

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

SCHWERPUNKT

AIDS

KOMMT DER
HIV-IMPfstOFF?

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC AMERICAN

DATENSPEICHER

Nanodrähte
statt Festplatten?

MOND

Warum hat er
zwei Gesichter?

GAIA-HYPOTHESE

Kein Schutz
durch die Erdgöttin

Warum die Neandertaler ausstarben

War *Homo sapiens* wirklich
klar überlegen?



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



www.spektrum.de

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

11/09

NOVEMBER 2009



Reinhard Breuer
Chefredakteur



Eine Welt ohne Phosphor?

Die Phosphorvorräte neigen sich dem Ende zu.

Phosphor? Ja, genau: Der Stoff, der im Dunkeln leuchtet und Streichhölzern beim Zünden hilft. Er steht vielleicht nicht gerade weit vorn im öffentlichen Bewusstsein, aber vor allem die Landwirtschaft hängt kritisch von Phosphor ab, denn 90 Prozent der jährlich geförderten Menge gehen in die Kunstdüngerproduktion. Ohne Kunstdünger könnte die Ernährung einer wachsenden Weltbevölkerung nicht aufrechterhalten werden.

Doch wie alle Schätze, die die Erdkruste birgt, sind auch die Phosphorvorräte begrenzt, und das Ende der prospektierten Volumina ist absehbar. Die kontinentalen Vorkommen reichen womöglich nur noch für wenige Jahrzehnte. Spätestens seit dem ersten Bericht des Club of Rome von 1972 über die »Grenzen des Wachstums« weiß jeder: Alle Ressourcen gehen einmal zu Ende. Die Frage ist nur, wann und mit welchen Konsequenzen.

Beim Öl sind sich die Experten nicht sicher, ob wir kurz vor dem »Oil Peak« stehen oder ihn sogar schon überschritten haben. Jedenfalls werden die Reserven künftig nur zu steigenden Kosten förderbar sein. Auch bei anderen Wertstoffen gerät der Horizont der Endlichkeit immer deutlicher in den Blick. Zwar würde nicht jede Erschöpfung begehrter Metalle, Halbleiter oder seltener Erden gleich unsere biologische Existenz bedrohen, doch die globale Wirtschaft geriete allemal aus dem Tritt. Ohne gewisse Produkte der Mikroelektronik oder Lasertechnik geht vielleicht unsere Welt nicht unter – ohne Phosphor aber schon (S. 78).

Seit Langem rätseln Anthropologen, warum der Neandertaler ausstarb und der *Homo sapiens* – die Titelgrafik zeigt übrigens einen Ausschnitt aus

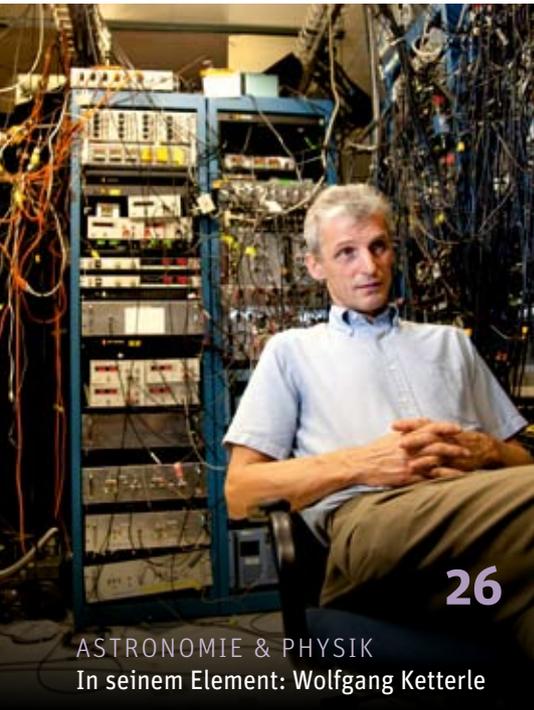
dem Titelblatt von SdW 3/2000 – als einzige Hominidenart übrig blieb. Fossilien weisen darauf hin, dass die letzten Neandertaler noch bis vor 28 000 Jahren an der Südspitze Spaniens lebten. Ketznerisch gefragt: Würde es groß auffallen, wenn tatsächlich ein Neandertaler in Designerklamotten, mit Gelfrisur und Goldkettchen durch die Fußgängerzone schlenderte?

Vielleicht erst auf den zweiten Blick oder während einer kurzen Unterhaltung. Über Sprache verfügte der Neandertaler jedenfalls, und so beeilen sich Anthropologen zu versichern, dass die Urmenschen klüger und vielseitiger waren als bislang gedacht. Auch als Überlebenskünstler muss der moderne Mensch es ihnen erst noch gleichtun: Die ältesten Neandertalerknochenrelikte werden auf 130 000 Jahre taxiert. Warum die Urmenschen trotzdem verschwanden?

Einen überfallartigen Krieg mit Kämpfen Mann gegen Mann wird es kaum gegeben haben. Schließlich lebten beide Hominidenarten rund 15 000 Jahre lang gemeinsam in Europa und Asien. Erst kürzlich meldeten Mitarbeiter des Paläogenetikers Svante Pääbo in Leipzig, dass die Neandertalerpopulation höchstens 70 000 Mitglieder umfasst haben konnte – in ganz Europa! Da die *Homo-sapiens*-Gemeinde während der letzten Eiszeit wohl auch nicht unbedingt um so vieles größer war, mussten unsere Vorfahren sich doch eher anstrengen, um den fernen Verwandten überhaupt einmal zu begegnen. Brachial ausgerottet scheint *Homo sapiens* den Neandertaler jedenfalls nicht zu haben (S. 68).

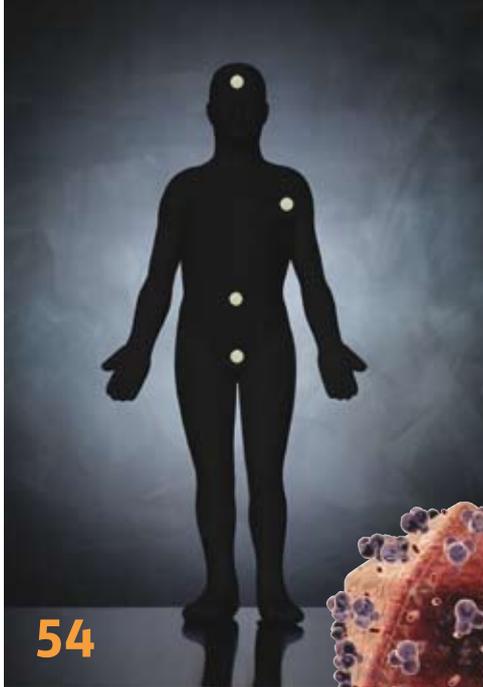
Herzlich Ihr

Reinhard Breuer



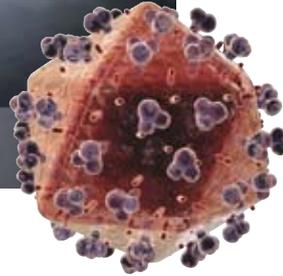
ASTRONOMIE & PHYSIK
In seinem Element: Wolfgang Ketterle

26



54

MEDIZIN & BIOLOGIE
Neue Strategien gegen
das Aidsvirus



78

ERDE & UMWELT
Phosphor für Dünger wird knapp



AKTUELL

- 12 Spektrogramm**
Ferner Planetencrash · Tunneln aus der zweiten Reihe · Europas erste Bauern · Sporen mit Tarnkappe u. a.
- 15 Bild des Monats**
Hubble enthüllt Schmetterling
- 16 Madonna mit Schildlauslack** 
Interessante kulturhistorische Erkenntnisse dank neuer Spektroskopiemethode
- 17 Wirtschaftliches Strohfeuer**
Die Rodung des Regenwalds bringt den Menschen nur vorübergehend Wohlstand
- 20 Parasitenlockstoff gegen Maisschädling**
Mais erhielt die Fähigkeit zurück, Fadenwürmer zur Verteidigung zu rekrutieren
- 22 Lebensborn statt Todesbote** 
Selbstmordbefehl lässt Stammzellen im Hirn zu Neuronen reifen
- 23 Springers Einwürfe**
Was mir mein Außerirdischer sagte
- 25 Wüste Pläne**
Problematisches Desertec-Projekt

ASTRONOMIE & PHYSIK

PORTRÄT WOLFGANG KETTERLE

- 26 Der Mann, der in die Kälte ging**
Der Physik-Nobelpreisträger von 2001 schildert den Wettlauf, bei dem ihm ein Durchbruch in der Physik tiefer Temperaturen gelang
- 42 Die zwei Gesichter des Monds**
Es bleibt ein Rätsel, warum sich die Vorderseite des Erdtrabanten so stark von der uns abgewandten unterscheidet. Die Untersuchung lunarer Einschlagbecken führte nun zu einer neuen Hypothese

SCHLICHTING!

- 52 Wirbel in der Wasserschale**
Jets aus Kohlenstoffdioxidgas versetzen Trockeneiskrümel in heftig kreiselnde Bewegung

Titelillustration: Kazuhiko Sano

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

MEDIZIN & BIOLOGIE

SCHWERPUNKT AIDS

- 54 Suche nach einem Impfstoff**
Mit erprobten Verfahren erlebten die Impfstoffentwickler beim Aids-erreger HIV viele Fehlschläge. Nun fahnden sie nach neuen Strategien
- 60 Hoffnung auf neue Antikörper**
Breitband-Antikörper würden auch noch stark mutierte Aidsviren erkennen
- 63 Ist die HIV-Infektion heilbar?** 
Um das Virus zu besiegen, müsste man seine letzten Verstecke im Körper räumen. Dazu gibt es viel versprechende Ansätze

WEITERE RUBRIKEN

- 5 Editorial: Eine Welt ohne Phosphor?
- 8 Online-Angebote
- 10 Leserbrief/Impressum
- 89 Im Rückblick
- 114 Vorschau

TITEL

Warum die Neandertaler ausstarben

68



TECHNIK & COMPUTER
Daten auf der Rennstrecke

90

TECHNIK & COMPUTER
Kernspin-Maus ersetzt
Riesenspinnmaschine

98



MENSCH & GEIST

TITEL

68 Das rätselhafte Ende des Neandertalers

Schuld waren vermutlich nicht kriegerische Auseinandersetzungen mit *Homo sapiens*: Das Verschwinden unserer nächsten Verwandten unter den Hominiden vor 28000 Jahren hat andere Gründe



MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

74 Internationale Mathematik-Olympiade 2009

Zwei Aufgaben, an denen sich Junggenies aus aller Welt die Zähne ausgebissen haben, mit nachvollziehbaren Lösungen

ERDE & UMWELT

78 Geht uns der Phosphor aus?

Ohne Phosphatdünger würde die Landwirtschaft zusammenbrechen. Deshalb stimmt bedenklich, dass die abbaubaren Vorkommen des Mineralstoffs nur noch bis Ende des Jahrhunderts reichen

ESSAY

84 Gaia – nichts als ein Mythos

Die Vorstellung, dass das Leben auf der Erde durch Rückkopplungsmechanismen seine eigene Erhaltung betreibe, ist zwar romantisch, aber falsch



TECHNIK & COMPUTER

90 Bits auf der Überholspur

Winzige magnetische Bereiche, die auf Nanodrähten hin- und herfahren, könnten in einigen Jahren die Festplatte ersetzen

WISSENSCHAFT IM ALLTAG

96 Ein Wall gegen das Wasser

See- und Flussdeiche schützen seit Jahrhunderten vor Sturmflut und Hochwasser

98 Der mobile Kernspin-Scanner

Durch raffinierte Tricks schrumpft der zimmergroße Kernspintomograf auf handliche Größe

WISSENSCHAFT & KARRIERE

104 »Es wird nur dort heiß, wo unsere Nanoteilchen sind«

Andreas Jordan, Vorstand der MagForce Nanotechnologies AG, bekämpft Krebszellen mit magnetischen Partikeln

106 Rezensionen: Ulrich Schmid und Günter Bechly (Hg.) *Evolution. Der Fluss des Lebens*
George A. Akerlof und Robert J. Shiller *Animal spirits*
Gary J. Sawyer und Viktor Deak *Der lange Weg zum Menschen*
Stefan Klein *Da Vincis Vermächtnis*
Midas Dekkers *Der Gesundheitswahn*
Georg Glaeser, Konrad Polthier *Bilder der Mathematik*

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



NASA, AUFGENOMMEN VON APOLLO 10



VON LINKS NACH RECHTS: ELIZABETH BLACKBURN, GERBIL / WIKIMEDIA; CAROL GREIDER, JOHNS HOPKINS UNIVERSITY; JACK SZOSTAK, MASSACHUSETTS GENERAL HOSPITAL

SPEKTRUMDIREKT Hochbetrieb auf dem Mond
www.spektrumdirekt.de/mond

TIPPS Spektrum-Artikel von Nobelpreisträgern 2009
www.spektrum.de/nobelpreis

spektrumdirekt.de

Die Wissenschaftszeitung im Internet

Hochbetrieb auf dem Mond

Dank zahlreicher Sonden, die in diesem Jahren zum Erdtrabanten aufbrechen (siehe auch Kasten S. 46 in diesem Heft), werden Forscher bald zu neuen Erkenntnissen über einen alten Bekannten gelangen

www.spektrumdirekt.de/mond

Das Virus und seine Folgen

Seit der Aidsreger HIV im Jahr 1984 dingfest gemacht wurde, ist viel passiert. Erst jüngst stieß die Meldung über ein potenzielles Immunisierungsverfahren weltweit auf großes Interesse. Von ihrem Schrecken hat die Seuche Aids allerdings noch wenig verloren

www.spektrumdirekt.de/aids

TIPPS

Nur einen Klick entfernt

Spektrum-Artikel von Nobelpreisträgern 2009

Gespannt warten wir jedes Jahr, ob der eine oder andere unserer Autoren zu den Nobelpreisträgern gehört. Das war schon über 70-mal in der Geschichte des Magazins der Fall – auch in diesem Jahr gleich mehrfach. Lesen Sie kostenfrei **Spektrum**-Beiträge diesjähriger und früherer Preisträger sowie dazugehörige Nachrichten und Berichte auf

www.spektrum.de/nobelpreis

Grün, fluoreszierend und didaktisch wertvoll

Die Initiative »Wissenschaft in die Schulen!« des **Spektrum**-Verlags, die kostenloses Lehrmaterial für Oberstufenklassen bereitstellt, hat ihr Onlineangebot erweitert und neu gestaltet. Hinzugekommen sind zum Beispiel Materialien und Skripte rund um das *green fluorescent protein*, dessen Entdecker Osamu Shimomura 2008 den Nobelpreis erhielt

www.wissenschaft-schulen.de

INTERAKTIV

Machen Sie mit!

»Raketen, aber elektrisch!«

Auch in unserer 13. Wunschartikelrunde war Ihre Meinung gefragt – hier stellt **Spektrum**-Chefredakteur Reinhard Breuer die Ergebnisse vor. Seine Annahmen über Ihre Präferenzen, die er statistisch gut gesichert glaubte, haben Sie allerdings wieder einmal widerlegt. Nur so viel ist sicher: Der Gewinnerartikel wird in der Januarausgabe 2010 erscheinen – und die Gewinnerin unseres Preises ist herzlich in den Verlag eingeladen!

www.spektrum.de/artikel/1005950

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



FREIGESCHALTET

»Das optimierte Gehirn«

www.gehirn-und-geist.de/artikel/1007755

Spektrum in den sozialen Netzwerken

facebook

www.spektrum.de/facebook

studiVZ

www.spektrum.de/studivz

twitter

www.spektrum.de/twitter

FÜR ABONNENTEN »Wieder gehen können«

www.spektrum-plus.de

FÜR ABONNENTEN

Ihr monatlicher Plus-Artikel
zum Download

»Wieder gehen können«

Rückenmarksverletzungen führen sehr oft zur Querschnittslähmung – und sind bis heute unheilbar. Der Züricher Neurobiologe Martin Schwab untersucht die mangelnde Regenerationsfähigkeit des Zentralnervensystems an vorderster Forschungsfront und entwickelt viel versprechende Therapieansätze

DIESER ARTIKEL IST FÜR ABONNENTEN
FREI ZUGÄNGLICH UNTER

www.spektrum-plus.de

FREIGESCHALTET

Ausgewählte Artikel aus
Gehirn&Geist und **Sterne und Welt-
raum** kostenlos online lesen

»Das optimierte Gehirn«

Sieben renommierte Forscher führen in diesem Memorandum zum »Neuro-Enhancement« aus, wie die Gesellschaft den damit einhergehenden Herausforderungen begegnen soll. Denn in Zukunft dürften auch immer mehr Gesunde zu pharmazeutischen Mitteln greifen, um ihre Stimmung oder geistige Leistungsfähigkeit zu verbessern

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

www.gehirn-und-geist.de/artikel/1007755

»Eine Supernova baut sich auf«

Bei der gezielten Durchforstung älterer Messergebnisse, die vom Satelliten GALEX stammen, wurde eine britisch-deutsche Astronomengruppe fündig. Sie wies die einer Sternexplosion vorangegangenen Emissionen von ultraviolettem Licht nach

DIESEN ARTIKEL FINDEN SIE ALS KOSTENLOSE
LESEPROBE VON **STERNE UND WELTRAUM** UNTER

[www.astronomie-heute.de/
artikel/1010124](http://www.astronomie-heute.de/artikel/1010124)

WISSENSlogs

Die Wissenschaftsblogs

Nobelpreise und Küchenezurufe

Vom 5. bis 12. Oktober wurden die Nobelpreise vergeben. Schon vorab hatten sich unter anderem die Spektrum-Blogger Lars Fischer und Alf Köhn ihre Gedanken gemacht (und Katalysatorforschern respektive Quantenphysikern die Daumen gedrückt), weiter diskutiert und gebloggt wurde aber vor allem nach der Bekanntgabe der Preisträger.

Derweil gibt Carsten Könneker, Chefredakteur von **Gehirn&Geist** und **epoc**, Insiderwissen preis. In seiner (auf 23 Posts angelegten!) wissenslogs-Serie »Wissenschaftskommunikation: Schreibe tipps vom Chefredakteur« hat er mittlerweile die halbe Strecke geschafft und Betriebsgeheimnisse vom »Küchenezuruf« bis zur »wichtigsten Währung im Medienbetrieb« gelüftet

www.wissenslogs.de

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

Kooperation im post-industriellen Egotopia?

Menschwerdung mit Kind und Kegel
Springers Einwürfe, August 2009

Der Vergleich zwischen einer frühzeitlichen Kooperative und dem heutigen postindustriellen Egotopia ist unzulässig. Die Antriebskräfte, die in der Frühzeit zu einer kooperativen Erziehung im Interesse des Stamms führten, sind heute den Kräften einer auf Gewinn und Konsum ausgerichteten Selbstverwirklichungsstrategie jedes Einzelnen gewichen. Von Kooperation kann in unseren heutigen »Stammesverbänden« wohl kaum mehr die Rede sein. Insbesondere das Argument der Selbstverwirklichung der Frau in einer von Konsumfron geprägten »Corporate World« steht in diametralem Gegensatz zu jedweder Form der Kooperation, da Selbstverwirklichung – egal von welchem Geschlecht betrieben – ja ausschließlich auf das Individuum selbst gerichtet ist.

Gernot Fuchs, Purkersdorf, Österreich

Die Verantwortung des Ichs

Sie sind doch Ihr Gehirn – wer sonst?, September 2009

Die Auffassung Prof. Singers, der Mensch sei für sein Tun verantwortlich, auch wenn er darüber nicht frei entscheiden kann, ist für mich nicht nachvollziehbar. Wenn die Handlungen eines Individuums letztendlich determiniert sind, dann

Relativitätstheorie nicht mehr anzweifeln

Bedroht die Quantenverschränkung Einsteins Theorie?, September 2009

Wäre das Ja der Autoren zur Titelfrage tatsächlich gerechtfertigt, so wäre das nicht nur eine Katastrophe für die spezielle Relativitätstheorie, sondern auch für alle darauf basierenden Theorien, also fast das ganze Gebäude der modernen Physik.

Dieser Artikel kann Physiker deshalb nicht froh stimmen. Die unglaubliche Präzision, mit der viele Ergebnisse der Physik und damit auch die spezielle Relativitätstheorie bestätigt wurden, sind Grund genug, Letztere nicht mehr anzuzweifeln.

Alle in dem Artikel angeführten Beispiele für Nichtlokalität wie das Zerrtrümmern einer Nase in Berlin durch

eine Faust in Köln oder die instantane Fernzündung einer Bombe widersprechen der speziellen Relativitätstheorie und sind unreal. Dagegen erfährt der Leser nicht wirklich, worin die – ganz anders geartete – Nichtlokalität quantenmechanischer Zustände besteht. Er kann sich daher kein Urteil darüber bilden, ob die spezielle Relativitätstheorie tatsächlich bedroht ist.

In seinen Kernaussagen bleibt der vorliegende Artikel auch zögerlich und vage, so ganz scheinen die Autoren ihren Schlussfolgerungen selbst nicht zu trauen. An entscheidenden Stellen wie »Die quantenmechanische Nichtlokalität scheint vor allem absolute Gleich-

ist es auch die Reaktion auf diese Handlungen. Wenn also der Täter nicht anders kann, als die Tat zu begehen, dann kann die Gesellschaft auch nicht anders, als ihn dafür zu bestrafen.

Trotzdem ist es richtig, die Willensfreiheit als ein soziales Konstrukt beizubehalten. Es ist letztlich ein philosophisch-ontologischer Begriff, der untrennbar zu unserer Selbstwahrnehmung als autonomes »Subjekt« gehört, und als solcher steht er sozusagen per definitionem außerhalb einer wissenschaftlichen Erfassung, die sich auf die »objektive« Realität konzentriert. Ohne dieses Konstrukt aber

kann die menschliche Gesellschaft nicht funktionieren.

