Operation und Bestrahlung treten. Werden beispielsweise Tumorzellen durch Röntgen- oder Radiumstrahlen zerstört, so muß anschließend versucht werden, durch Verhinderung oder Bremsung des Neuaufbaus der für die Tumorzellen notwendigen Nukleinsäuren einem erneuten Wachstum Einhalt zu gebieten. Wahrscheinlich wird in Zukunft auch bei Tumoren eine kürzere oder längere Chemoprophylaxe vor der Operation und eine entsprechende Nachbehandlung unvermeidbar sein, so wie es heute schon keine Operation bei der Tuberkulose gibt, ohne eine Chemoprophylaxe.« Naturwissenschaftliche Rundschau, Februar 1961, S. 71

In der Küche geht's rund

»Dieses Gerät bedeutet das Ende einer der unbeliebtesten Küchenarbeiten – des Geschirrspüls. Ein Spülautomat für den Durchschnittshaushalt, der mit einem Elektromotor und Leitungswasser betrieben wird. Der eingebaute Geschirrkorb dreht sich und das Spülwasser wird aus Sprühdüsen unter Druck ausgestoßen. In 6 Minuten ist der gesamte Abwasch des Mittagessens



Und es dreht sich doch: Geschirr im Spülautomaten

von 5 Personen erledigt, Abtrocknen inklusive. Die Geschirrspülmaschine muß nach Gebrauch nicht gespült werden.« Populäre Mechanik, Februar 1961, S. 40



Das Ende der Dampflok

»Die von den Siemens-Schuckert-Werken ausgerüsteten beiden ersten Wechselstromlokomotiven sind zu Probefahrten in Dienst gestellt worden. Die ersten Fahrten, bei denen bis 350 t Gewicht gezogen und Geschwindigkeiten von 100 km/st erreicht wurden, sind sehr gut verlaufen. Die Erfahrungen lassen erkennen, daß der elektrische Vollbahnbetrieb in technischer Hinsicht den Forderungen entsprechen wird.« Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure, 18. Februar 1911, S. 276

Erzkonservative Akademie

»Am 23. Januar hatte sich des gebildeten Teils des Publikums von Paris und Frankreich eine gewisse Aufregung bemächtigt – es handelte sich um die Wahl eines neuen Mitgliedes der französischen Akademie. Zum erstenmal stand eine Frau in der Reihe der Kandidaten, Marie Sklodowska Curie. Wie bekannt, ist die Dame bei der Wahl unterlegen. Die Person des Siegers und der Unterlegenen kommen hier erst in zweiter Linie in Betracht, es handelt sich vielmehr in erster Linie um das Prinzip, ob einer Frau der Zutritt zur Akademie gestattet werden solle, und diese Frage ist im negativen Sinne beantwortet worden.« Die Welt der Technik, Februar 1911, S. 62–63



Marie Curie – eine geniale Forscherin in einer Männerwelt

Wertvolles Abwasser

»Die Verunreinigung der Flüsse und Seen durch Einleitung der aus Haushalt und Fabriken entstammenden Abwässer ist infolge der Großstadtentwicklung und der Ausdehnung der Industrie in raschem Anwachsen

begriffen. Um die schädigende Wirkung zu vermindern, ist man seit einer Reihe von Jahren bestrebt, durch Kläranlagen eine schnelle Beseitigung oder Reinigung der Abwässer zu erreichen. Brunn in Österreich besitzt seit zwei Jahren als erste Stadt eine Einrichtung nach Prof. M. Honig. Nach der

zweijährigen Analyse enthält das Kubikmeter 16600 gr. feste Bestandteile. Die getrockneten Rückstände werden in Retorten, ähnlich denjenigen, die zur Fabrikation von Leuchtgas dienen, gebracht. Das gewonnene Gas besitzt gleiche Eigenschaften wie das Kohlengas.« Die Umschau, 25. Februar 1911, S. 188

AUS ZEITSCHRIFTEN DER FORSCHUNGSBIBLIOTHEK FÜR WISSENSCHAFTS- UND TECHNISCHES GESCHICHTE DES DEUTSCHEN MUSEUMS

NEUE SERIE**Die 12 größten Rätsel der Philosophie**

Was sind die brennenden Grundfragen der gegenwärtigen Philosophie – und welche Rolle spielt das altherwürdige Fach überhaupt noch für die moderne Wissenschaft? Führende zeitgenössische Philosophen geben Antworten

**DIE THEMEN IM ÜBERBLICK**

- Wer bin ich?
- Bewusstsein
- Willensfreiheit
- Mensch und Tier
- Wirklichkeit
- Gefühl und Vernunft
- Philosophie der Physik
- Philosophie der Biologie
- Gerechtigkeit
- Menschenrechte
- Sprache und Denken
- Den anderen verstehen

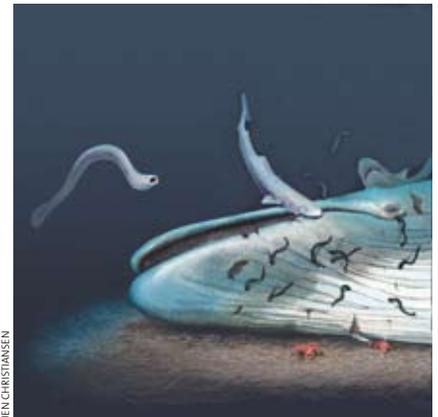
FOTOLIA / DMITRI IUNYKH



KRISTINRIEBE

Die Anatomie des Neutrons

In den letzten Jahrzehnten haben aufwändige Experimente neue Einsichten in den inneren Aufbau des Neutrons gebracht. Das Teilchen ist keineswegs nur langweiliger Ballast, sondern weist ein faszinierendes Innenleben auf



JEN CHRISTIANSEN

Ökosystem Walkadaver

Ein toter Wal auf dem Meeresgrund bietet einer besonderen Tierwelt gute Lebensbedingungen – auf Jahrzehnte! Derartige Ökosysteme dürften schon vor den Meeressäugern entstanden sein

Nützliches Giftgas

Schwefelwasserstoff ist giftig. Dennoch stellt unser Körper winzige Mengen davon her. Das Gas scheint verschiedenste Funktionen günstig zu beeinflussen und dürfte etwa bei Herz-, Kreislauf- oder Darmleiden helfen

Forschender Roboter

Ein neuer Computer-Prototyp kann Hypothesen aufstellen, sie eigenständig experimentell testen und die Resultate bewerten – alles ohne menschliches Zutun

NEWSLETTER

Möchten Sie regelmäßig über die Themen und Autoren des neuen Hefts informiert sein?

Wir halten Sie gern auf dem Laufenden: per E-Mail – und natürlich kostenlos.

Registrierung unter:

www.spektrum.com/newsletter