Dr. J. Krebs, Starnberg

Herabstufung der übrigen Himmelskörper

Das Vermächtnis des Kopernikus
September 2009

Zwar empfanden Kopernikus und seine Anhänger die Verdrängung der Erde aus dem Mittelpunkt des Universums keineswegs als Herabstufung; für die übrigen

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefler (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Thilo Körkel (Online Koordinator), Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Marc Grove, Anke Heinzlmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer
Redaktionsassistent: Eva Kahlmann
Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3-5, 69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751; Amtsgericht Mannheim, HRB 338114
Verlagsleiter: Dr. Carsten Könneker, Richard Zinken (Online)
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Markus Fischer, Dr. Rainer Kayser, Dr. Susanne Lipps-Breda, Dr. Andreas Nestke, Claus-Peter Sesin, Dr. Frank Schubert, Dr. Sebastian Vogel.
Leser- und Bestellservice: Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.com

Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn
Bezugspreise: Einzelheft € 7,40/Sfr. 14,00; im Abonnement € 79,20 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 66,60. Die Preise beinhalten € 7,20 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 7,20 Portomehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70). Die Mitglieder des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBio) und von Mensa e. V. erhalten SdW zum Vorzugspreis.
Anzeigen: iq media marketing gmbh, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Marianne Dölz; Anzeigenleitung: Jürgen Ochs, Tel. 0211 6188-358, Fax 0211 6188-400; verantwortlich für Anzeigen: Ute Wellmann, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2481, Fax 0211 887-2686
Anzeigenvertretung: Berlin: Michael Seidel, Friedrichstraße 150, 10117 Berlin, Tel. 030 61686-144, Fax 030 61696-145; Hamburg: Matthias Meißner, Brandstwiete 1 / 6, OG, 20457 Hamburg, Tel. 040 30183-210, Fax 040 30183-283; Düsseldorf: Hans-Joachim Beier, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2053, Fax 0211 887-2099; Frankfurt: Thomas Wolter, Eschersheimer Landstraße 50, 60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 2424-4507, Fax 069 2424-4555; Stuttgart: Andreas Vester, Werastraße 23, 70182 Stuttgart, Tel. 0711 22475-21, Fax 0711 22475-49; München: Jörg Bönsch, Nymphenburger Straße 14, 80335 München, Tel. 089 545907-18, Fax 089 545907-24
Druckunterlagen an: iq media marketing gmbh, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 30 vom 01.01.2009.
Gesamtherstellung: Vogel Druck- und Medienservice GmbH & Co. KG, 97204 Höchberg

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.
Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2009 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg.
Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechtsinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandene Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
75 Varick Street, New York, NY 10013-1917
Acting Editor in Chief: Mariette DiChristina, President: Steven Inchcoombe, Vice President, Operations and Administration: Frances Newburg, Vice President, Finance, and Business Development: Michael Florek, Managing Director, Consumer Marketing: Christian Dorbandt, Vice President and Publisher: Bruce Brandfon



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



zeitigkeit zu erfordern« wird auch keinerlei Begründung geliefert. Der Leser kann den Autoren also nur glauben – oder auch nicht.

Prof. Dr. Eckhard Rebhan, Düsseldorf

Weshalb Prof. Rebhan den Autoren eher nicht glaubt, erläutert er ausführlich unter:
www.spektrum.de/artikel/1009364

Himmelskörper aber galt das genaue Gegenteil. Seit Aristoteles waren im westlichen Weltbild irdische Dinge veränderlich, weil sie aus den vier Grundelementen Erde, Luft, Feuer und Wasser zusammengesetzt waren. Die Körper der Himmelskugel waren im Gegensatz dazu vollkommene und unveränderliche Objekte aus »himmlischer« Substanz, so auch der Mond.

Als Galileo nun entdeckte, dass der Mond Gebirge, Täler und Ebenen hat, also irdische Landschaften besitzt, war sein Weltbild erschüttert. Einige Zeitgenossen konnten sich damit nicht anfreunden und versuchten, die Mondgebirge als optische Täuschung wegzudiskutieren. Die Entdeckung der Sonnenflecken und der vier größten Jupitermonde hat ähnlich ungläubige Reaktionen hervorgerufen.

Jörg Michael, Hannover

Nicht ganz neue Theorie

Nikotinsucht schon nach einer Zigarette?, September 2009

Analoge Überlegungen finden sich in der Literatur seit vielen Dekaden. Bereits 1957 haben Hurvich und Jameson ein Prozess-Opponentenmodell entwickelt, das im Grundsätzlichen ganz ähnliche Annahmen macht und 1973 von Solo-

mon und Corbit zur Erklärung von Zigarettensucht verwendet wurde. Eine ähnliche Modellierung ist auch für Alkohol vorgeschlagen worden.

Dass Verlangen und nicht Lust bei Sucht im Zentrum steht, legen die Befunde von Berridge, Rolls, Panksepp nahe. Selbst die neuronalen und molekularen Mechanismen, die hinter den antagonistischen Prozessen stehen, sind immer detaillierter beschrieben worden, teils auch in »Spektrum«. Insofern ist die Sensitivierung-Homöostase-Theorie von DiFranza nicht ganz neu. Aber sie leistet einen wertvollen Beitrag zur Entbagatellisierung des Nikotinkonsums.

Christian Hornstein, Bonn

Unterschied zwischen Wert und Preis

Globaler Kollaps durch Hungersnöte Oktober 2009

Als praktischer Landwirt stimme ich mit den Autoren darin überein, dass das Wertvollste, was die Menschheit besitzt, fruchtbarer Boden ist. Doch leider gibt es einen Unterschied zwischen dem Wert eines Produkts und dem Preis, der dafür bezahlt wird. In vielen Teilen der Welt ist der Weizenpreis seit Frühjahr 2007 um 55 bis 60 Prozent gefallen, also auf das

niedrigste Niveau seit Bestehen der Bundesrepublik.

Die Finanzmärkte genießen ein ungebührlich hohes Ansehen; hier werden von einem kleinen Teil der Bevölkerung derart hohe Gewinne realisiert, dass sie als systemrelevant gelten. Aber Menschen in der Lebensmittelproduktion werden global zu Sklaven des Kapitals gemacht. Alle guten Vorsätze der Bauern im Artikel, in verantwortungsvollem Umgang mit fruchtbarem Ackerland ein Auskommen für sich und ihre Familien zu erwirtschaften, sind nicht finanzierbar.

Reinhold Bethe, Northeim

Äquivalenzprinzip und Finanzmärkte

Instinktiv in die Katastrophe Oktober 2009

Zur Effizienzangabe gehört nach meinem Dafürhalten immer eine Zahl, die den Grad der Effizienz angibt. Das Postulat der effizienten Märkte, von Eugene Fama vor über 40 Jahren aufgestellt, reicht dafür nicht mehr aus. Dabei hat man inzwischen Alternativen, die die tatsächliche Effizienz eines Finanzmarktes bestimmen können. Das von Weizsäcker begründete Äquivalenzprinzip von Information und Materie, angewandt auf Finanzmärkte, macht dies heute möglich. Man muss hier die Effizienz (oder Rationalität) nicht mehr postulieren, sondern kann sie aktuell berechnen. Zum Beispiel beträgt die Effizienz des Dax im Durchschnitt 55 Prozent. »Effizient« wären in einem rationalen Marktkontext jedoch 82 Prozent. So weit ein konkretes Rechenergebnis, abgeleitet aus dem weizsäckerschen Äquivalenzprinzip.

Dr. Hans Sauer, Veitshöchheim

Briefe an die Redaktion ...

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

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

ASTRONOMIE

Kollision in fernem Sonnensystem

■ Mit dem Weltraumteleskop Spitzer haben Astronomen Anzeichen für eine Planetenkollision in einem rund 100 Lichtjahre von uns entfernten Sonnensystem entdeckt: Ein Objekt von den Dimensionen des Mondes ist dort anscheinend auf einen merkurgroßen Planeten geprallt.

Im Infrarotspektrum des etwa zwölf Millionen Jahre alten Sterns HD 172555 stießen Carey M. Lisse von der Johns Hopkins University in Baltimore (Maryland) und seine Kollegen auf ungewöhnliche Absorptionslinien. Sie lassen auf ver-



Fantasievolle grafische Darstellung einer Planetenkollision

dampftes Gestein sowie auf Glaspartikel schließen, die aus einer Silikatschmelze erstarrt sind. Nach Ansicht der Wissenschaftler handelt es sich um so genannte Tektite. Diese haben sich auf der Erde beim Einschlag von Meteoriten gebildet. Unter der Gewalt des Aufpralls wird getroffenes Gestein über den Schmelzpunkt erhitzt und in Form unzähliger Tropfen davongeschleudert. Diese erstarren beim raschen Abkühlen zu Glas.

Anhand der beobachteten Partikel- und Gasmengen schätzen die Astronomen, dass die beiden Kollisionspartner zusammen mindestens doppelt so massereich waren wie der Erdmond. Bei der Kollision wurde der kleinere Körper vermutlich zerstört. Nach Einschätzung der Forscher liegt das Ereignis erst einige tausend Jahre zurück; denn sonst hätten sich die davongeschleuderten Trümmer schon weiter zerstreut und wären nicht mehr nachweisbar.

arXiv:0906.236

MEDIZIN

Sporen mit Tarnkappe

■ Unsere Atemluft enthält Tausende, manchmal sogar Millionen von Sporen pro Kubikmeter. Viele Pilze wie der Schimmelpilz *Aspergillus fumigatus* verbreiten sich über solche Konidien. Eigentlich müsste unser Immunsystem gegen diese Allergene vorgehen, so dass wir ständig mit Entzündungen zu kämpfen hätten. Forscher um Vishukumar Aianianda vom Institut Pasteur in Paris haben nun herausgefunden, warum uns das glücklicherweise erspart bleibt: Die Oberfläche der Sporen ist von einem Wasser abweisenden Protein namens RodA überzogen, das offenbar wie eine Tarnkappe auf das Immunsystem wirkt.

Die Forscher machten ihre Entdeckung, als sie im Labor Abwehrzellen mit dem Protein konfrontierten und keine Immunreaktion auftrat. Daraufhin injizierten sie RodA in Mäuse, doch auch deren Immunsystem schlug nicht Alarm. Gegen Sporen, von



denen die Forscher die Proteinschicht mit Flusssäure abgelöst hatten, gingen die Abwehrzellen jedoch massiv vor.

Nun sind Schimmelpilze durchaus nicht harmlos; vor allem bei geschwächten Menschen können sie Allergien und schwere Erkrankungen der Atmungsorgane hervorrufen. Unter welchen Umständen lässt sich das Immunsystem also nicht länger einlullen und macht gegen die Erreger mobil? Der Casus Belli tritt ein, sobald die Konidien auskeimen, um neue Pilzkolonien zu bilden. Dann wird die RodA-Schicht entfernt, so dass das Immunsystem die Fremdkörper erkennt und bekämpft.

Nature, Bd. 460, S. 1117

PHYSIK

Tunneln aus der zweiten Reihe

■ Quantenteilchen nehmen sich gerne Freiheiten heraus. Reicht ihre Energie nicht aus, um eine Potenzialbarriere zu überqueren, tunneln sie unter Umständen einfach hindurch. So können auch Elektronen ihre Atome oder Moleküle verlassen, ohne die dafür nötige Energie aufzubringen. Den so entstehenden Tunnelstrom nutzen etwa Rasterelektronenmikroskope oder auch gängige Flash-Speicher aus.

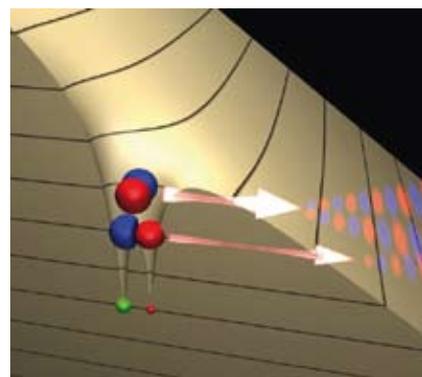
Besteht dieser Strom, wie lange vermutet, nur aus Elektronen aus dem höchsten besetzten Energieniveau (Orbital)? Am Beispiel des Chlorwasserstoffs hat nun ein internationales Forscherteam um Hiroshi Akagi von der University of Ottawa gezeigt, dass das nicht zutrifft. Bei diesem Molekül ist das zweithöchste Niveau wesentlich für den Zusammenhalt verantwortlich. Tunnelt ein Elektron heraus, müsste die Bindung zwischen Wasserstoff

und Chlor zerbrechen. Genau das beobachteten die Forscher tatsächlich. Indem sie die auseinanderstrebenden Partikel – Wasserstoffatom, Chlorion und entfliehendes Elektron – in Koinkidenz vermaßen, konnten sie den Vorgang isoliert betrachten.

Eine Analyse der Winkelverteilung der emittierten Elektronen bestätigte schließlich die Vermutung, dass diese teilweise vom zweithöchsten Niveau stammten. Berechnungen zufolge können über zehn Prozent der aus dem Molekül tunnelnden Elektronen dort herkommen.

Science, Bd. 325, S. 1364

Beim Chlorwasserstoff können Elektronen aus den zwei höchsten besetzten Orbitalen (blau/rot) entweichen, indem sie den Potenzialwall durchtunneln (Pfeile). Chlor ist grün, Wasserstoff rot dargestellt (Kugeln unten).



Hirnplastizität dank springender Gene?

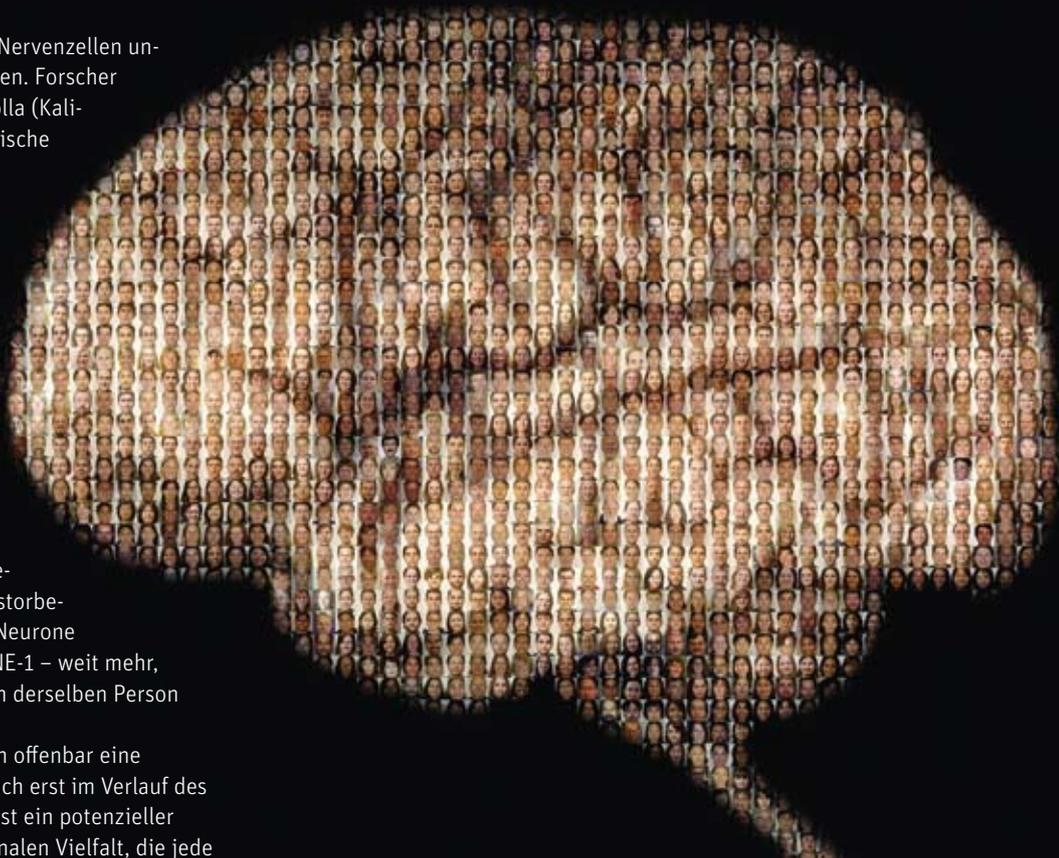
■ Eigentlich sollten alle 100 Milliarden Nervenzellen unseres Gehirns das gleiche Erbgut enthalten. Forscher um Fred Gage vom Salk Institute in La Jolla (Kalifornien) haben nun aber deutliche genetische Unterschiede zwischen ihnen gefunden. Verantwortlich dafür sind mobile DNA-Sequenzen namens LINE-1 (*long interspersed element 1*), die Kopien von sich selbst in das Erbgut der Neurone einfügen. Solche Transposonen oder »springenden Gene« gibt es auch in anderen Körperzellen; sie werden dort aber an der Ausbreitung gehindert.

Die Forscher machten ihre überraschende Entdeckung zunächst an menschlichen Nervenzellen, die sie im Labor gezüchtet hatten. Bei der anschließenden Untersuchung von Gehirnen Verstorbener bestätigte sich der Befund. Manche Neurone enthielten bis zu 100 Exemplare von LINE-1 – weit mehr, als in Zellen aus anderen Körpergeweben derselben Person vorkamen.

Die Transposonen erzeugen im Gehirn offenbar eine zusätzliche genetische Variabilität, die sich erst im Verlauf des menschlichen Lebens entwickelt. »Dies ist ein potenzieller Mechanismus zur Schaffung jener neuronalen Vielfalt, die jede Person einzigartig macht«, erklärt Gage. »Die mobilen genetischen Elemente könnten dafür sorgen, dass sich die Fähigkeiten aller Neurone leicht voneinander unterscheiden.«

Nature, Bd. 460, S. 1127

Mit ein Grund für die Individualität unseres Gehirns sind springende Gene, die auch im Lauf des Lebens noch das Erbgut von Nervenzellen verändern.



SALK INSTITUTE FOR BIOLOGICAL STUDIES / JAMIE SIMON

SUCHTFORSCHUNG

Volles Risiko

■ Wenn Jugendliche sich betrinken, schaden sie der Entwicklung von Herz und Gehirn und erhöhen das Risiko, als Erwachsene alkoholabhängig zu werden. Doch damit nicht genug: Wie Nicholas A. Nasralah von der University of Washington in Seattle und sein Team nun herausgefunden haben, beeinträchtigt früher Alkoholmissbrauch auch die spätere Entscheidungsfähigkeit und erhöht die Risikobereitschaft im Erwachsenenalter.

Das ergaben Versuche an Ratten. Die Forscher verglichen das Verhalten von Nagern, die als Jungtiere drei Wochen lang große Mengen Alkohol konsumiert hatten, mit solchen, die ohne die Droge aufgewachsen waren. Da sich Ratten nicht freiwillig betrinken, fütterten die Forscher sie mit alkoholgetränkter Gelatine.

Als Erwachsene wurden die Tiere dann Entscheidungstests unterzogen. Im hungrigen Zustand konnten sie zwischen zwei Hebeln wählen. Der eine lieferte beim Drücken zuverlässig eine kleine Futterration. Wurde der andere betätigt, gab es dagegen nach dem Zufallsprinzip eine große Portion oder gar nichts.

Das Ergebnis war eindeutig: Während die Ratten mit alkoholfreier Jugend sich überwiegend für die kleine, aber sichere Futterration entschieden, zeigten sich die vorbelasteten Tiere ausgesprochen risikofreudig und bevorzugten das Vabanquiespiel um die große Nahrungsmenge.

Aber ist das Ergebnis überhaupt auf den Menschen übertragbar? Dafür spricht eine kürzlich veröffentlichte Untersuchung von Forschern um Fuat Balci von der Princeton University (New Jersey), wonach Menschen und Mäuse ein sehr ähnliches Risikoverhalten an den Tag legen.

PNAS, Online-Vorabveröffentlichung



Diese Ratte schaut tief ins Glas – um alkoholgetränkte Gelatine zu fressen.

UNIVERSITY OF WASHINGTON

ANTHROPOLOGIE

Europas erste Bauern

■ In Mitteleuropa begann rund 6400 Jahre v. Chr. die Jungsteinzeit: Eine bäuerliche Lebensweise ersetzte die ursprüngliche Kultur der Jäger und Sammler. Diese neolithische Revolution hatte im Nahen Osten allerdings bereits etwa 2500 Jahre früher stattgefunden. Könnte es also sein, dass die ersten europäischen Landwirte Einwanderer waren und nicht Nachfahren ansässiger Jäger und Sammler, welche die neue Lebensweise einfach übernahmen? Diese These hatte der britische Archäologe Colin Renfrew schon vor über 20 Jahren auf Grund linguistischer Analysen aufgestellt.

Nun hat eine internationale Forschergruppe um Barbara Bramanti von der Universität Mainz auch genetische Belege dafür geliefert. Die Wissenschaftler analysierten das Erbgut aus Skelettresten von 20 europäischen Jägern und Sammlern sowie 25 frühen Bauern, die aus Russland, Litau-



JOACHIM BÜRGER, UNIVERSITÄT MAINZ

Vor der Erbgutanalyse bestrahlen Forscher ausgegrabene menschliche Knochenreste mit UV-Licht, um oberflächliche Verunreinigungen mit moderner DNA zu zerstören.

en, Polen und Deutschland stammten, und verglichen es miteinander sowie mit dem Genom moderner Europäer. Dabei fanden sie kaum Gemeinsamkeiten zwischen den beiden steinzeitlichen Gruppen. Außerdem zeigte ein Großteil der Jäger und Sammler genetische Marker, die bei heutigen Mitteleuropäern nur relativ selten vorkommen. Demnach waren die ersten hiesigen Bauern wahrscheinlich keine Nachfahren der Ureinwohner, sondern Einwanderer, die den Ackerbau und die Viehzucht mitbrachten. Mit ihrer moderneren Lebensweise verdrängten sie schließlich die angestammte Population.

Science, Online-Vorabveröffentlichung

ARCHÄOLOGIE

Bronzezeitgrab in Schottland

■ Unter einem vier Tonnen schweren Sandstein stießen Archäologen bei dem schottischen Dorf Forteviot auf eine 4000 Jahre alte Grabkammer mit reichhaltigen Beigaben. Die aufwändige Bestattung spricht für einen hohen gesellschaftlichen Rang des

Verstorbenen. Seine Überreste lagen in einem Steinsarg, gebettet auf Sand und Quarzkiesel. In der Grabkammer fanden sich diverse Metallgegenstände, darunter ein Bronzedolch mit goldener Verzierung, der in einem Schaft aus Leder steckte. Außerdem entdeckten die Archäologen von den Universitäten Glasgow und Aberdeen einen Lederbeutel mit Holz- und Pflanzenresten – wahrscheinlich die Überbleibsel von Figuren und Blumen.

Auf der Unterseite des Steins, der das Grab versiegelte, sind rätselhafte Zeichen eingeritzt, die an Äxte erinnern. Eine solche Darstellung war aus der Bronzezeit in Großbritannien bisher nicht bekannt.

Die Region um Forteviot bildete einst das Zentrum des pikteschen Königreichs Fortiu. Der Palast der Herrscher stand ganz in der Nähe des heutigen Dorfs. Die Stämme der Pikten bewohnten seinerzeit den Norden Großbritanniens. Erst als ihr Reich im 9. Jahrhundert n. Chr. mit dem der keltischen Skoten vereint wurde, erhielt die Gegend den Namen Schottland.

Pressemitteilung der University of Glasgow

PALÄONTOLOGIE

Saurierspuren in luftiger Höhe

■ Der Parc Ela im Kanton Graubünden ist der größte Nationalpark der Schweiz. Neben unberührter Natur, mittelalterlichen Burgen und Kirchen hat er nun eine weitere Attraktion zu bieten. Paläontologen um Christian Meyer vom Naturhistorischen Museum Basel entdeckten im Gipfelbereich des Piz Ela die fossile Fährte eines Dinosauriers. Die fünf dreizehigen Fußabdrücke sind etwa 40 Zentimeter lang und gehörten zu einem sieben Meter großen Fleischfresser. Das Besondere an dieser Entdeckung: Die äl-



BASIL, THURING, NATURHISTORISCHES MUSEUM BASEL

Diese fünf 40 Zentimeter großen dreizehigen Fußabdrücke eines Raubsauriers wurden nun in 3300 Meter Höhe auf dem Schweizer Piz Ela entdeckt.

testen bekannten Raubsaurierspuren dieser Größe stammten bisher aus dem unteren Jura, also der Zeit vor rund 200 Millionen Jahren. Die neuen Abdrücke aber sind über 205 Millionen Jahre alt und entstanden bereits in der Trias, in der bisher nur deutlich kleinere Spuren aufgetaucht waren.

Die Abdrücke weisen aber noch eine Besonderheit auf: 3300 Meter über dem Meeresspiegel gelegen, sind sie die höchsten der Welt. Bisher hielten Saurierspuren auf dem Piz Mittel mit 3100 Metern den Höhenrekord. Als die Urzeitechsen ihre Abdrücke hinterließen, stapften sie über einen tropischen Meeresstrand. Später wurde er bei der Auffaltung der Alpen, die vor etwa 135 Millionen Jahren begann, auf über 3000 Meter gehoben.

Pressemitteilung des Naturhistorischen Museums Basel



SERP, UNIVERSITIES OF GLASGOW AND ABERDEEN

Hubble enthüllt Schmetterling

Bei der letzten Reparatur im Mai wurde das Hubble-Weltraumteleskop nicht nur generalüberholt, sondern erhielt auch neue Messinstrumente. Seither liefert es eindrucksvollere Bilder denn je. Als Kostprobe veröffentlichte die NASA diese atemberaubende Aufnahme der Wide Field Camera 3. Sie zeigt den 3800 Lichtjahre entfernten Planetarischen Nebel NGC 6302 im sichtbaren und ultravioletten Spektralbereich. Das Bild ist aus sechs Aufnahmen bei Wellenlängen zusammengesetzt, die den Emissionen von Wasserstoff, Helium, Stickstoff, Sauerstoff und Schwefel entsprechen. Jede davon versahen die NASA-Wissenschaftler mit einem Farbton, der sich an den von Licht aus dem betreffenden Spektralbereich anlehnt. Was als prachtvoll gezeichneter, zart durchscheinender Schmetterling erscheint, sind extrem schnelle Gasströme, die der verdeckte sterbende Stern im Zentrum in den vergangenen 2200 Jahren ausgestoßen hat und mit seiner ultravioletten Strahlung zum Glühen bringt.

SPÉKTROSKOPIE

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

Madonna mit Schildlauslack

Eine spektroskopische Methode zum Nachweis organischer Farbstoffe in Geweben lässt sich jetzt auch auf mikroskopisch kleine Proben von wertvollen Gemälden und Skulpturen anwenden. Das Verfahren verhalf bereits zu interessanten kulturhistorischen Erkenntnissen.

Von Michael Groß

Künstlerische Zeugnisse vergangener Zeiten, von den Grabbeigaben der Pharaonen bis zur Malerei der letzten Jahrhunderte, sind nicht nur schön anzusehen, sondern können auch Aufschluss über die Kultur- und Technikgeschichte geben. So ist es interessant zu erfahren, welche Farbstoffe wann und wo verwendet wurden und woher sie kamen. Das erlaubt Rückschlüsse sowohl auf die technischen Fertigkeiten der je-

weiligen Künstler einer Kulturepoche wie auf einstige Handelsverbindungen.

Diese Art der Untersuchung von Kunstwerken stellt die Analytik aber teils vor große Herausforderungen. Bei wertvollen Museumsschätzen ist natürlich zu gewährleisten, dass kein Schaden entsteht. Falls dennoch eine Probe entnommen werden muss, sollte sie unsichtbar klein sein.

Als zerstörungsfreie Analysemethoden bietet sich die Raman-Spektroskopie an. Dabei richtet man einen Laserstrahl auf

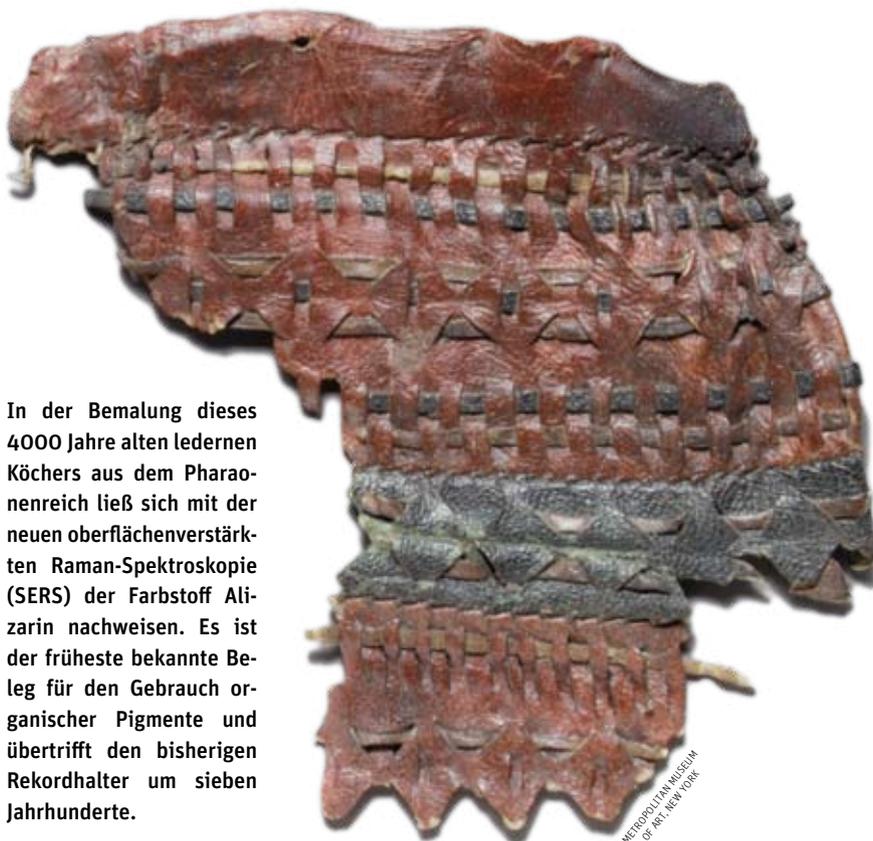
den interessierenden Gegenstand und ermittelt Änderungen in der Wellenlänge des Streulichts, die durch Wechselwirkung mit dem Objekt entstanden sind (siehe Spektrum der Wissenschaft 3/2009, S. 20). Anorganische Pigmente lassen sich auf diese Weise gut identifizieren. Schwierigkeiten bereiten dagegen organische Farbstoffe wie Indigo oder Alizarin, die schon in der Antike aus dem Färberwaid beziehungsweise -krapp gewonnen wurden. Hier scheidet die herkömmliche Raman-Spektroskopie daran, dass diese Stoffe fast ausnahmslos fluoreszieren, wobei das Fluoreszenzspektrum den viel schwächeren Raman-Effekt überstrahlt.

Marco Leona, der in der wissenschaftlichen Abteilung des Metropolitan Museum of Art in New York arbeitet, benutzt daher eine Variante des Verfahrens: die so genannte oberflächenverstärkte Raman-Streuung (SERS für *Surface-Enhanced Raman Scattering*). Dabei wird die zu untersuchende Substanz an ein Metall gebunden, das entweder als dünner Film oder als Kolloid (in Form von Nanopartikeln) vorliegt.

Die Natur belohnt diesen Aufwand gleich doppelt. Zum einen verringert sich das störende Fluoreszenzlicht durch so genannte Fluoreszenzlöschung (*Quenching*), wobei die Anregungsenergie statt als Licht in Form von Wärme abgeführt wird. Zum anderen nimmt die Intensität des Raman-Signals auf geradezu spektakuläre Weise zu – auf das Tausend- bis Milliardenfache. Der genaue Mechanismus ist noch umstritten. Es gibt sowohl eine elektromagnetische als auch eine chemische Theorie zu seiner Erklärung.



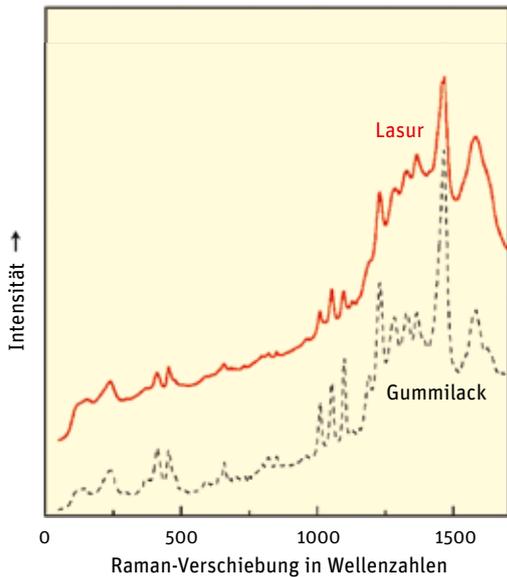
METROPOLITAN MUSEUM OF ART, NEW YORK



In der Bemalung dieses 4000 Jahre alten ledernen Köchers aus dem Pharaonenreich ließ sich mit der neuen oberflächenverstärkten Raman-Spektroskopie (SERS) der Farbstoff Alizarin nachweisen. Es ist der früheste bekannte Beleg für den Gebrauch organischer Pigmente und übertrifft den bisherigen Rekordhalter um sieben Jahrhunderte.

METROPOLITAN MUSEUM OF ART, NEW YORK

RAMAN-SPEKTREN



Leona hat SERS seit 2006 weiterentwickelt, um organische Farbstoffe in Lösung und in Gewebefasern damit zu identifizieren. Damals zeigte er, dass es mit kolloidalem Silber als Trägermaterial gelingt, kulturhistorisch wichtige Farbstoffe wie Alizarin zu identifizieren. Um Suspensionen von fein verteilten Silberpartikeln zu erhalten, versetzte er Lösungen eines Silbersalzes mit Zitronensäure.

Inzwischen hat Leona die Methode weiter verfeinert. Bestrahlung mit Mikrowellen gibt dem Kolloid offenbar den letzten Schliff und sorgt für Partikel einheitlicher Größe. Auch die Probenvorbereitung hat der Forscher so weit optimiert, dass er mit Proben von weniger als 25 Mikrometer Durchmesser auskommt. Dadurch konnte er jetzt Farben und Lacke bei drei Kunstwerken von der Pharaonenzeit bis zur Renaissance identifizieren, die an seiner Arbeitsstätte, dem Metropolitan Museum, ausgestellt sind (*Proceedings of the National Academy of Sciences*, B. 106, S. 14757).

Das älteste Stück ist ein rund 4000 Jahre altes Fragment eines ägyptischen Köchers aus dem Mittleren Reich. In einer Probe des roten Lacks aus der Bemalung des ledernen Behälters konnte Leona Alizarin nachweisen. Damit lieferte er den bisher frühesten Beleg dafür, dass Menschen in der Lage waren, organische Pigmente aus Pflanzen oder Tiermaterialien zu extrahieren und zu verarbeiten. Diese Zeitmarke übertrifft den vorherigen Rekord um sieben Jahrhunderte, ist jedoch vermutlich nicht das letzte Wort. Leona hält es für wahrscheinlich, dass die Untersuchung anderer alter Fundstücke mit SERS einen noch frü-

Laut SER-Spektroskopie enthält die Lasur dieser Madonna aus dem 12. Jahrhundert Gummilack aus Südasien, obwohl der Handel mit dem Stoff erst einige Jahrzehnte später dokumentiert ist.

heren Gebrauch organischer Farbstoffe dokumentieren wird.

Auch die Analyse der beiden anderen Objekte macht eine kulturgeschichtliche Neubewertung erforderlich. Es handelt sich um eine farbige Skulptur der Madonna mit Kind aus der zweiten Hälfte des 12. Jahrhunderts (Foto links oben) und ein Gemälde aus der Werkstatt von Francesco Granacci um 1510, das Johannes den Täufer darstellt.

In einer roten Lasur des Renaissance-Werks fand Leona den in Asien aus Schildläusen gewonnenen Farbstoff Kermes, der ab dem 16. Jahrhundert von Cochenille aus der Neuen Welt verdrängt wurde. Die mittelalterliche Skulptur ist zwar mit anorganischen Pigmenten rot gefärbt, doch darüber befindet sich ein ebenfalls roter organischer Auf-

strich. Darin konnte Leona den südasiatischen, aus Harz gewonnenen Gummilack nachweisen, obwohl der Handel mit dieser Substanz bisher erst einige Jahrzehnte später dokumentiert ist. Derselbe Farbstoff fand sich dann in einer weiteren Madonnenskulptur aus der französischen Romanik.

Wie Timothy Brook in seinem kürzlich auf Deutsch erschienenen Buch »Vermeers Hut« demonstriert, können Kunstwerke uns sehr viel mehr mitteilen als nur die ästhetischen Vorlieben der Künstler und ihrer Zeit. Der Historiker von der University of Oxford analysiert, was die Gegenstände, die in den Bildern des Jan Vermeer van Delft auftauchen, über soziale Umstände und den Welthandel aussagen. Welche analogen Informationen die von Künstlern der Vergangenheit verwendeten Materialien liefern, ist hingegen noch kaum erforscht. Die verstärkte Anwendung minimalinvasiver Methoden wie der SER-Spektroskopie sollte helfen, diese Wissenslücke zu schließen.

Michael Groß ist promovierter Biochemiker und Wissenschaftsjournalist in Oxford (England).

REGENWALD

Wirtschaftliches Strohfeuer durch Abholzung

Die Rodung und Erschließung des brasilianischen Regenwaldes bringt Wohlstand für die lokale Bevölkerung – doch nur vorübergehend: Sind die natürlichen Ressourcen erst einmal ausgebeutet, geht es den Menschen dort auch nicht besser als vorher.

Von Christian Tack

Wo vor einigen Jahren noch undurchdringlicher Regenwald wucherte, da weidet heute Vieh oder wachsen Nutzpflanzen. Doch vor allem siedeln im brasilianischen Amazonasgebiet immer mehr Menschen. Sie nutzen die natürlichen Ressourcen, weshalb das riesige Gebiet seit Jahrzehnten einen rasanten Wandel erlebt, der sich gut an-

hand von Satellitenbildern verfolgen lässt und global mit Sorge betrachtet wird. Ehemals grüne Flächen erscheinen heute in allen Farben der Zivilisation.

Zusammen mit den Ökosystemen ändert sich auch das Leben der Menschen, die aus den Rohstoffen Kapital schlagen. Doch bringt der Wandel auch eine nachhaltige ökonomische Verbesserung für die Bevölkerung? Dieser Frage sind Ana S.L. Rodrigues von der University of



DREI FOTOS: ALEXANDER LEES



Noch beherbergt das brasilianische Amazonasgebiet rund 40 Prozent der tropischen Regenwälder weltweit. Doch in das intakte natürliche Ökosystem (oben) schlägt der Mensch immer mehr Lücken (Mitte) und verwandelt es großflächig in Acker- und Weideland (unten). Einen wirklichen Nutzen hat die Bevölkerung davon allerdings nur vorübergehend.

Cambridge und ihre Kollegen nachgegangen (*Science*, Bd. 324, S. 1435).

Für ihre Untersuchungen verglichen die Forscher 286 Verwaltungsbezirke des brasilianischen Amazonasgebiets, die sich im Jahr 2000 in verschiedenen Stadien der Entwaldung befanden. Die Unterschiede betrafen den Anteil der gerodeten Fläche und die Rodungsaktivität, also das Tempo der Abholzung.

Ein Muster von Auf- und Abschwung

Für jeden dieser Verwaltungsbezirke zogen die Wissenschaftler den »Index für die menschliche Entwicklung« (HDI nach englisch *human development index*) aus demselben Jahr heran, der jeweils im »Brasilianischen Atlas der menschlichen Entwicklung 2000« verzeichnet ist. Dieser Wert ergibt sich aus einer Formel, die von den Vereinten Nationen im Rahmen des »United Nations Development Program« (UNDP) aufgestellt wurde, und kennzeichnet das Entwicklungsniveau einer Region. Berechnungsgrundlage sind außer dem Pro-Kopf-Einkommen die Lebenserwartung bei der Geburt, die Alphabetisierungsrate und die Einschulungszahlen. Damit spiegelt der Index indirekt Lebensstandard, medizinische Versorgung, Bildung und Infrastruktur wider.

Als ihn die Gruppe um Rodrigues mit dem Status der Entwaldung in Beziehung setzte, war ein Muster von Auf- und Abschwung zu erkennen. Demnach geht mit der Erschließung des Regenwaldgebiets und der vorhandenen Ressourcen erst einmal ein Anstieg des HDI-Werts einher. Doch in Regionen, die fast vollständig abgeholzt und in Nutzfläche verwandelt wurden, liegt der Index wieder ebenso niedrig wie in Bezirken, die noch vollständig bewaldet sind.

Zwar liefert die Untersuchung nur eine Momentaufnahme, die einzelne Stadien der Entwicklung in unterschiedlichen Gebieten aufzeigt. In Ermangelung

von Langzeitdaten lässt sich der Verlauf nämlich nicht für eine einzelne Region dokumentieren. Wegen der weit gehenden Gleichförmigkeit des Amazonasgebiets ist das Ergebnis dennoch zuverlässig; denn Unterschiede in der Geografie, in der geschichtlichen Entwicklung und in den politischen Verhältnissen, die in anderen Teilen der Welt großen regionalen Einfluss hatten, können hier ausgeschlossen werden.

Kein bleibender Wohlstand

Zudem spielt es bei einer solchen Querschnittuntersuchung für ein bestimmtes Jahr keine Rolle, dass der durchschnittliche HDI-Wert für ganz Brasilien im Lauf der Zeit angestiegen ist. Wie sich im landesweiten Vergleich zeigte, liegt der Lebensstandard zu Beginn der Entwaldung tatsächlich über dem Landesdurchschnitt. Im weiteren Verlauf der Rodung verschlechtert er sich jedoch stetig und unterschreitet am Ende den Mittelwert für ganz Brasilien deutlich.

Die Wissenschaftler diskutieren auch die Ursache dieses Musters aus wirtschaftlichem Auf- und Abschwung. Dabei schließen sie die Zuwanderung als Grund für die Erhöhung des HDI-Werts zu Beginn der Entwaldung aus; denn die Siedler sind generell ärmer und schlechter ausgebildet als Durchschnittsbrasilianer

und erhoffen sich eine Verbesserung ihrer Lebensumstände. Für den vorübergehenden wirtschaftlichen Aufschwung sorgt nach Ansicht der Forscher vielmehr die Ausbeutung der natürlichen Ressourcen; denn Holz, Land und Erze lassen sich erst einmal Gewinn bringend nutzen. Hand in Hand mit der Erschließung der Rohstoffe geht der Aufbau einer verbesserten Infrastruktur, die einen leichteren Zugang zu Schulen und Krankenhäusern ermöglicht. Deshalb steigen neben dem Pro-Kopf-Einkommen auch Bildungsniveau und Lebenserwartung.

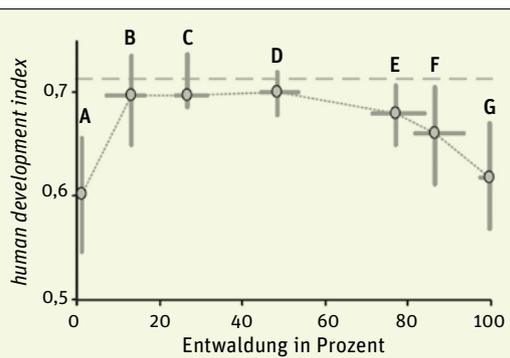
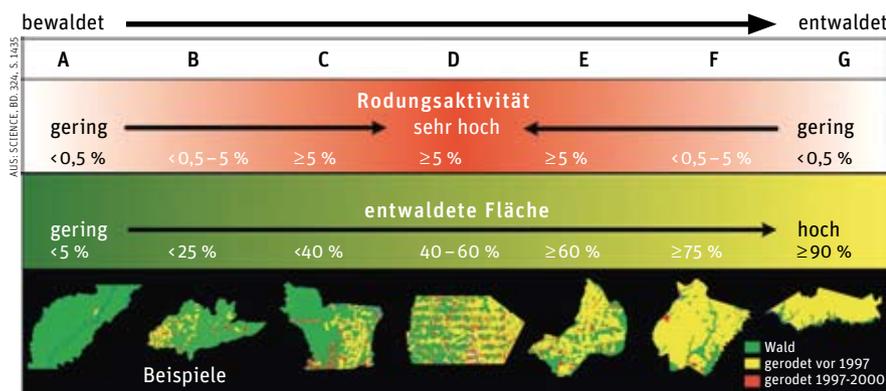
Doch mit der Erschöpfung der natürlichen Ressourcen versiegt auch die Quelle des Wohlstands. Die Folge ist ein unaufhaltsamer wirtschaftlicher Niedergang, den das stetige Bevölkerungswachstum noch verschärft, aber keineswegs allein verursacht. Neben dem HDI-Wert sinken in diesen Regionen nämlich auch die Erträge an Holz und Feldfrüchten sowie die Viehbestände – und zwar nicht nur pro Kopf, sondern auch pro Fläche. Das ist ein klares Indiz für die nachlassende Produktivität von Böden und Ökosystemen.

Im Grunde belegt die Untersuchung nur mit harten Zahlen, was aufmerksamen Beobachtern längst klar ist und von Umweltschützern seit Jahrzehnten beklagt wird. Demnach folgt die Er-



wichtige onlineadressen

- ▶ **CONTOO**
Das Konferenzportal zur Organisation, Verwaltung und Präsentation wissenschaftlicher Tagungen
www.contoo.de
- ▶ **Managementwissen**
per Fernlehre kostengünstig ortsunabhängig erwerben
Qualitätsmanager, Qualitätsbeauftragter
www.cqa.de
- ▶ **Expedition Zukunft**
ScienceExpress – ein Wissenschaftszug fährt quer durch Deutschland
www.expedition-zukunft.org
- ▶ **Kernmechanik – von Kernspin bis Chemie, von Dunkler Materie und Energie**
www.kernmechanik.de
- ▶ **SciLogs**
Die größte deutschsprachige Webseite mit Wissenschaftsblogs
www.scilog.de
- ▶ **WEITBLICK**
von Stern zu Stern ist stets schneller als es Licht je vermag.
www.doc-e.com



Die Verwaltungsbezirke lassen sich auf Grund der entwaldeten Fläche und der Rodungsaktivität in sieben Kategorien einteilen (A–G). Gebiete der Kategorie A sind fast vollständig mit Wald (grün) bedeckt, solche der Kategorie G fast komplett entwaldet (gelb). Maximale Rodungsaktivität herrscht in Bezirken der Kategorie D, in denen schon rund die Hälfte der Fläche abgeholzt ist. Werden diesen Gebieten Maßzahlen für den Lebensstandard zugeordnet, lässt sich ein Muster aus Auf- und Abschwung erkennen.

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

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

schließung des brasilianischen Amazonasgebiets, wie Rodrigues und ihre Kollegen es ausdrücken, einem »Muster, das weit entfernt ist von wünschenswerten Bedingungen für die menschliche Entwicklung oder die Erhaltung der natürlichen Ressourcen«. Ziel könne nur eine nachhaltige Verbesserung der Lebensumstände der Menschen sein.

Die vorgeschlagenen Rezepte klingen durchaus vertraut: Einschränkung der Entwaldung und Wiederaufforstung abgeholzter Gebiete. Ohne finanzielle Anreize für eine nachhaltige Holznutzung gehe das nicht. Zudem müsse ein System entwickelt werden, das den Bewohnern Amazoniens einen pekuniären Ausgleich für die Leistungen ihres Regenwaldes ge-

währt. Der beherbergt schließlich nicht nur eine einmalige biologische Vielfalt, sondern stellt auch einen der größten Langzeitspeicher für das klimaschädliche Treibhausgas Kohlendioxid auf unserem Planeten dar.

Christian Tack ist freier Wissenschaftsjournalist in Heidelberg.

PFLANZENSCHUTZ

Parasitenlockstoff gegen Maisschädlinge

Ursprünglich konnte Mais Schädlinge wie den Maiswurzelbohrer bekämpfen, indem er deren Feinde anlockte. Im Verlauf der Züchtung ging bei Hochleistungssorten diese Fähigkeit allerdings verloren. Wissenschaftler haben sie nun Versuchspflanzen zurückgegeben.

Von Andreas Baumann

Die süddeutschen Imker werden das Frühjahr 2008 wohl noch lange in schlechter Erinnerung behalten. Damals behandelten Maisbauern ihr Saatgut zum Schutz vor dem Maiswurzelbohrer mit dem Insektizid Chlotianidin. Das hatte verheerende Folgen: Rund 330 Millionen Honigbienen starben, weil sich das Pflanzenschutzmittel während der Aussaat von den gebeizten Maiskörnern löste. Über die Abluft der Sämaschinen nach außen geblasen und vom Wind weiter verteilt, fiel der Chlotianidin-Staub auf Blätter und Blüten in der näheren Umgebung und vergiftete die Bienen, die sich dort zum Pollensammeln niederließen.

Wissenschaftler um Jörg Degenhardt vom Max-Planck-Institut für chemische Ökologie in Jena haben jetzt eine Möglichkeit gefunden, den Einsatz solcher Gifte zu vermeiden oder zumindest einzuschränken. Dabei nutzen sie das altbekannte Prinzip: »Der Feind meines Feindes ist mein Freund.« In diesem Fall handelt es sich bei den Widersachern des Schädlings um Fadenwürmer der Gat-

tung *Heterorhabditis*, die den Käferlarven den Garaus machen können.

Der Maiswurzelbohrer ist ein Verwandter des Kartoffelkäfers. Er stammt ursprünglich aus Amerika und gilt dort als der gefährlichste Maisschädling. Man nimmt an, dass er während des Balkankriegs Anfang der 1990er Jahre durch amerikanische Kampfflugzeuge nach Europa eingeschleppt wurde. Zwar hätte er den Atlantik von allein nicht überwinden können, aber ansonsten ist er nicht auf den Menschen angewiesen, um sein Territorium zu erweitern – die Käfer bringen es fertig, bis zu 25 Kilometer am Stück zu fliegen. Nicht zuletzt dank dieser Fähigkeit sind sie auch in Europa auf dem Vormarsch. Pro Jahr dehnen sich stark befallene Gebiete um bis zu 80 Kilometer aus.

Gefräßige Larven

Die größte Gefahr droht dem Mais dabei nicht von den ausgewachsenen Käfern. Diese fressen zwar auch Teile der Pflanze, aber den größten Schaden richten die Larven an. Sie ernähren sich von den Wurzeln, in die sie – getreu ihrem Namen – regelrechte Löcher bohren. Die Pflanzen können dadurch nicht mehr ausreichend Wasser und Nährstoffen aufnehmen und knicken um oder verkümmern. Maßnahmen gegen die Übeltäter sind also dringend geboten.

Außer der chemischen Keule zählt dazu das Einhalten einer bestimmten Fruchtfolge, wobei Mais nur alle drei Jahre an die Reihe kommt. Das entzieht den Larven ihre Lebensgrundlage und lässt sie verhungern. Allerdings müssen als Wechselfrucht zweikeimblättrige Pflanzen wie Klee, Luzerne oder andere Leguminosen verwendet werden, weil nur sie für den Käfer völlig ungenießbar sind. Für Großbauern, die nach maximalem Ertrag streben, ist das nicht rentabel, weshalb sie Mais oft in Monokultur anbauen.



PETER BAUFELD/JULIUS KÜHN-INSTITUT (00)

Ein Schädling in seinem Element: Maiswurzelbohrer krabbeln auf Maiskolben.



Eine Larve des Maiswurzelbohrers macht sich über Maiswurzeln her. Doch bald dürften ihm die Fadenwürmer im Hintergrund das Handwerk legen.

Neuchâtel entdeckten, einen Duftstoff ab, sobald die Larven an ihren Wurzeln knabbern. Diese Substanz, (E)- β -Caryophyllen (kurz: E β C), lockt die Nematoden an, die dann die Larven befallen und töten.

Allerdings ist vielen amerikanischen und auch einigen europäischen Hochleistungssorten – wahrscheinlich im Verlauf der Züchtung – die Fähigkeit abhandengekommen, den Duftstoff zu produzieren. Degenhardt und seine Kollegen wollten deshalb herausfinden, ob es möglich ist und sich lohnt, den Pflanzen diese Fähigkeit zurückzugeben. Also schleusten sie ein E β C-kodierendes Enzym aus der Gewürzpflanze Oregano gentechnisch in eine Maislinie ein. Die Wurzeln dieser transgenen Pflanzen gaben den Duftstoff daraufhin kontinuierlich an den Boden ab.

Ihnen bietet der Einsatz von natürlichen Feinden des Maiswurzelbohrers – in Form besagter Fadenwürmer der Art *Heterorhabditis megidis* – eine viel versprechende Option. Doch wie lässt sich das konkret bewerkstelligen? Fadenwürmer künstlich zu züchten und auszubrin-

gen wäre nicht praktikabel. Außerdem befinden sich natürlicherweise große Mengen davon im Boden. Man muss sie also nur anlocken. Tatsächlich tun das viele Maispflanzen ohnehin. Sie sondern, wie vor vier Jahren Wissenschaftler um Sergio Rasmann von der Université de

ANZEIGE

Konzentrierter. Belastbarer. Ausgeglichener.*

Die täglichen Aufgaben im Beruf und privat stellen mit den Jahren wachsende Anforderungen an die Konzentration und Gehirnleistung. Bei nachlassender mentaler Leistungsfähigkeit kommt es darauf an, die Kraftwerke der Gehirnzellen zu aktivieren. **Tebonin®** aktiviert die Energieproduktion in den Gehirnzellen. Für mehr Gehirnleistung und mehr Konzentration bei nachlassender mentaler Leistungsfähigkeit.



Tebonin®

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

Tebonin® konzent 240 mg 240 mg/Filmtablette. Für Erwachsene ab 18 Jahren. **Wirkstoff:** Ginkgo-biloba-Blätter-Trockenextrakt. **Anwendungsgebiete:** Zur Behandlung von Beschwerden bei hirnganisch bedingten mentalen Leistungsstörungen im Rahmen eines therapeutischen Gesamtkonzeptes bei Abnahme erworbener mentaler Fähigkeit (demenzielles Syndrom) mit den Hauptbeschwerden: Rückgang der Gedächtnisleistung, Merkfähigkeit, Konzentration und emotionalen Ausgeglichenheit, Schwindelgefühle, Ohrensausen. Bevor die Behandlung mit Ginkgo-Extrakt besonnen 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: September 2009 T/09/09/1



Tebonin®

stärkt
Gedächtnisleistung
und Konzentration.*

Ginkgo-Spezialextrakt
EGb 761®

- Pflanzlicher Wirkstoff
- Gut verträglich



Mit der Natur.
Für die Menschen.

Dr. Willmar Schwabe GmbH & Co. KG

www.tebonin.de

Um sich letzte Gewissheit zu verschaffen, unternahmen die Forscher ein Freilandexperiment. Sie bepflanzten 30 Versuchsfelder mit je acht transgenen und acht unbehandelten Maispflanzen der gleichen Linie. Nach drei Wochen infizierten sie den Boden mit Eiern des Maiswurzelbohrers. Weitere drei Wochen später fügten sie, um einheitliche Bedingungen zu garantieren, pro Versuchsfeld jeweils 600 000 Fadenwürmer hinzu.

Die Ergebnisse waren eindeutig: Die modifizierten Pflanzen hatten wesentlich geringere Wurzelschäden. Außerdem fanden sich bei ihnen etwa 60 Prozent

weniger ausgewachsene Käfer, was ungefähr dem Wirkungsgrad herkömmlicher Insektizide entspricht. »Dieser Versuch war enorm wichtig für uns«, bekräftigt Degenhardt. »Es ist eine Sache, irgendwelche Ergebnisse im Labor zu erzielen, aber wirklich entscheidend sind Experimente unter realen Bedingungen.«

Im Prinzip könnte man das Gen für den Duftstoff natürlich auch auf herkömmliche Art einkreuzen, räumt der Forscher ein. Allerdings »war es für unseren Versuch wichtig, einen direkten Vergleich zu haben. Bei einer Kreuzung hätten wir nicht sicher sein können, ob tatsächlich EßC für den Erfolg verant-

wortlich ist oder ob vielleicht ein anderes Merkmal ausschlaggebend war. EßC ist nämlich nur einer von mehreren Abwehrmechanismen.«

Störungen eines anderen solchen Mechanismus könnten vielleicht auch erklären, warum sich der Maiswurzelbohrer in Europa weiter ausbreitet, obwohl hier die meisten Sorten den Duftstoff produzieren. Möglich wäre auch, dass der Boden schlicht weniger Fadenwürmer enthält. Bisher kann man darüber nur spekulieren.

Andreas Baumann ist freier Wissenschaftsjournalist in Darmstadt.

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

Lebensborn statt Todesbote

Ein Molekülpaar, das bekannt dafür ist, Zellen in den Selbstmord zu treiben, zeigte nun überraschenderweise den gegenteiligen Effekt: Es regte die Produktion von Neuronen im Gehirn an.

Von Stefanie Reinberger

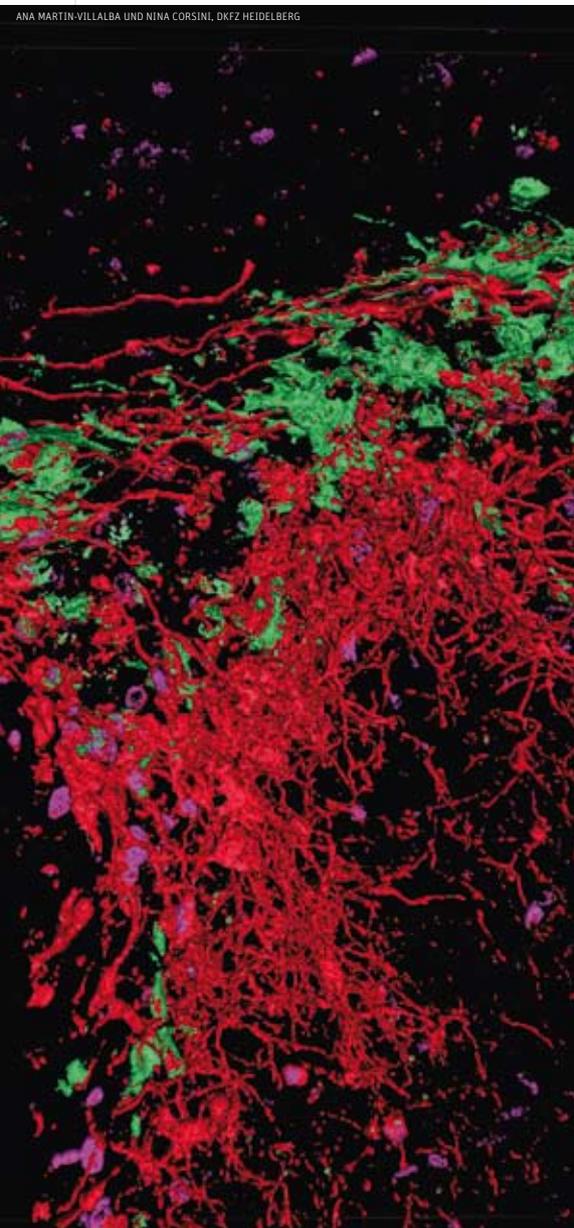
Der Tod hat eine Nummer. Mit CD95 bezeichnen Wissenschaftler ein Eiweißmolekül, das sich in unterschiedlichen Konzentrationen auf der Oberfläche der meisten Körperzellen befindet. Heftet sich sein molekularbiologisches Gegenstück, der Todesbote CD95L, an diesen Rezeptor, löst das eine Kaskade zellulärer Prozesse aus, die in kontrollierter Weise zum Tod der Zelle führen. Dieser programmierte Selbstmord – fachsprachlich Apoptose genannt – dient im Körper dazu, entartetes oder nicht mehr benötigtes Gewebe zu beseitigen. So ermöglicht er die Entwicklung des Organismus, bei der auch Zellen planmäßig sterben müssen, und schützt vor Krankheiten wie Krebs.

Auf dieser 3-D-Rekonstruktion eines Schnitts durch ein Mäusehirn sind Nervenzellen, an die sich das Molekül CD95L gebunden hat, grün angefärbt. Rot erscheinen neu gebildete Neurone, die in der Abbildung besonders zahlreich und verzweigt vorliegen. Zellen, die sich gerade teilen, sind violett markiert.

Die tödliche Funktion des CD95-Moleküls und seines Liganden CD95L ist etabliertes Lehrbuchwissen. Doch nun stellen es junge Wissenschaftlerinnen aus Heidelberg in Frage. Ana Martin-Villalba, Leiterin der Arbeitsgruppe Molekulare Neurobiologie beim Deutschen Krebsforschungszentrum, und ihre Mitarbeiterin Nina Corsini haben eine überraschende Entdeckung gemacht: Das Todesduo kann auch zum Quell neuen Lebens werden.

Ausgangspunkt für diesen erstaunlichen Fund war die Beobachtung, dass neuronale Stammzellen zwar eine große Anzahl von CD95-Rezeptoren auf ihrer Oberfläche tragen, von deren Stimulation durch den Liganden jedoch völlig unbeeindruckt bleiben. Ganz ähnlich wie leider auch viele Krebszellen schießen sie den Selbstmordbefehl des Molekülduos zu ignorieren.

Das faszinierte die Forscherinnen. Um dem Phänomen auf den Grund zu gehen, stimulierten sie bei Hirnstammzellen von Menschen und Mäusen in der Kulturschale den CD95-Rezeptor. Dabei zeigte sich, dass diese Zellen das Apoptosesignal nicht nur einfach missachteten, sondern es zum Anlass nahmen, sich zu vermeh-



Springers Einwürfe

Was mir mein Außerirdischer sagte

Nach 50 Jahren ein erster Kontakt?

Mein Außerirdischer sah aus, als könne er nicht bis drei zählen. Er schnipste leise mit den zwei Fingern seiner einzigen Hand, um mich zu wecken. Schläfrig blickte ich in die großen, schwarzen Augen über mir und lauschte der sanften Melodie seiner Sprache in meinem Kopf.

»Seit 50 Jahren sucht ihr aggressiv-musischen Kohlenwasserstoff-Zweibeiner nun schon nach intelligentem Leben im All«, sang er leise. »Damals, im September 1959, schlugen eure Physiker Giuseppe Cocconi und Philip Morrison in der Zeitschrift ›Nature‹ vor, den Himmel nach künstlichen Radiosignalen zu durchforschen. Erst wurde dafür Geld bewilligt, später wieder gestrichen; aber nie habt ihr die Suche ganz aufgegeben; das verdient unseren Respekt, finde ich. Mit ATA, dem *Allen Telescope Array*, hat euch der Microsoft-Millionär Paul Allen jetzt ein schönes Radioteleskopfeld in Kalifornien geschenkt: 42 Schüsseln, jede sechs Meter groß, eigens für die Suche nach außerirdischer Intelligenz. Damit werdet ihr etwas Überraschendes finden – ich darf nur nicht sagen, was. Eigentlich sollte ich gar nicht hier sein«, flüsterte er und drehte sein kugelförmiges Haupt einmal im Kreis herum.

»Euer Astronom Frank Drake«, fuhr mein Gast fort und machte es sich auf meiner Brust bequem, »schätzt die Anzahl intelligenter Zivilisationen in eurem Sternensystem auf 10 000. Das ist stark übertrieben, muss ich dir leider sagen, es sind exakt 3004, wenn man euch mitzählt. Die Faustregel lautet: Leben häufig, Intelligenz die Ausnahme. Dabei hat euer Drake bei seiner Schätzung die Anzahl erdähnlicher Planeten sogar viel zu niedrig angesetzt. In Wirklichkeit kreisen sie überall – um Sonnen wie die eure, aber auch um Rote Riesen und Braune Zwerge. Und eure Fantasie bezüglich der möglichen Lebensformen traut sich überhaupt nichts. Glaub mir, ich habe soziale Pilzgeflechte gesehen, sprechende Pflanzen, Fischstaaten und sogar eine denkende Steinwüste auf Siliziumbasis – die freilich nur einmal, ausnahmsweise, bei Beteigeuze.«

»Du nimmst mir den Atem«, stöhnte ich. Er blinzelte langsam erst mit dem linken, dann mit dem rechten Auge und glitt von meiner Brust auf die Bettkante. »Geh nicht, bleib noch ein wenig«, bat ich, »über deinen Besuch bin ich froh.« – »Warum?«, fragte er. – »Weil es dich gibt«, erwiderte ich. »Unser Physiker Enrico Fermi meinte einmal, wenn es überall Außerirdische gäbe, müssten sie uns längst besucht haben; also gäbe es gar keine. Andere haben aus dem Ausbleiben eines Kontakts geschlossen, dass offenbar jede Zivilisation sich selbst zerstört, bevor sie zur interstellaren Kontaktaufnahme fähig wird; auf diese Idee kamen wir in der Zeit des Kalten Kriegs, als wir ... « – »Ich weiß, ich weiß«, fiel mir der Besucher ins Wort, »groß- oder kleintechnische Selbstzerstörung kommt vor. Die Wahrscheinlichkeit für einen planetaren Kollaps liegt bei gut 50 Prozent.«

»Wie bist du überhaupt hergekommen?«, fragte ich, scheinbar immer schläfriger, um meine Neugier zu verbergen. – »Damit«, erwiderte der Außerirdische. Er formte mit seinen zwei Fingern einen Kreis, dessen Inneres wie ein Fernrohr in die Länge zog; darin erschienen Sterne. Er öffnete die Fingerspitzen ein wenig und zog aus dem Abstand Funken, irisierenden Staub. »Ein bisschen Quantenschaum, das genügt«, erklärte er. »Geht aber schnell zur Neige. Muss fort.«

Er erhob sich, bis er an der Decke schwebte. »Kontakt ist verboten«, hörte ich in meinem Kopf. »Bin ausgerissen, überfällig, schlimm.« Er legte einen Finger zwischen seine Augen und sagte eindringlich: »Du hast geträumt. Schlaf weiter.«



Michael Springer



Jetzt Cicero gratis testen!

Wie keine andere Zeitschrift in Deutschland, bietet Cicero, das Magazin für politische Kultur, monatlich Standpunkte namhafter Autoren zum aktuellen Geschehen in Politik, Wirtschaft und Gesellschaft.

Überzeugen Sie sich selbst und bestellen Sie jetzt ein Gratis-Exemplar!

■ Ja, ich will Cicero gratis testen!

Falls Sie Cicero nach dem Gratis-Test nicht weiterlesen möchten, reicht eine kurze Nachricht an den Cicero-Leserservice.

Name, Vorname

Straße, Nr.

PLZ, Ort

Telefon

E-Mail

Unterschrift

Ja, ich bin damit einverstanden, dass Cicero und der Ringier Verlag mich künftig per Telefon oder E-Mail über aktuelle Angebote informieren.



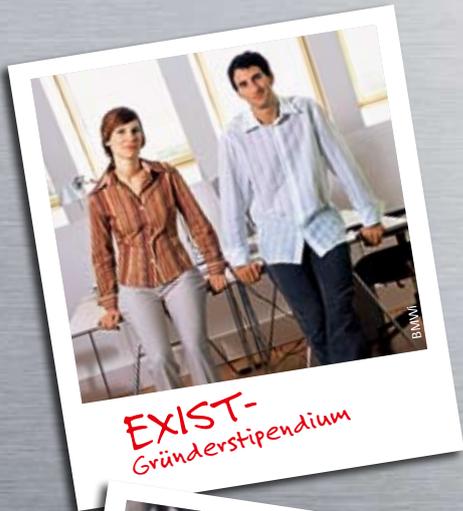
✉ Cicero-Leserservice
20080 Hamburg

@ abo@cicero.de

☎ 0800 282 2004

Bestellnummer: 675209

www.cicero.de/abo



EXISTenziell für Ihren Erfolg

Gute Ideen gibt es viele. Damit diese Realität werden, braucht es Zeit und vor allem Geld. Unser Förderprogramm EXIST begleitet angehende Existenzgründer und Existenzgründerinnen sowie Forscherteams aus Hochschulen und Forschungseinrichtungen auf dem Weg zum Erfolg.

EXIST-Gründerstipendium unterstützt innovative Unternehmensideen von der Frühphase bis zur Gründung.

EXIST-Forschungstransfer konzentriert sich auf besonders anspruchsvolle Hightech-Gründungen.

Alle Informationen, alle Details unter:
www.exist.de

ren und zu reifen Neuronen zu entwickeln (*Cell Stem Cell, Bd. 5, S. 178*). Das Rezeptor-Liganden-Paar schien in diesem Fall also eine bislang unbekannte, seiner normalen Aufgabe völlig entgegengesetzte Funktion zu haben.

Noch stand allerdings nicht fest, ob der Effekt auch im lebenden Organismus auftritt. Um das zu prüfen, klemmten die Forscherinnen bei Mäusen für kurze Zeit die Halsschlagader ab. So erzeugten sie eine Mangel durchblutung des Gehirns, wie sie für Schlaganfall oder Herzstillstand typisch ist. Schon früher war Martin-Villalba bei solchen Versuchen aufgefallen, dass das Hirngewebe als Reaktion auf die Unterversorgung mit Sauerstoff vermehrt CD95L ausschüttet. Die junge Spanierin hatte das damals als Apoptosesignal gedeutet, das dazu dient, beschädigte Zellen zu beseitigen. Nun drängte sich eine völlig andere Interpretation auf.

Molekülduo lässt Hirnzellen nachwachsen

Den Beweis zu erbringen war jedoch schwierig. »Das Problem von Untersuchungen am lebenden Mäusegehirn ist, dass zwar Stammzellen vorhanden sind und auch neue Neurone entstehen – aber in so geringem Umfang, dass wir kaum auf messbare Effekte hoffen konnten«, erklärt Martin-Villalba. Deshalb transplantierten die beiden Forscherinnen ihren »Schlaganfall«-Mäusen zusätzlich in der Kulturschale gezüchtete neuronale Stammzellen. Diese müssten, wenn der wachstumsfördernde Effekt des Molekülduos auch im Gehirn aufträte, sich vermehren und zu funktionsfähigen Nervenzellen heranreifen. Und tatsächlich: Als Martin-Villalba und Corsini nach zehn Wochen die Nagerhirne inspizierten, entdeckten sie zahlreiche neue Neurone, die sich gut in das Hirngewebe integriert hatten.

Die Forscherinnen machten auch die Gegenprobe und verpflanzten Stammzellen, die genetisch so manipuliert waren, dass sie keinen CD95-Rezeptor auf ihrer Oberfläche trugen. Das Signal des Liganden lief dadurch ins Leere. Wie erwartet, blieb bei den so behandelten Mäusen die Neubildung von Nervenzellen und damit die Regeneration des Gehirngewebes aus.

Einen zusätzlichen Beweis für das Nachwachsen von Neuronen lieferten Lerntests. Dabei schnitten die Versuchstiere aus der zweiten Gruppe wesentlich

schlechter ab als ihre Artgenossen, denen neuronale Stammzellen mit CD95-Molekülen auf der Oberfläche transplantiert worden waren. Für Martin-Villalba steht damit fest: CD95 und CD95L überbringen hier keine Todesbotschaft sondern die Aufforderung: »Erneuere mich!«.

Könnten diese Ergebnisse eines Tages zur besseren Behandlung der Folgeschäden eines Schlaganfalls dienen? »Dazu ist möglicherweise die Anzahl der natürlicherweise vorhandenen Stammzellen zu gering«, gibt die Wissenschaftlerin zu bedenken. Sicher ist jedoch, dass die regenerative Medizin von den Ergebnissen des Heidelberger Forscherteams profitiert. Mit Hilfe des Signalmoleküls CD95L lassen sich in der Kulturschale gezielt neue Nervenzellen züchten, die als Ersatz für zerstörtes Gewebe in Frage kommen.

Doch Martin-Villalba glaubt, dass ihre spektakulären Ergebnisse noch viel allgemeinere Bedeutung haben. Nach Ansicht der Forscherin, die sich schon seit vielen Jahren mit dem programmierten Zelltod und der Funktionsweise von CD95 und CD95L beschäftigt, ist der beobachtete Effekt keineswegs auf neuronale Stammzellen beschränkt: »Bei Krebszellen, die als resistent gegenüber dem Apoptosesignal gelten, tritt er möglicherweise ebenfalls auf.«

Dafür sprechen zumindest Untersuchungen an Glioblastomen, der häufigsten Sorte von Gehirntumoren. Wie Martin-Villalba und ihr Team schon im vergangenen Jahr feststellten, können Zellen dieser Krebsart dank der Signale von aktivierten CD95-Rezeptoren besser in das umliegende, gesunde Gewebe eindringen (*Cancer Cell, Bd. 13, S. 235*).

Das hat eine paradoxe Konsequenz. Bisher galt es als viel versprechender Ansatz in der Tumorthherapie, Krebszellen durch Stimulation des CD95-Rezeptors zum Absterben zu bringen. Nun fragt sich, ob dieses Vorgehen nicht vielleicht mehr schadet als nutzt. »Für mich lautet die Konsequenz aus unseren Ergebnissen, dass wir die Rolle des vermeintlichen Todesduos generell überprüfen müssen«, erklärt Martin-Villalba und nimmt in Kauf, mit dieser provokanten Aussage auf Widerstand unter Forscherkollegen zu treffen. Doch manchmal müssen auch Lehrmeinungen revidiert werden.

Stefanie Reinberger ist freie Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg.

WÜSTE PLÄNE

Das Desertec-Konsortium will Sonnenstrom aus den Wüsten Nordafrikas und des Nahen Ostens nach Europa exportieren. Doch es lohnt nicht, die Unwägbarkeiten eines solchen Großprojekts in Kauf zu nehmen.

Die Idee ist zu verlockend, und darum soll das Projekt Desertec (SdW 9/2009, S. 81) sie bis 2050 in die Tat umsetzen. Sonnenstrom aus der Wüste, 700 Terawattstunden jährlich: Das ist mehr als die rund 617 Terawattstunden, die Deutschland im Jahr 2008 brutto verbrauchte, und rund 20 Prozent des gegenwärtigen Strombedarfs der Europäischen Union. Die Wüsten sollen die MENA-Staaten, also Nordafrika und der Nahe Osten, beisteuern.

Ein Dutzend meist deutscher Unternehmen, darunter Deutsche Bank und Münchener Rück, sind den ersten Schritt gegangen und haben jüngst auch europäische und nordafrikanische Energieversorger in ihre Desertec-Initiative aufgenommen. Ermutigung gab es von der Bundeskanzlerin (»Ich freue mich«), ihrem bisherigen Vizekanzler (»Von Anfang an habe ich an der Vision einer Solarbrücke über das Mittelmeer gearbeitet«) und vom EU-Kommissionspräsidenten. Auch das Europaparlament debattierte bereits über das Vorhaben.

Ein kleiner Rückblick auf eine andere Variante der Energiegewinnung: Zwischen 1950 und 2008 beliefen sich die staatlichen Fördermittel für Kernenergie, so rechnete Greenpeace jüngst vor, auf 165 Milliarden Euro; weitere Kosten von fast 100 Milliarden kämen noch auf die Bürger zu. Mindestens. Als Subvention deklariert hatte die Bundesregierung indessen nur einen winzigen Bruchteil davon. Als Steuerzahler und Stromkunden wurden die Deutschen, ohne dass ihnen dies allzu bewusst werden sollte, schlicht zweimal zur Kasse gebeten. Obendrein durften sich die Konzerne vor Haftpflichtversicherungen drücken; die hätten immerhin das Risiko des größten anzunehmenden Unfalls abdecken müssen. Derweil erreicht auch der Skandal um den Salzstock Asse immer neue Dimensionen. Es geht wahlweise um die »Geschichte einer Lüge«, wie kürzlich die »Zeit« schrieb, oder um »die Geschichte eines staatlichen Versagens«, wie es in einer dort ebenfalls zitierten Dissertation über die Endlagerung von Atommüll in Deutschland hieß. In jedem Fall wurde verantwortungslos gehandelt, gelogen und getäuscht – von Konzernen, Politikern und Wissenschaftlern.

Geldgier und Machtwille werden auch bei dem auf eine Investitionssumme von zunächst 400 Milliarden Euro angelegten Desertec-Projekt zu Mauscheleien und Machenschaften führen. Dieses Risiko sollten wir aber gar nicht erst eingehen, zu weit reichend wären die Folgen. Nordafrikas Länder leiden unter hoher Arbeitslosigkeit und Migrationsdruck aus der Subsahara. Der Entwicklungsbedarf ist hoch, die Regime sind autoritär, und natürlich spielen religiöser Fundamentalismus und Terror eine Rolle. Entwicklungshilfe und wirtschaftliche Zusammenarbeit, politisch sensibel und nach demokratischen Spielregeln, sind also geboten. Gerade das ist aber nicht die Stärke von Energiekonzernen und ihren Lobbys. Sie werden als einziges Ziel den Schutz gigantischer Investitionen verfolgen und sich um des Profits willen – wieder einmal, und diesmal auf dem heiklen MENA-Terrain – um politische oder gesellschaftliche Verwerfungen nicht scheren. Im Kern bleibt daher ein altbekanntes Szenario: Reichere Nationen schicken ihre Gesandten in ärmere Länder, auf dass sie Geschenke verteilen und alsbald mit Rohstoffen wie-

der zurückkehren. Der »Rohstofffluch« – große Ölvorkommen führen gerade in instabileren Ländern zu jahrzehntelanger Misswirtschaft und Korruption – ist keine Erfindung der Ökonomen, sondern Realität (SdW 11/2006, S. 54).

Als Energieversorgungskonzept ist Desertec ohnehin nicht erste Wahl, in 40 (!) Jahren könnte es technisch längst marginalisiert sein. Hingegen existieren unzählige Verfahren, Energie nachhaltig zu erzeugen und auch zu sparen, um deren Realisierbarkeit und Erfolgchancen es bestens bestellt ist. Sieben Bundesländer müssten nur die vorhandenen Potenziale ausschöpfen, um ihren Strombedarf schon heute komplett aus erneuerbaren Energien zu decken, hatte die Forschungsstelle für Umweltpolitik an der FU Berlin bereits 2007 im Rahmen einer Studie für das Bundesumweltministerium (BMU) herausgefunden. In Südeuropa ist noch viel mehr möglich. Und der Anteil der Erneuerbaren am deutschen Stromverbrauch liegt auch ohne Wüstenstrom schon bei 15,1 Prozent. Insgesamt stehe in Westeuropa gar, so eine BMU-Publikation vom Juni 2009, »ein gesichertes technisches Potenzial erneuerbarer Energien von mindestens 40 000 Petajoule pro Jahr zur Verfügung, dies entspricht etwa 60 Prozent des gegenwärtigen Primärenergieverbrauchs der EU-25 Länder«. Und damit seien längst nicht alle Möglichkeiten ausgeschöpft.

Desertec ist in der geplanten Größenordnung zudem ein unkalulierbares Novum. Beispielsweise benötigen solarthermische Kraftwerke (CSP), wie das Washingtoner World Resources Institute (WRI) im Mai vorrechnete, pro erzeugter Energiemenge etwa so viel Wasser wie ein Kohlekraftwerk. Denn am Ende des Dampfkreislaufs muss Kühlwasser zur Verfügung stehen, damit das System mit optimalem Wirkungsgrad arbeitet. Das solarthermische Vorzeigekraftwerk Andasol in Spanien etwa braucht jährlich 870 000 Kubikmeter Grundwasser. Doch gerade in Wüstengebieten ist Wasser knapp und wird im Zuge des Klimawandels noch knapper. Dies könnte die Entwicklung von CSP-Anlagen »erheblich einschränken«, heißt es in der WRI-Studie, die durchaus wohlwollend die solarthermischen Potenziale im Südwesten der USA, in China, Indien und im MENA-Raum ausgelotet hatte.

Auch viele weitere Fragen sind noch offen, möglicherweise zu viele. In seinem an desaströsen Schilderungen reichen Buch »Weiße Elefanten« (DVA, 1999) analysierte der Gießener Technikhistoriker Dirk van Laak Anspruch und Scheitern technischer Großprojekte im 20. Jahrhundert. Scheitern, heißt es dort, erfolge auch »an der Neigung, unliebsame Faktoren so lange auszublenden, bis die komplexesten Systeme berechenbar erscheinen«. Manche Pläne, so beruft sich van Laak auf den französischen Techniksoziologen Bruno Latour, werden eben letztlich nur als *Idee* geliebt, als eine Möglichkeit der modernen Wissenschaft. Dass deren erfolgreiche Verwirklichung extrem abhängig von vielen Voraussetzungen ist, erkennen die Beteiligten aber nicht an – und verlassen sich stattdessen auf die Autonomie der Technologie. Das hat schon oft das Ende einer schönen Idee bedeutet.

Thilo Körkel, Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«

Der Mann, der IN DIE KÄLTE GING

Ein Gespräch mit dem Physiker Wolfgang Ketterle: über zerlegte Radios, Stabhochsprung, den absoluten Nullpunkt – sowie den Wissenschaftskrimi, für den der Heidelberger zusammen mit zwei Kollegen 2001 den Nobelpreis für Physik erhielt.

Von Hubertus Breuer

Wolfgang Ketterle ist viel beschäftigt. Der in Heidelberg aufgewachsene, heute in Boston lebende Physik-Nobelpreisträger leitet am renommierten Massachusetts Institute of Technology (MIT) drei Labors. Er hält Vorlesungen und Vorträge, gibt Seminare, jettet zu internationalen Konferenzen, nimmt regelmäßig Ehrungen entgegen und muss zudem Drittmittel für seine Forschung eintreiben. Kurz, seine Zeit ist knapp. Doch vor dem Gespräch für unser Porträt musste Ketterle, 52, erst geduldig einiges über sich ergehen lassen.



ALLE FOTOS DES ARTIKELS: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / MARK OSTOW

In dem großzügigen Büro mit Blick auf etwas Grün zwischen den MIT-Gebäuden beginnt der Interviewer von der Viele-Welten-Theorie des 2001 verstorbenen Princeton Philosophen David Lewis zu reden. Dieser hielt alles, was logisch möglich ist, auch für real – nur nicht hier, sondern in anderen Universen im logischen Möglichkeitsraum. Das ist wohl zu viel: Ketterle schlägt die Hände zusammen – solche Probleme erscheinen ihm dann doch etwas zu philosophisch. Da besinnt sich der Reporter wieder seines Auftrags.

Inzwischen hat der Fotograf Mark Ostow das Fotografieren eingestellt. Und verwickelt Ketterle unversehens in einen Disput über seine Überzeugung, dass Digitalfotografie doch mehr Tiefenschärfe erlaube als Filmfotografie. Der in Optik recht bewanderte Ketterle erklärt darauf geduldig, warum er das nun gar nicht glaube. Was im Grund auf die Einsicht hinausläuft, dass ein Objektiv ein Objektiv ist. Der Fotograf gibt sich schließlich geschlagen, greift wieder zu seiner Kamera und schießt weiter Bilder.

Erst jetzt kann Ketterle damit beginnen, wofür er sich den Nachmittag frei gehalten hat: von seinem Lebensweg zu berichten sowie von seiner Faszination für kalte Atome. Vor allem vom Rennen um das so genannte Bose-Einstein-Kondensat Anfang der 1990er Jahre. Das ist ein Zustand der Materie am absoluten Temperaturnullpunkt, wo fast jede Energie aus den Atomen entwichen ist und sie plötzlich alle wie auf Befehl im Gleichtakt schwingen. Das sei »Quantenmechanik sichtbar gemacht«, meint Wolfgang Ketterle. Aber auch von Designermaterie spricht der Physiker, die nicht nur helfe, neue Materialien entwickeln, sondern auch, Phänomene wie Hochtemperatursupraleitung und Magnetismus zu verstehen.



ZUR PERSON

Wolfgang Ketterle wurde im Oktober 1957 in Heidelberg geboren. Nach dem Physikstudium an der Universität Heidelberg und der TU München promovierte er 1986 an der LMU München mit einer Arbeit am Garching Max-Planck-Institut für Quantenoptik. 1990 wechselte er nach einer Postdoc-Stelle an der Universität Heidelberg im Bereich Verbrennungsforschung an das Massachusetts Institute of Technology (MIT) in Boston, um bei dem Atomphysiker David Pritchard über kalte Atome zu forschen. 1993 wurde er dort Assistenzprofessor. Im September 1995 gelang es ihm, das Bose-Einstein-Kondensat zu beobachten, allerdings erst wenige Monate nachdem dieser Coup dem Team um Eric Cornell und Carl Wieman an der University of Colorado in Boulder gelungen war. In den folgenden zwei Jahren veröffentlichte Ketterle mit seinem Team jedoch mehrere Arbeiten, die grundlegende Eigenschaften des Bose-Einstein-Kondensats erstmals beschrieben. 2001 erhielten Cornell, Ketterle und Wieman für ihre Entdeckungen den Nobelpreis für Physik. Ketterle forscht seither weiter an kalten Atomen: Er stellte den ersten Atomlaser vor, erforscht die Hochtemperatursupraleitung und widmet sich in jüngster Zeit Fragen des Magnetismus.

Spektrum der Wissenschaft: Professor Ketterle, Sie sprechen im Zusammenhang mit Wissenschaft oft von Schönheit. Was hat es damit auf sich?

Prof. Dr. Wolfgang Ketterle: Natur ist schön. Wenn wir in der Natur Details sehen, bedeutet das Wahrnehmung von Schönheit. Wenn Schnee fällt, und man betrachtet die Schneekristalle unter einem Mikroskop, sieht man wunderschöne Kristallstrukturen. Wenn man Natur erforscht, begegnet einem Schönheit auf Schritt und Tritt.

Spektrum: Was ist das Wesen der Schönheit?

Ketterle: Einfachheit, Eleganz, Klarheit – etwas, was uns erfreut. Manchmal kann ich es selbst kaum glauben, wie gut sich mikroskopische Vorgänge in der Natur beschreiben lassen – und dass man in einfachen Bildern vermitteln kann, was im Innersten der Natur vor sich geht. Das ist nicht nur wichtig für die Naturwissenschaften; es ist eine kulturelle Errungenschaft – ähnlich wie die Werke von Mozart oder Goethe.

Spektrum: Das Bose-Einstein-Kondensat (siehe Lexikon II, S. 29), für dessen Mitentdeckung Sie 2001 den Nobelpreis erhielten, ist in Ihren Augen also ebenfalls schön?

Ketterle: Natürlich. Ein Bose-Einstein-Kondensat ist wie ein Schneekristall, der sich erst bei sehr tiefen Temperaturen bildet. Stellen Sie sich vor, die ganze Erde wäre eine heiße Wüste, niemand würde Schnee oder Eis kennen. Jetzt baut ein Wissenschaftler einen Kühlschrank und stellt Wasser hinein. Nach einiger Zeit sieht der Mann das erste Mal Schnee und Eis. In meiner Forschung, in der ich zu noch weit tieferen Temperaturen, fast bis zum absoluten Nullpunkt, vorgedrungen bin, ist es ähnlich. Ich habe zweifellos Schönes entdeckt.

Spektrum: Beim Bose-Einstein-Kondensat sieht man in den Vakuumkammern eher eine Gaswolke, die sich mit einem Detektor gerade mal als Schatten wahrnehmen lässt.

Ketterle: Sicher, aber Sie sehen nicht einfach eine Gaswolke mit Schatten. Sie sehen auch, wie der Wellencharakter der Atome mit bloßem Auge erkennbar wird – die Atome beginnen synchron zu schwingen. Das ist Quantenmechanik, die unter die Haut geht, jedenfalls mir. Es hilft natürlich, etwas von Quantenmechanik zu verstehen.

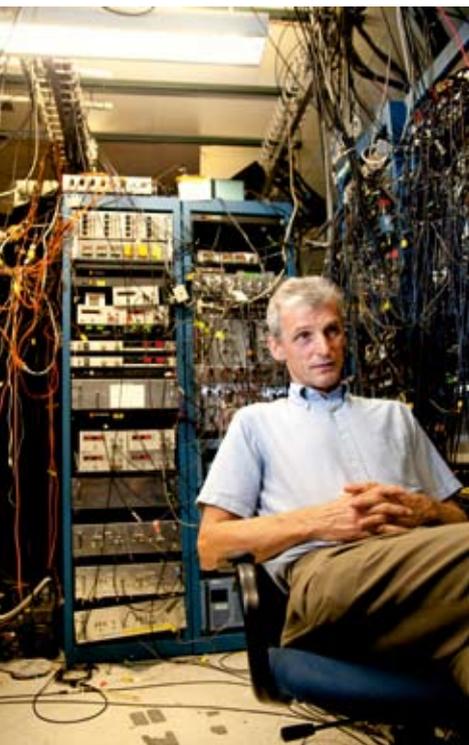
Spektrum: Ihr Mentor und Kollege, David Pritchard, der Sie 1990 ans MIT holte, attes-

LEXIKON I

absoluter Nullpunkt

Wenn nahezu alle Energie aus Atomen entwichen ist, nähern sie sich dem absoluten Nullpunkt der Temperatur an, der bei minus 273,15 Grad Celsius liegt. Dabei gehen die Atome in einen neuen Aggregatzustand über – den des Bose-Einstein-Kondensats.

»Ich erinnere mich an Momente, in denen ich eher zu wenig Selbstbewusstsein hatte«



tiert Ihnen einen ausgezeichneten wissenschaftlichen Geschmack. Hat das etwas mit Schönheit zu tun?

Ketterle: Nein, damit meint er wohl eher das wissenschaftliche Urteilsvermögen. Es ist wichtig, ein Gefühl dafür zu haben: Was ist in der Wissenschaft wichtig und was nicht? Wenn die Studien- und Lehrjahre eines Wissenschaftlers vorbei sind und man eine Arbeitsgruppe leitet, geht es um die Frage: Welche Themen sind wichtig? Wo ist Musik drin? Mehr noch: Unter exzellenten Projektideen muss man gute von sehr guten von unterscheiden können.

Spektrum: Als Sie als Kind angefangen haben, die Welt zu entdecken, lag die Messlatte aber noch nicht so hoch.

Ketterle: Am Anfang stand bei mir die Freude am Entdecken und Basteln. Ich habe alte Radios auseinandergenommen. Bei zwei Tonbandgeräten habe ich einmal den Verstärker des einen auf den Tonkopf des anderen gelegt. So konnte ich das Monogerät für Stereoaufnahmen nützen. Ich habe damals auch Bücher über Elektronik gelesen. Aber es hat mich frustriert, dass die Erklärungen so oberflächlich waren. Heute, wenn mein Sohn mir eine technische Frage stellt, kann ich sie ihm genau beantworten.

Spektrum: Mathematik und Physik fielen Ihnen als Schüler leicht. Sie haben sich aber auch um andere Fächer bemüht, etwa Deutsch oder Biologie, und sich im Sport stark engagiert. Das klingt nach Ehrgeiz.

Ketterle: Ja, ich war ehrgeizig. Im Sportklub der Universität Heidelberg konnte man alle möglichen Disziplinen trainieren. Am besten war ich als Läufer auf der Langstrecke – das mache ich heute noch. Auch an Stabhochsprungwettbewerben habe ich teilgenommen. Allerdings bin ich über die Landesebene nicht hinausgekommen.

Spektrum: Kam über die frühen Erfolge das Selbstbewusstsein, das Ihnen in späteren Jahren geholfen hat?

Ketterle: Ja, vielleicht. Aber ich würde sogar sagen, dass ich mich noch mehr an Momente erinnere, in denen ich eher zu wenig Selbstbewusstsein hatte.

Spektrum: Zum Beispiel?

Ketterle: Als ich nach meinem Grundstudium der Physik in Heidelberg nach München gewechselt bin, war mir nicht klar, in welches Gebiet ich mich vertiefen sollte. Ich wusste nur, dass die Physik in München gut ist. Ein Freund dagegen war schon viel weiter: Er wollte mit einem der führenden Theoretiker über Plasmaphysik arbeiten.

Diese Selbstsicherheit hat mich verunsichert, da mir das fehlte. Mein Freund hat aber übrigens später nie über Plasmaphysik gear-

beitet – und ich habe auch meinen Weg gefunden.

Spektrum: Wie haben Sie Ihre Forschungsschwerpunkte denn ausgewählt? Ihre Diplomarbeit schrieben Sie in theoretischer Physik, aber als Doktorarbeit übernahmen Sie ein experimentelles Thema. Ahnten Sie in sich schon den talentierten Experimentalphysiker?

Ketterle: Nein, das war eher der richtige Schritt aus einem falschen Grund.

Spektrum: Wie bitte?

Ketterle: Als ich 1982 mein Diplom machte, war ich 24. Da habe ich mich viel mit sozialen Problemen und der Dritten Welt beschäftigt. Ein Jahr vor meiner Diplomarbeit bin ich nach Süd- und Mittelamerika gereist. Das hat mir die Augen für soziale Probleme geöffnet. Mit der Theorie allein, fürchtete ich damals, könnte ich im Elfenbeinturm landen. Ich wollte einen stärkeren Realitätsbezug. So bin ich zur experimentellen Atomphysik gekommen.

Spektrum: Und was war der falsche Grund?

Ketterle: Ich arbeite heute wieder ganz nah am Thema meiner Diplomarbeit, Vielteilchenphysik. Die beschreibt, wie viele Atome oder Elektronen die Eigenschaften von Gasen oder Festkörpern bestimmen. Wenn Atome sehr kalt werden, verändert sich die Wechselwirkung der Teilchen untereinander. Auf Konferenzen treffe ich heute Leute, die ich schon während meiner Diplomarbeit kannte und dann zehn Jahre nicht gesehen habe. Ich wollte mein Gebiet wechseln aus Angst vor dem Elfenbeinturm – jetzt bin ich sozusagen wieder dort. Aber ich heute denke anders über die Bedeutung von Grundlagenforschung.

Spektrum: Ihre Doktorarbeit war also experimentell?

Ketterle: Ja. Am Max-Planck-Institut für Quantenoptik begann ich bei Professor Herbert Walther eine Arbeit über die Spurenanalyse in Halbleitermaterialien.

Spektrum: Das Thema haben Sie offenbar bald wieder fallen lassen.

Ketterle: Nach einem Jahr wurde klar, dass es sich so nicht realisieren ließ. Das Thema hätte man nur mit einer ganzen Arbeitsgruppe angehen können. Das war mir eine Lehre – man sollte wissen, wann man sich von einem Projekt verabschieden muss.

Spektrum: Aber Ihre Promotionsarbeit wurde dennoch ein Erfolg.

Ketterle: Richtig. Ich habe im selben Labor über Fragen der Molekülphysik promoviert. Dort wurde plötzlich ein Doktorand gebraucht, um Spektroskopie am dreiatomigen Wasserstoff zu betreiben. Ich war von diesem Thema nicht spontan begeistert. Aber weil ich nicht das Labor wechseln und ganz von vorne anfangen wollte, habe ich es akzeptiert. Ich

habe mich dann voll auf die Molekülphysik konzentriert und war damit erfolgreich.

Spektrum: Experimentalphysik ist doch Ihr großes Talent?

Ketterle: Das habe ich erst bei dieser Gelegenheit entdeckt. Ich konnte zum Beispiel die Intensität des Molekülstrahls in kurzer Zeit deutlich steigern. Mein Betreuer hat damals gedacht: je größer eine bestimmte Linse, desto besser. Und ich habe schnell gezeigt, dass die Linse starke Linsenfehler hatte, dass nur ein winziger Teil in der Linsenmitte genutzt wird. So habe ich schnell viele kleine Sachen verbessert, und es ging gut voran.

Spektrum: Es war aber nicht nur der dreiatomige Wasserstoff, mit dem Sie Erfolg hatten.

Ketterle: Ich las Berichte aus Kanada über Argonhydrid, also eine Verbindung aus dem Edelgas Argon und Wasserstoff. Die brachten mich auf die Idee, nach dem Heliumhydridmolekül zu suchen, also mit Helium an Stelle von Argon. Darüber war so gut wie nichts bekannt. Ich habe dann Helium und Wasserstoff in die Maschine eingefüllt, um dieses Gas zu erzeugen. Ich weiß noch, wie aufregend das war – ich drehe am Spektrografen, schaue im Roten, Grünen, Gelben, Blauen, überall Licht, Licht, Licht!

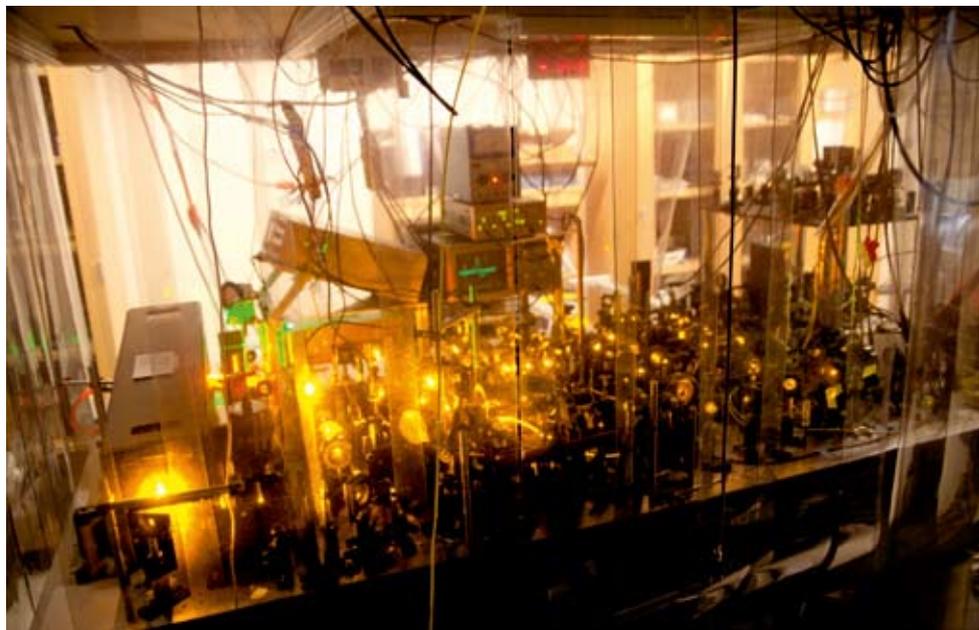
Das Molekül sendete es aus. Es war sein Fingerabdruck, den niemand zuvor je so gesehen hatte. Das war gegen Ende meiner Doktorarbeit. Die Spektren zeigten eine ungewöhnliche Struktur mit vielen Störungen, aber ich konnte sie nach vielen Versuchen schlüssig interpretieren und hatte damit ein tolles Ergebnis. Fünf Publikationen gab das. Die Arbeiten sind nicht viel zitiert, es sind auch nicht meine wichtigsten. Aber das war vielleicht die größte Nuss, die ich je geknackt habe.

Spektrum: Verließen Sie die Grundlagenforschung danach als Reaktion auf die – in Ihren Augen – geringe Bedeutung des Moleküls?

Ketterle: Kleine Moleküle bewegen nicht die Welt, das habe ich damals wie heute so gesehen. Ich habe ja auch keine neuen Prinzipien der Molekülphysik entdeckt. Ich stand an einer Weggabelung und habe mich letztlich nach einem relevanten angewandten Projekt umgesehen. Und das habe ich bei der Verbrennungsforschung bei Jürgen Wolfrum an der Universität Heidelberg gefunden. Die ein- und einhalb Jahre dort waren für mich prägend. Das hat mein Selbstvertrauen gestärkt.

Spektrum: Das hatten Sie doch schon ...

Ketterle: Ich habe an der Laserdiagnostik für Verbrennung gearbeitet. Von Lasern verstand ich etwas, aber von Flammen und Chemie hatte ich keine Ahnung. Deshalb erwartete ich, ich müsste erst einmal ein Jahr lang vor allem Neues lernen. Aber es kam anders. Ich war



schnell produktiv und bekam die Federführung für ein großes Projekt. Da erkannte ich, dass ich als Wissenschaftler keine Angst haben sollte, etwas Neues zu beginnen. Wenn ich mich in etwas hineinkniete, würde ich auch bald Erfolge haben. Und mir wurde bewusst, dass ich Anstöße in angewandter Forschung geben konnte, gerade weil ich aus der Grundlagenforschung kam.

Spektrum: Dieses Selbstvertrauen motivierte Sie offenbar, sich bei Arbeitsgruppen zu bewerben, die über kalte Atome arbeiten. Aber wollten Sie nicht eigentlich die Welt retten?

Ketterle: Trotz aller Probleme in der Welt brauchen wir gute Grundlagenforschung. Sie kann helfen, die Probleme der Zukunft zu meistern. Zum Glück leben wir in einer arbeitsteiligen Gesellschaft, und jeder sollte versuchen, die Aufgaben zu finden, die ihn begeistern und für die er talentiert ist. Natürlich hat man es einfacher, wenn man an sauberer Kraftstoffverbrennung mit Laserlicht arbeitet. Das lässt sich Laien leichter erklären, als wenn man mit kleinen, ganz kalten Gaswolken arbeitet.

Spektrum: Und warum ausgerechnet kalte Atome?

Ketterle: Ich fand kalte Atome faszinierend. Ich wollte auch das Gebiet nicht radikal wechseln, also etwa in die Astronomie oder Teilchenphysik einsteigen, sondern meine Erfahrungen mit Lasern und Spektroskopie einbringen. Trotzdem war es nicht ohne Risiko. 1990 war ich 32 Jahre alt, ich suchte mir bereits meine dritte Postdoc-Stelle – zudem in Amerika, einem Land, das ich noch nicht kannte, ohne Garantie, in Deutschland auf eine Stelle zurückkehren zu können.

Spektrum: Hat es Sie nicht überrascht, dass der große MIT-Professor David Pritchard Ih-

Zauberhöhle eines Quantenphysikers: Licht aus Lasern wird über viele Linsen zu tiefgekühlten Gasen geführt. Diese sind bereits in so genannten Magnetfallen eingesperrt und werden dort mit Hilfe des Laserlichts auf hochempfindliche digitale Kamerachips abgebildet.

LEXIKON II

Bose-Einstein-Kondensat

Bereits 1925 sagte Albert Einstein auf Grund von Berechnungen des indischen Physikers S. N. Bose einen neuen Aggregatzustand für Materie voraus, den sie am Nullpunkt der Temperatur erreichen würde. Dabei verschmelzen die quantenmechanischen Wellenfunktionen der Teilchen zu einer einzigen makroskopischen Funktion – und machen so Quantenmechanik sogar für das bloße Auge sichtbar.

»Es war ein Erlebnis, im Labor plötzlich pechschwarze Schatten zu sehen«

nen eine volle Postdoc-Stelle anbot, obwohl Sie sich auf dem Gebiet der kalten Atome kaum auskannten?

Ketterle: Das müssten Sie ihn wohl selbst fragen. Pritchard sucht sich Leute nicht nur nach ihrem Vorwissen aus, sondern nach wissenschaftlicher Qualität. Es hat aber geholfen, dass Pritchard früher selbst Molekülphysiker war. Und obwohl ich bis dahin nie direkt Atomphysik betrieben hatte, wurde ich an einem Max-Planck-Institut promoviert, das sich hauptsächlich mit diesem Gebiet beschäftigt.

Spektrum: War das Bose-Einstein-Kondensat damals bereits ein Thema?

Ketterle: Nein. Die Bose-Einstein-Kondensation galt eher als ein unrealistisches Fernziel. Aber mir war damals schon klar, dass es auf Grund der Laserkühlung von Atomen, für die es dann 1997 einen Nobelpreis gab, auf diesem Gebiet noch viel spannende Forschung geben würde.

Spektrum: Was genau sollten Sie am MIT denn machen?

Ketterle: Das Thema, das Pritchard mir anbot, war, aus kalten Atomen neuartige Moleküle zu formen.

Spektrum: Als Sie ankamen – was war Ihr erster Eindruck?

Ketterle: Es war unglaublich. David Pritchard hatte auf jede Frage eine Antwort. Wenn jemand während einer Gruppenbesprechung vorschlug, man könne doch dieses oder jenes Verfahren nutzen, ging Pritchard an die Tafel und hat jede Zahl, etwa zum Natriumatom, in Gleichungen eingesetzt und eine Vorhersage gemacht. Mir ist nur der Mund offen geblieben. Diese Detailkenntnis, diese geistige Flexibilität, Probleme von verschiedensten Seiten anzudenken, das hat mich total beeindruckt. Ich muss noch viel dazulernen.

Spektrum: Wie macht man das im Schnellverfahren?

Ketterle: Ich habe intensiv Publikationen gelesen und mir ein Notizbuch angelegt, in dem ich alle Formeln und Eigenschaften so aufgeschrieben habe, dass ich in einer Diskussion rasch auf sie zurückgreifen konnte. So ist es mir nach ein paar Monaten gelungen, mit Pritchard einigermaßen auf Augenhöhe zu diskutieren. Ich hatte aber auch den Vorteil, dass ich mich auf ein Projekt konzentrieren konnte, während Pritchard mit vielen anderen Dingen gleichzeitig beschäftigt war.

Spektrum: Was war damals der Rekord bei tiefen Temperaturen?

Ketterle: Der lag bei einigen Nanokelvin, wenige milliardstel Grad vom absoluten Nullpunkt entfernt, also von minus 273,15 Grad Celsius. Er war mit Laserkühlung, jedoch

nicht bei so hohen Dichten der Gaswolke erreicht worden. Für das Bose-Einstein-Kondensat ist aber auch eine hohe Dichte sehr wichtig, nicht nur die Temperatur. Doch dabei funktioniert Laserkühlung nicht, da die Laserstrahlen von den Gasatomen verschluckt werden. Nach einer Konferenz 1991 in Varenna begann ich, mich ganz diesem Thema zu widmen.

Spektrum: Waren da Ihre Kollegen aus Boulder dabei, Carl Wieman und Eric Cornell, mit denen Sie 2001 gemeinsam den Nobelpreis erhielten?

Ketterle: Ja. Wir diskutierten, wie man mit lasergekühlten Atomen zum Bose-Einstein-Kondensat kommen könnte. Es war uns aber nicht klar, auf welchem Weg. Ein Schlüsselerlebnis war für mich ein freier Nachmittag, an dem David Pritchard und ich auf einer Wiese saßen und über die großen Ziele redeten. Wir sprachen über die Grenzen der Laserkühlung und über Ideen, wie man sie vielleicht verbessern konnte. Monate später hatte ich den Einfall, man könnte das Zentrum der in der Falle gefangenen Atome durch eine Veränderung ihres Grundzustands verdunkeln, so dass sie für das Laserlicht im Grund unsichtbar werden.

Spektrum: Und das hat geklappt?

Ketterle: Ja, auf spektakuläre Weise. Es war ein Erlebnis, im Labor plötzlich pechschwarze Schatten zu sehen. So stark absorbierende kalte Atomwolken hatte bis dahin noch niemand gesehen. Dieser Erfolg hat mir – ich war schließlich noch Postdoc – mehrere Stellenangebote eingebracht; darunter, Assistenzprofessor am MIT zu werden. Bevor wir jedoch die Ergebnisse publizierten, gab es fieberhafte Diskussionen. Pritchard hatte exzellente Ideen, wie man aus den kalten Atomen kalte Moleküle machen konnte – Wege, auf denen später andere Gruppen erfolgreich waren.

Ich wollte lieber die dichten Atomwolken zur Verdampfungskühlung bringen, ein Verfahren, bei dem die energiereichsten Atome die Atomfalle verlassen und die zurückgebliebenen Atome immer kälter werden. Pritchard hielt das für eher spekulativ. Die jungen Doktoranden, die mit mir arbeiteten, waren dagegen von der Herausforderung begeistert. Schließlich war auch Pritchard einverstanden. Noch bevor wir die Publikation fertig hatten, bestellten wir schon die Geräte, um unsere Maschine in Richtung Verdampfungskühlung aufzurüsten.

Spektrum: War das der Startschuss für das Rennen um das Bose-Einstein-Kondensat?

Ketterle: In gewisser Weise ja. Aber wir waren zurückhaltend. Ich habe damals jedenfalls keine Vorträge mit dem Titel »Von der Laserkühlung zum Bose-Einstein-Kondensat« gehalten.

LEXIKON III

Supraleitung: Bei einigen Metallen fließt Strom ab einer bestimmten Tieftemperatur auf Grund der Paarbildung der Elektronen widerstandsfrei.

Hochtemperatursupraleitung liegt vor, wenn die Supraleitung bei höheren Temperaturen erreicht wird. Das gelingt heute etwa bei rund minus 173 Grad Celsius – immer noch recht kalt, aber eben höher als bei normalen Supraleitern.

Es ging erst einmal darum, die Verdampfungskühlung zu demonstrieren. Und erst als ideales Endziel danach stand das Bose-Einstein-Kondensat. Ehrlich gesagt, ich glaubte gar nicht, dass wir es in naher Zukunft schaffen könnten. Meine MIT-Kollegen, Tom Greytak und Daniel Kleppner, arbeiteten schon seit 15 Jahren daran, das Bose-Einstein-Kondensat mit Wasserstoffatomen zu erreichen. Aber trotzdem waren sie immer noch einen Faktor drei vom Ziel entfernt. Es sah so aus, dass, je näher man kommt, es umso schwerer wird. Ich hielt es für möglich, dass mich dieses Ziel vielleicht meine ganze berufliche Laufbahn beschäftigen könnte, ohne es jemals zu erreichen.

Spektrum: Wann kam der Durchbruch?

Ketterle: Ende 1994 gelang es uns das erste Mal, Verdampfungskühlung mit Laserkühlung zu kombinieren. Wir konnten aber dann die Atome nicht mehr sehen, die Wolken waren zu klein, und wir mussten eine neue Diagnostik entwickeln. Noch im Mai 1995 dachte ich, dass wir viel Arbeit vor uns hätten. In diese Phase platzte Anfang Juni die Nachricht, dass in Boulder das erste Bose-Einstein-Kondensat hergestellt worden ist.

Spektrum: Das haben Sie von Ihrem Kollegen Daniel Kleppner erfahren.

Ketterle: Ja, Kleppner hat es mir gesagt. Er erhielt einen Anruf aus Boulder, und dann hat er auch mir gleich davon berichtet.

Spektrum: Haben Sie mit Carl Wieman und Eric Cornell gesprochen?

Ketterle: Erst später, auf Konferenzen.

Spektrum: Vermutlich waren Sie frustriert.

Ketterle: Ja, denn stellen Sie sich vor: Da hat man jahrelang alles auf ein Ziel gesetzt, und da erreicht das eine andere Gruppe zuerst. Ich sah unsere Felle davonschwimmen. Fast zwei Jahre lang hatte ich nichts publiziert. Und es war klar, die ganze Welt würde jetzt die Cornell-Wieman-Methode kopieren. Alle sprachen nur über diese Gruppe in Boulder. Aber wer deren härtester Konkurrent war, davon war kaum die Rede. Ich schlafe normalerweise sehr gut, aber es gab da doch Nächte, in denen ich wach lag und mich gefragt habe: Was mache ich jetzt?

Spektrum: Es gab auch noch die Gruppe an der Rice University in Houston, die ebenfalls dem Bose-Einstein-Kondensat hinterherjagte.

Ketterle: Die Rice-Gruppe hat nur indirekte Hinweise gesehen. Sie hat beobachtet, dass, wenn die Wolken kälter und kälter werden und damit immer mehr schrumpfen, ein eigenartiges Beugungsmuster in ihren Bildern auftritt. Die Rice-Kollegen haben das so interpretiert, dass sich ein Bose-Einstein-Kondensat gebildet hat. Später stellte sich heraus, dass Linsenfehler wesentlich zu ihren Beob-

achtungen beigetragen hatten. Wahrscheinlich hatten sie ein Kondensat hergestellt, aber das konnten sie erst später schlüssig nachweisen. Die Rice-Arbeit war innovativ und wird heute noch viel zitiert.

Spektrum: Das Nobel-Komitee hat sie allerdings ignoriert.

Ketterle: Das Nobel-Komitee musste eine schwierige Wahl treffen. Und es ist manchen Schwierigkeiten aus dem Weg gegangen, indem der Nobelpreis nicht für die erste Beobachtung des Bose-Einstein-Kondensats, sondern für die erste Beobachtung und frühe Erforschung des Bose-Einstein-Kondensats vergeben hat. Mit dieser Formulierung wurde ein Schwerpunkt auch auf die Arbeiten der Jahre 1995 bis 1997 gelegt, und in dieser Zeit haben die Gruppen in Boulder und unsere am MIT klar dominiert.

Spektrum: Nachdem Sie die Nachricht vom Erfolg Cornells und Wiemans erhalten haben, wollten Sie sofort eine neue Atomfalle bauen.

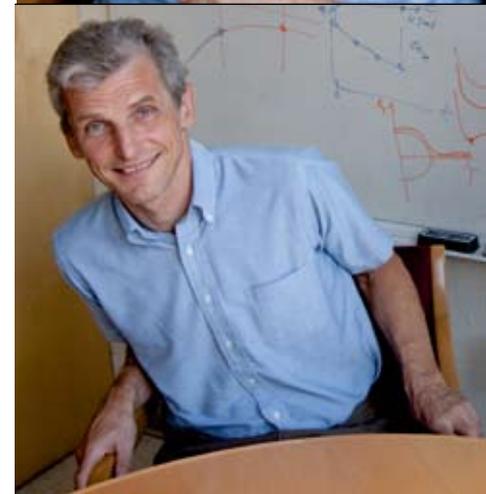
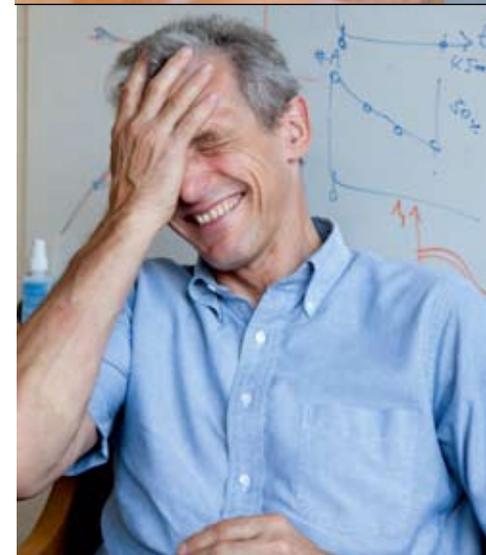
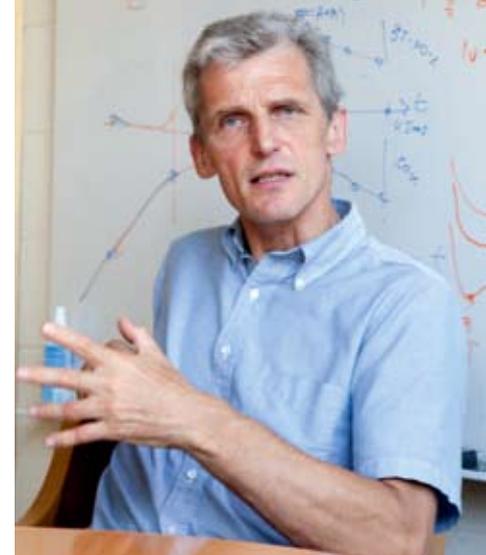
Ketterle: Ja. Unsere Atomfalle brauchte einen Laserstrahl, um ein »Loch« in der magnetischen Falle abzudichten. Ich war mir nicht sicher, ob diese Falle stabil genug war, um ein Bose-Einstein-Kondensat zu erzeugen. Ich wusste, dass es in den nächsten Jahren um die Erforschung der Eigenschaften des Bose-Einstein-Kondensats geht. Und dafür eignete sich eine rein magnetische Falle besser. Die Boulder-Falle war zwar auch sehr gut, doch ich wollte eine noch bessere bauen.

Spektrum: So kam es dann ja nicht.

Ketterle: Nicht gleich jedenfalls. Meine Mitarbeiter meinten, wir sollten mit der alten Versuchsanordnung wenigstens noch einmal probieren, das Bose-Einstein-Kondensat zu erzeugen, oder wenigstens die Resultate unserer Methode, die sich klar von der Wiemans und Cornells unterschied, für eine Publikation dokumentieren. Ich meinte, uns rennt die Zeit davon, aber gegen einen oder zwei Messtage wäre nichts einzuwenden.

Spektrum: Dann kam der frühe Morgen des 30. September ...

Ketterle: ... ja, im Morgengrauen sahen wir das Bose-Einstein-Kondensat. Plötzlich war es da. Und sogleich herrschte eine große, große Freude, nicht zuletzt deshalb, weil das Kondensat hundertmal größer als das von Cornell und Wieman war. Aber in dieser Nacht gab es keine Feier. Wir haben fieberhaft weiter gemessen und Daten aufgezeichnet. Nach nur zwei Messtagen haben wir die Versuchsanordnung auseinandergenommen und uns daran gemacht, die neue Falle zu bauen. Das war im Nachhinein vermessen, denn es gelang in den nächsten zwei Jahren keiner weiteren Gruppe, ein Bose-Einstein-Kondensat zu erzeugen. Ich





»Wir bauen Dinge, die es in der Natur nicht gibt«

LEXIKON IV

Bosonen und Fermionen

Bosonen sind Elementarteilchen mit einem ganzzahligen Spin – dem Eigendrehimpuls. Sie besetzen bei tiefen Temperaturen bevorzugt denselben Quantenzustand und sind deshalb der ideale Stoff für das Bose-Einstein-Kondensat. Fermionen hingegen besitzen einen halbzahligen Spin. Das hat zur Folge, dass sie sich in der Regel nicht im selben Quantenzustand aufhalten. Bilden sie jedoch so genannte Cooper-Paare, können sie sich wie Bosonen verhalten und ebenfalls in ein Bose-Einstein-Kondensat übergehen.

hatte eigentlich erwartet, dass die Konkurrenz viel schneller wäre.

Spektrum: Die Sorge war also unbegründet.

Ketterle: Ja, aber sie motivierte uns zu einer wichtigen Weiterentwicklung. Mir war klar, dass wir eine Atomfalle brauchten, die leichter zu justieren ist, größere Kondensate erzeugt und es einfacher macht, das Kondensat quantitativ zu beschreiben. Meine Idee war zunächst, ovalisierte Spulen zu verwenden. Doch mein Doktorand Dan Kurn hat herausgefunden, dass es mit Magnetspulen in Kleeblattform noch besser geht. Als die Versuchsanordnung nach sechs Monaten stand, haben wir die Spulen optimiert. Und dann sagten wir, eigentlich mehr zum Spaß, drehen wir doch mal an diesem Knopf und schauen, was passiert. Wir sahen ein großes, wunderbares Bose-Einstein-Kondensat, zehnmal größer als unser letztes, absolut rund und symmetrisch. Da wusste ich, wir haben eine robuste Maschine.

Spektrum: Mit dieser Atomfalle waren Sie kaum noch zu halten: Sie haben 1996 bis 1997 alle paar Monate grundlegende Arbeiten publiziert.

Ketterle: Das war der Befreiungsschlag – und wir haben wissenschaftlich richtig abgeräumt. Uns gelangen die ersten störungsfreien Abbildungen des Bose-Einstein-Kondensats. Man konnte genau sehen, wie sich die Atome des Kondensats nicht einzeln, sondern alle zugleich in der Falle bewegten. Dann zeigten wir die so genannte Kohärenz des Kondensats, das heißt, dass alle Teilchen dieselbe quantenmechanische Wellenfunktion haben und eine einzige Materiewelle bilden. Das sind, wie es oft ausgedrückt wird, Atome im Gleichschritt. Es war wirklich eine Lust zu forschen, ein Feuerwerk.

Spektrum: Was ist mit dem Atomlaser?

Ketterle: Laser sind kohärente Lichtstrahlen. Wir konnten zeigen, dass das Kondensat kohärent ist. Es gelang auch, das Kondensat aus der Falle auszukoppeln und durch Gravitation beschleunigt in einen Strahl zu verwandeln. Damit hatten wir die wesentlichen Eigenschaften eines Atomlasers experimentell nachgewiesen.

Spektrum: Dann haben Sie untersucht, wie sich die Entdeckung der Kondensate anwenden ließ – etwa für Messinstrumente.

Ketterle: Wenn man durch Kälte Atome verlangsamt oder fast zum Stillstand bringt, lassen sich diese präziser vermessen als schnelle Atome. Für höchste Präzision lässt man Atomwolken interferieren – damit kann man die Schwerkraft untersuchen oder hochpräzise Uhren bauen. Das wird jedoch bereits mit kalten Atomen im Nano- oder Mikrokelvin-Bereich praktiziert; der zusätzliche Schritt zum Bose-Einstein-Kondensat hat sich dafür bislang noch nicht ausgezahlt.

Spektrum: Sie haben sich sehr für die Simulation der Hochtemperatursupraleitung begeistert, in der Strom ohne Widerstand fließt (siehe Lexikon III, S. 30).

Ketterle: Ja, das sind ganz neue Möglichkeiten. Atomphysik hat sich über Jahrzehnte mit einzelnen Atomen beschäftigt, vielleicht mit zwei, wenn sie ein Molekül formen. Mit Atomen bei allertiefsten Temperaturen erschloss sich uns eine neue Welt. Wenn man ein so kaltes Gas hat, ist das immer noch sehr dünn – eine Million Mal dünner als Luft. Die langsamen Atome haben aber immer noch genügend Zeit, sich gegenseitig zu beeinflussen. Dadurch können sich die Atome plötzlich wie viel dichtere Materialien verhalten, wie man sie sonst nur in kondensierter Materie findet – bei Metallen, Isolatoren oder Supraflüssigkeiten. Für mich sind kalte Atome wie Legosteine, mit denen wir neuartige Formen der Materie bauen und damit andere Materialien simulieren können.

Spektrum: Erklären Sie doch einmal, wie Sie Hochtemperatursupraleiter mit einem Bose-Einstein-Kondensat simulieren wollen.

Ketterle: Hochtemperatursupraleiter sind komplex – deshalb lassen sich nur einfache Modelle berechnen. Die Theoretiker wissen nicht einmal, ob sie damit reale Materialien näherungsweise beschreiben können. Im Experiment können wir mit dem atomaren Lego immerhin ein konzeptionelles Modell dieser Gebilde mit kalten Atomen nachbauen. Wir verwenden dazu neutrale Atome. Was wir realisieren, ist Suprafluidität, der Zustand, in dem Atome in der Flüssigkeit reibungslos fließen. Suprafluidität ähnelt in vieler Hinsicht der Supraleitung, die nichts anderes ist als die Suprafluidität von geladenen Teilchen. Die kalten Atome füllen sozusagen die Lücke zwischen den mathematischen Modellen und realen komplexen Materialien.

Spektrum: Aber gelungen ist dies für Hochtemperatursupraleitung noch nicht.

Ketterle: Nein. Das kann auch noch zehn Jahre dauern. Wenn es uns gelänge, wäre das für die Forschung ein Riesenschritt vorwärts. Gemeinsam mit meinem früheren Studenten Martin Zwierlein, inzwischen Assistenzprofessor am MIT, konnten wir 2005 immerhin eine andere, mehr konventionelle Form von Hochtemperatursuprafluidität zeigen.

Spektrum: Sie sprechen auch von so genannter Designmaterie. Denken Sie sich hier ganz neuartige Stoffe aus?

Ketterle: Ja, wir bauen Dinge, die es in der Natur nicht gibt.

Spektrum: Können Sie denn alles umsetzen, was Ihnen so einfällt? Macht da die Physik immer mit?

Ketterle: Nein, nein, wir stehen nicht im Atelier vor einer leeren Leinwand. Wir kontrollieren nicht die Natur, sondern die Natur erlaubt uns, mit ihr zu spielen. Wir können nur das realisieren, was mit existierenden Atomen geht. Zudem arbeiten wir in einem Forschungskontext, in dem viele Modelle bereits durch Theorien vorgezeichnet sind. Wir gleichen mehr Ingenieuren, die ein Flugzeug bauen und es im verkleinerten Maßstab im Windtunnel testen – nur mit dem Unterschied, dass wir Materialien vergrößern und nicht verkleinern. Wenn man etwa die Kristallstruktur von Materialien um den Faktor tausend vergrößert, bekommt man ganz neue Möglichkeiten zur Präparation und Beobachtung.

Spektrum: Anderes Thema: Sie sind nie nach Deutschland zurückgekehrt. Warum?

Ketterle: 1997 erhielt ich einen Ruf nach München, ans MPI für Quantenoptik. Das Münchner Umfeld ist sicherlich eines der besten auf der Welt. Meine Absage war eine äußerst knappe und schwere Entscheidung. Am Ende haben dafür persönliche Gründe den Ausschlag gegeben. Am MIT habe ich mich immer sehr wohl gefühlt und das familiäre Umfeld unter meinen Kollegen genossen. Auch mein Arbeitsstil passt sehr gut hierher.

Spektrum: Wie ist denn Ihr Arbeitsstil?

Ketterle: Amerikaner meinen, er sei deutsch, die Deutschen sagen, er sei amerikanisch.

Spektrum: Das heißt?

Ketterle: Aus Deutschland habe ich die Erfahrung mitgebracht, dass man eine gute Infrastruktur braucht, dass man Experimente sehr gut aufbauen muss und dass Arbeitsgruppen gut organisiert sein sollten. Für amerikanische Verhältnisse habe ich eine größere Gruppe – 15 Mitarbeiter, drei Labore, einmal waren es sogar vier. Für eine deutsche Gruppe ist das dagegen eher klein. Amerikanisch ist wohl, dass ich einen hemdsärmeligen Stil pflege, meine Tür steht immer offen, man meldet sich nicht bei der Sekretärin an. Wenn ein Mitarbeiter etwas wissen will, kommt er einfach rein.

Spektrum: Wie sehen Sie die Forschungssituation in Deutschland?

Ketterle: Deutschland war und ist ein exzellenter Standort für die Forschung. Mit der Exzellenzinitiative versucht man inzwischen, die Dinge weiterzuentwickeln. Auch hat Deutschland eine ausgezeichnete Ausbildung – einige meiner besten Konkurrenten sitzen dort, einige meiner besten Mitarbeiter sind Deutsche. Im Gegensatz zu Deutschland geben wir in Amerika jungen Wissenschaftlern über eine Assistenzprofessur eine Aussicht auf Festanstellung. Die deutsche Juniorprofessur ohne eine solche Perspektive ist eine Totgeburt. Zum Glück bewegt sich da jetzt aber

auch in Deutschland etwas. In Amerika sind die Gruppen internationaler, was in meinen Augen die Kreativität fördert. Die Nase vorne zu haben, bei einem wissenschaftlichen Durchbruch oder gar Nobelpreis, kann von einem Quäntchen abhängen. Das erreichen wir in Amerika durch junge Leute, die unabhängig arbeiten können, und dadurch, dass wir hier Eliteuniversitäten haben, wo sich die besten Leute gegenseitig anspornen.

Spektrum: Apropos: Wann haben Sie denn das letzte Mal nachts im Labor gestanden?

Ketterle: Schon seit Jahren nicht mehr.

Spektrum: Sie sind also Wissenschaftsmanager geworden.

Ketterle: Ja und nein. Ich bin mit der Materie natürlich bestens vertraut und kann meinen Mitarbeitern spezifische Ratschläge geben. Im Labor stehe ich jedoch nicht mehr. Zum Teil bedaure ich das, zum Teil auch nicht. Bis Ende 1996 habe ich selbst experimentiert, auch noch als Assistenzprofessor. Aber dann hatten wir so viele Erfolge. Ich musste dauernd Vorträge halten und baute bald ein zweites Labor auf. Das alles hat dazu geführt, dass ich seither keine Messkampagne mehr geleitet habe. Hätte ich die Zeit, würde ich zumindest etwas davon im Labor verbringen. Womöglich würden meine Doktoranden und Postdocs sogar davon profitieren. Andererseits: Wenn ich als Betreuer Anregungen geben kann, die vielleicht sogar funktionieren, macht mich das glücklicher, als wenn ich die Ideen selbst ausgeführt hätte.

Spektrum: Könnten Sie sich vorstellen, das Gebiet noch einmal zu wechseln?

Ketterle: Ja, natürlich. Der Grund, warum ich immer noch mit kalten Atomen arbeite, ist, dass sich das Feld so stürmisch entwickelt. Wir arbeiten hier in der dritten Phase meiner Karriere mit kalten Atomen. Die erste war das Bose-Einstein-Kondensat, die zweite war die Paarung von Fermionen, mit denen wir die Superfluidität erforschen, und die dritte ist jetzt der Magnetismus. Wir verwenden unsere atomaren Legosteine nun dazu, magnetische Materialien zusammzusetzen. Bisher bin ich auf kein neues Projekt gestoßen, das spannender wäre.

Spektrum: Und was würden Sie einem jungen Studenten mit auf dem Weg geben, der Ihre komatengleiche Karriere bewundert?

Ketterle: Ich würde ihm raten, seinen eigenen Weg zu suchen. Als junger Mensch ist man oft unsicher. Es ist aber ganz und gar kein Makel, seinen Weg nicht vorgezeichnet zu sehen. Man sollte Neues ausprobieren und sich dann ernsthaft fragen, ob man in dieser Richtung weitermachen will. Der Mut, Neues zu wagen, hat sich gelohnt – bei mir zumindest. ◀



Hubertus Breuer ist promovierter Philosoph und freier Wissenschaftsjournalist in New York.

Ketterle, W.: When Atoms Behave as Waves: Bose-Einstein Condensation and the Atom Laser. In: Les Prix Nobel 2001, The Nobel Foundation, S. 118 – 154, 2002.

Pitaevskii, L., Stringari, S.: Bose-Einstein Condensation. Oxford University Press, 2003.

Sengstock, K. et al.: Bose-Einstein-Kondensation; das ideale Quantenlabor. In: Physik in unserer Zeit 34(4), S. 168 – 176, Juli 2003.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/1006313.

Die ZWEI GESICHTER des MONDS

Es bleibt ein Rätsel, warum sich die Vorderseite des Erdtrabanten so stark von der uns abgewandten unterscheidet. Indem er lunare Einschlagbecken untersuchte, gelangte der Planetologe P. Surdas Mohit nun zu einer neuen Hypothese.

In Kürze

- ▶ Seit im Jahr 1959 klar wurde, dass sich die durch dunkle »Maria« charakterisierte Vorderseite des Mondes erheblich von seiner helleren Rückseite unterscheidet, **suchen Forscher vergeblich nach den Ursachen** dieser so genannten hemisphärischen Asymmetrie.
- ▶ Möglicherweise spielt dabei die »schiefe Konvektion« eine Rolle, so die Hypothese dieses Artikels.
- ▶ Sie könnte im einst bis zu 500 Kilometer tiefen lunaren Magmaozean zu Konvektionsströmen geführt haben, die helleres Mondgestein auf die Rückseite des Trabanten transportierten.

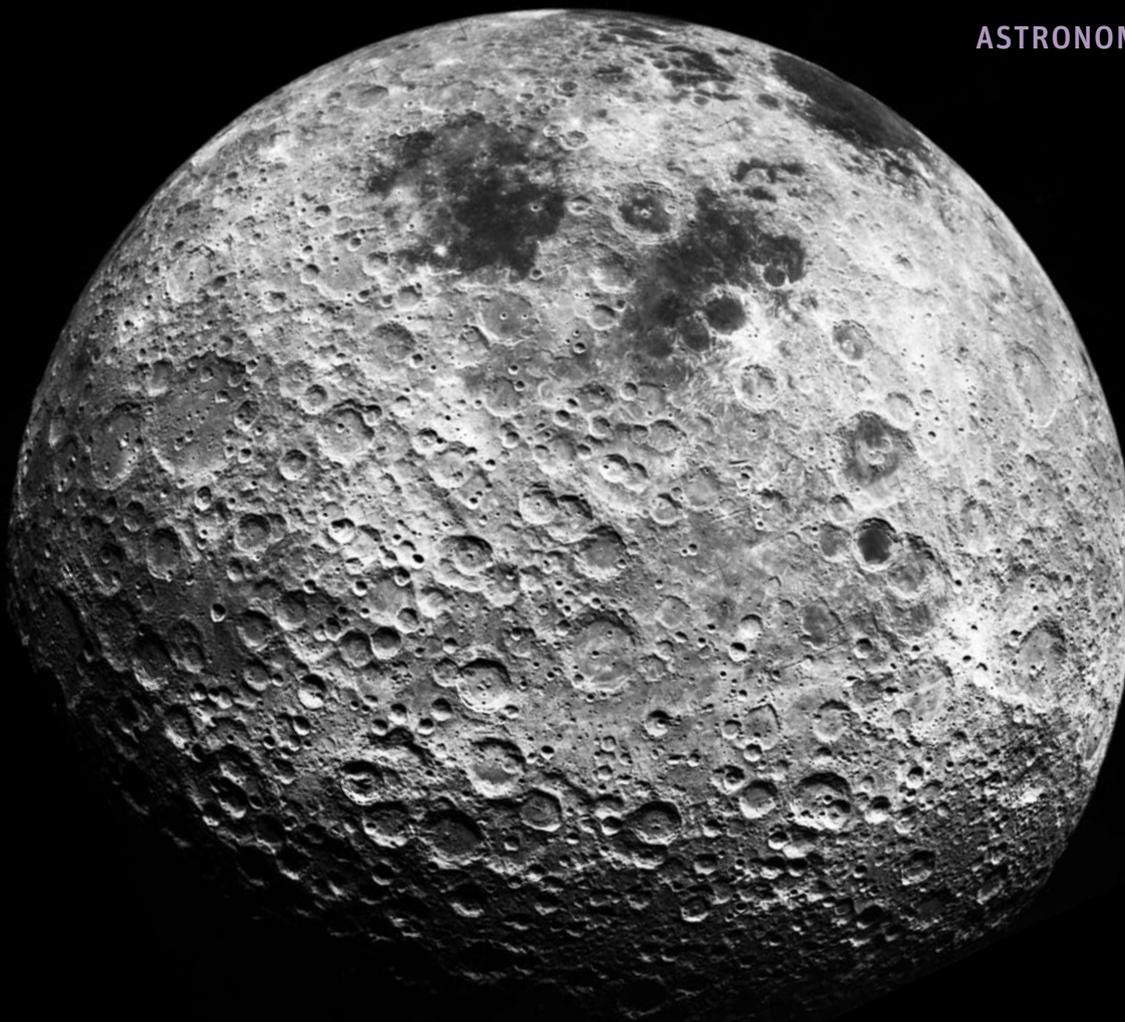
P. Surdas Mohit

Als die sowjetische Raumsonde Luna 3 im Oktober 1959 erstmals die Rückseite des Mondes fotografierte, stellte sich zur allgemeinen Überraschung heraus, dass sie deutlich anders aussah als die uns zugewandte Hemisphäre. Die altbekannte Vorderseite des Trabanten zeichnet sich durch so genannte Maria aus – markante Flecken, deren Tönung von einer bestimmten Gesteinsart herrührt und die von Astronomen früherer Zeiten auf den lateinischen Namen für Meere getauft wurden. Auf der Rückseite des Mondes indessen, so zeigte Luna 3, existieren fast keine Maria.

Diesen Befund, den viele weitere Beobachtungen erhärteten, haben seither ganze Scharen von Planetenforschern zu erklären versucht. Doch trotz beachtlicher Fortschritte steht auch heute, ein halbes Jahrhundert nach dem ersten Blick auf die Rückseite des Mondes, die endgültige Erklärung dieser Asymmetrie noch aus. Hier skizziere ich eine Theorie, die eine solche Erklärung liefern könnte. Sie basiert auf meinen Analysen der letzten Jahre, in denen ich große Einschlagbecken auf dem

Mond und anderswo im Sonnensystem untersuchte. Zur Lösung des großen Puzzles der lunaren Asymmetrien tragen sie allerdings nur einen kleinen Teil bei, denn die wesentlichen Erkenntnisse wurden über einen Zeitraum von Jahrzehnten zusammengetragen. Viele davon verdanken wir den bemannten US-Mondflügen ab 1969, durch die den Wissenschaftlern plötzlich eine Fülle von lunaren Gesteinsproben und Daten über die Oberfläche des Mondes zur Verfügung stand. So konnten sie eine grundlegende Theorie über die Herkunft der wichtigsten Gesteinstypen auf dem Mond aufstellen, die heute von der Mehrheit der Forscher akzeptiert wird.

Die Schlüsselerkenntnis: Ein großer Teil des Mondes war im Lauf seiner Entstehungsgeschichte geschmolzen. Die heutigen lunaren Oberflächengesteine ebenso wie Gesteine im Untergrund, auf deren Existenz wir indirekt schließen können, kristallisierten aus einem globalen Magmaozean heraus, der einst möglicherweise über 500 Kilometer tief war. Freigesetzt worden war die Energie, die diese enormen Gesteinsmassen verflüssigte, bei einem gewaltigen Zusammenstoß zwischen der Protoerde und einem marsgroßen Himmelskörper.



NASA (FOTO AUFGENOMMEN BEIM RÜCKFLUG ZUR ERDE VON APOLLO 16)

Dabei entstanden unzählige Trümmer, die sich schließlich zum Mond formten, wie wir ihn heute kennen. Stoffe mit größerer Dichte sanken darin nach unten, Stoffe geringerer Dichte – darunter eine riesige Menge Magma – stiegen nach oben.

Und während der Magmazoan auf dem Mond abkühlte, kristallisierten die Mineralien in der Reihenfolge ihrer Erstarrungstemperaturen. Gesteine, die auf solche Weise geschichtet sind, bezeichnen Geologen als Kumulate. Zur Oberfläche trieb schließlich beispielsweise Plagioklas-Feldspat, während das Olivin nach unten gezogen wurde. Bestimmte Elemente indessen, die so genannten Inkompatiblen, fügen sich nur »widerwillig« in die Kristallstruktur von Mineralien ein. Diese Inkompatibilität kann schwächer oder stärker ausfallen. So ist Eisen schwach inkompatibel: In den Mineralien, die als Erste aus dem Magmazoan kristallisierten, ist es zwar enthalten, jedoch nur in geringen Mengen. Schwere Elemente wie Uran und Thorium, die wichtigsten radioaktiven Stoffe auf dem Mond, sind extrem inkompatibel. Mehr noch als das Eisen widerstanden sie ihrem Einbau in die entstehenden Kristalle sehr lange, wes-

Obwohl er so vertraut scheint, birgt der Mond noch viele Geheimnisse. Besonders rätselhaft sind sein Ursprung und seine frühe Geschichte. Eine wichtige Rolle spielen die dunklen Maria und die hellen Hochländer unseres Trabanten. Die obere Bildhälfte der Apollo-16-Aufnahme zeigt die der Erde zugewandte Seite des Monds, der untere Bildteil die Rückseite.

halb erst die zuletzt erstarrten Gesteinssorten mit ihnen (und auch mit Eisen) stark angereichert sind.

Der größte Teil der lunaren Oberfläche, die Hochländer, besteht aus dem hellen Gesteinstyp Anorthosit, der sich hauptsächlich aus Plagioklas-Feldspat zusammensetzt. Diese Regionen zeichnen sich auch durch die vielen Einschlagkrater aus, die auf ihr hohes Alter schließen lassen. Zweitwichtigster Bestandteil der Oberfläche ist dunkler Basalt: erstarrte Lava, die einst aus dem Innern des Monds hervorbrach, sich in die riesigen Einschlagbecken ergoss und so die Maria entstehen ließ. Geochemische Analysen der beiden Gesteinstypen deuten auf eine gemeinsame Herkunft



MIT FRIEDRICH VON RICARDO NUNES

1959 machte die sowjetische Raumsonde Luna 3 die ersten Fotos von der Rückseite des Monds. Trotz der geringen Aufnahmequalität zeigte sich: Die Maria, die einen großen Teil der Vorderseite bedecken, fehlen auf der Rückseite fast völlig. Das Bildmosaik wurde aus Luna-3-Aufnahmen zusammengesetzt.



MIT FRIEDRICH VON CHIFF CLARK, SMITHSONIAN INSTITUTION



MIT FRIEDRICH VON JAMES ST. JOHN

Auf der Mondoberfläche finden sich zahlreiche Mineralien. Nur zwei davon bestimmen aber im Wesentlichen das Erscheinungsbild des Erdtrabanten: Basalt (rechts), der für die dunklen Maria verantwortlich ist, und Anorthosit (links), der vor allem aus Plagioklas-Feldspat besteht und den größten Teil der verbleibenden Fläche einschließlich der hellen Hochländer dominiert.

hin. Der Anorthosit enthält relativ große Mengen des mit der Kristallstruktur von Plagioklas-Feldspat kompatiblen schweren Spurenelements Europium. Die Gesteine in den Maria hingegen weisen einen komplementären Europiummangel auf. Das Magma, welches Ursprung der lunaren Basalte ist, setzte sich also aus Bestandteilen des Mantels zusammen, die erst nach den Plagioklas-Feldspaten kristallisierten.

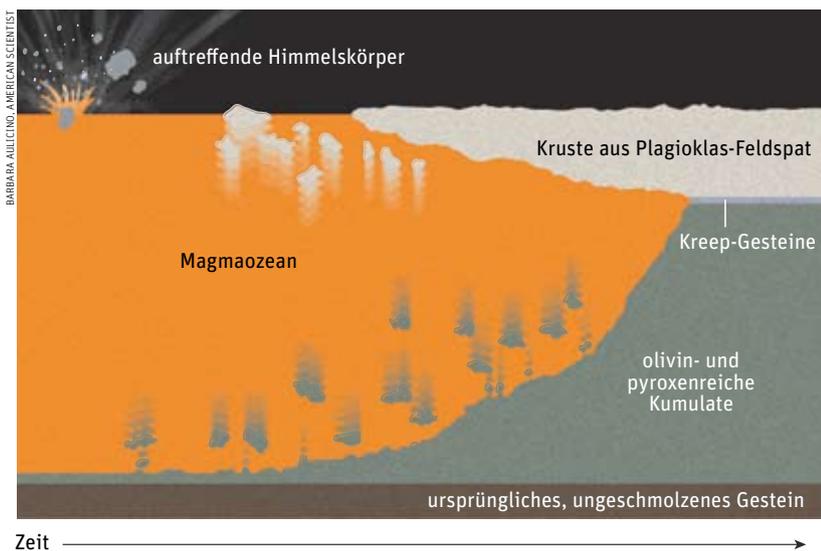
Faszinierend war auch die Entdeckung der chemischen Signatur von »Kreep«, das wohl vor allem auf der Mondvorderseite zu finden ist. Kreep steht für Kalium (mit dem chemischen Symbol K), Seltenerde-Elemente (*Rare Earth Elements*) und Phosphor (P). Seine Signatur ist vor allem in Gesteinen zu finden, die bei Meteoriteneinschlägen zuerst zertrümmert wurden, sich infolge der entstehenden Hitze dann aber wieder verbanden. Sie enthalten inkompatible Elemente wie Uran und Thorium in großen Mengen, weit mehr als irgendein irdischer Gesteinstyp. Das spricht dafür, dass sie als Letzte aus dem Magmaozean kristallisierten. Sehr wahrscheinlich ist auch, dass die Kreep-Gesteine tief im Mondinnern erstarrten und nur dann an die Oberfläche gelangten, wenn gewaltige Einschläge Teile des Untergrunds zu Tage förderten.

Das auf Apollo-Daten aufbauende Modell des Magmaozeans, das all diesen Erkenntnissen einen einheitlichen Rahmen gab, erklärte zwar die Flecken auf der Mondvorderseite, scheiterte allerdings weiterhin an der Frage, warum sich diese so stark von seiner Rückseite unterscheidet. Weitere Hinweise lieferte dann aber die 1994 gestartete Raumsonde Clementine, auch bekannt als »Deep Space Program Science Experiment«. Diesem Projekt der US-Weltraumorganisation NASA und der Ballistic Missile Defense Organization, einer Behörde des US-Verteidigungsministeriums, verdanken wir den ersten globalen digitalen Datensatz, der zu unserem Trabanten vorliegt. Gemeinsam mit den Daten der Lunar-Prospector-Mission von 1998 nutzten ihn Forscher, um Karten von der Topografie unseres Trabanten, von lunaren Schwerkraft- und Magnetfeldern sowie von der Häufigkeit wichtiger Elemente zu erstellen.

Schwerkraftsog über Hochländern

Die Karten enthüllten gleich eine mehrfache Asymmetrie des Mondes. Vorder- und Rückseite unterscheiden sich nämlich auch in der Mächtigkeit der Kruste. Diese relativ dünne Schicht geringer Dichte liegt über dem Gesteinsmantel, der wiederum den metallischen Kern umhüllt. Ihre Dicke lässt sich indirekt ermitteln, denn Unterschiede in der lunaren Topografie wirken sich messbar auf die von der Raumsonde registrierte Gravitation aus. So verursacht die zusätzliche Masse der bergigen Hochländer eine geringfügig stärkere Gravitation. Über den lunaren Tiefländern hingegen lässt der Schwerkraftsog auf das Raumschiff ein wenig nach.

Auf relativ einfache Weise kann man diese topografiebedingten Gravitationsabweichungen



BARBARA ALLICHO, AMERICAN SCIENTIST

Wie entstanden die hellen Hochländer auf dem Mond? In einem tiefen Magmaozean, der den Trabanten zunächst bedeckte, kristallisierten Mineralien in der Reihenfolge ihrer Erstarrungstemperaturen aus. Feststoffe höherer Dichte – hauptsächlich Olivin und Pyroxen – sanken auf den Grund des Ozeans. Mineralien mit niedriger Dichte wie Plagioklas-Feldspat stiegen zur Oberfläche auf, wo sie sich zur hellen Anorthosit-Kruste des Mondes zusammenfügten. Einige Stoffe widersetzten sich ihrer Integration in die erstarrenden Mineralien sehr lange – darunter Kalium, Phosphor und die Seltenerde-Elemente. Gemeinsam mit ähnlichen inkompatiblen Elementen wurden sie schließlich in die so genannten Kreep-Gesteine eingebaut.

nun vom gemessenen Gravitationsfeld abziehen. Aus den so bereinigten Ergebnissen lassen sich dann Daten über das Profil der Grenzfläche zwischen Kruste und Mantel ableiten. Diese Informationen kombinierten Spezialisten schließlich mit lokalen Schätzwerten für die Dicke der Kruste, die bei seismischen Messungen während der Apollo-Ära gewonnen wurden. Und schließlich ließ sich die Dicke der Mondkruste global kartieren. Sie ist meist zwischen 35 und 65 Kilometer mächtig, außerdem stellte sich heraus, dass sie auf der uns abgewandten Hemisphäre im Mittel wesentlich dicker ist als auf der Mondvorderseite.

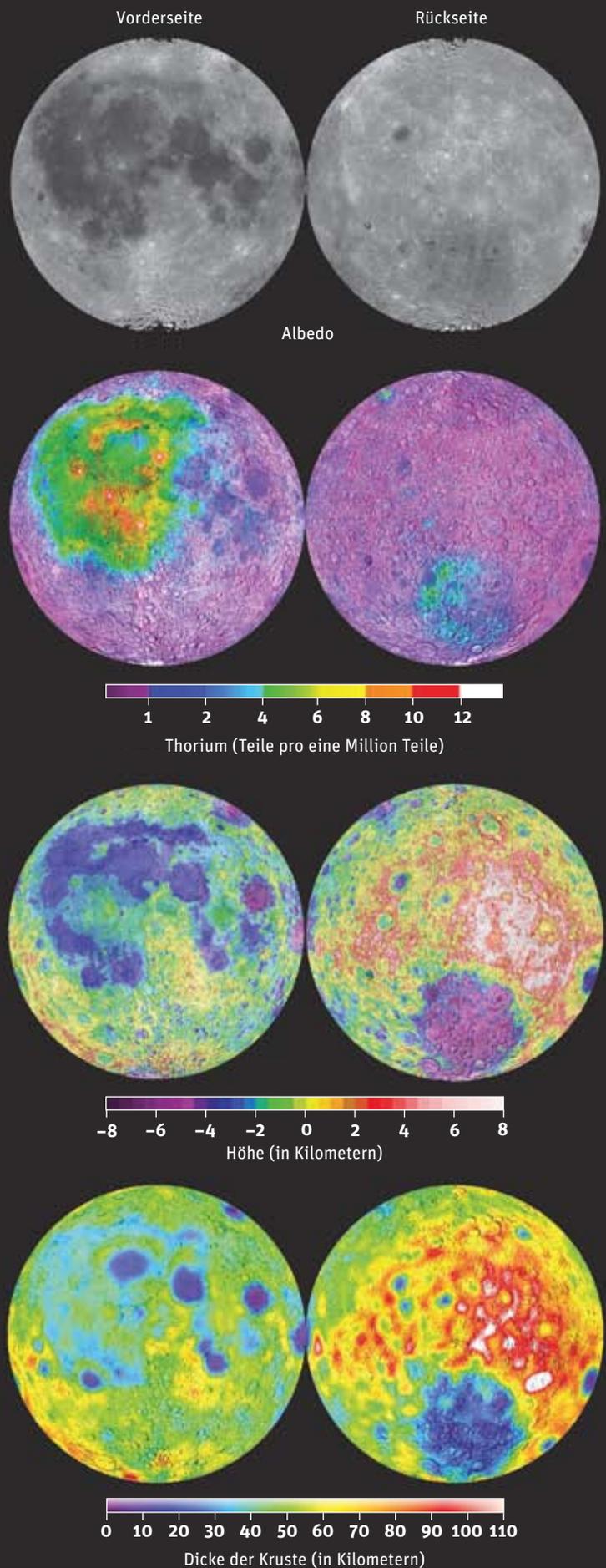
Auch die Konzentration von Eisen auf der Mondoberfläche konnten Clementine und Lunar Prospector messen. Sie ist auf der Vorderseite des Trabanten viel größer als auf seiner Rückseite, was sich hauptsächlich mit der großen Menge Basalt in den Maria auf der Mondvorderseite erklären lässt. Dank großer Einschläge, bei denen viel Material ausgeworfen wurde, existieren zudem Hinweise auf leicht mit Eisen angereicherte tiefere Schichten der Kruste. Die ausgeprägteste Asymmetrie betrifft schließlich das radioaktive Element Thorium, das sich fast nur in der Oceanus-Procellarum-Region auf der uns zugewandten Seite des Erdtrabanten findet.

Immer wieder haben Forscher versucht, die Ursachen all dieser Asymmetrien zu erklären, und stets spielten bei ihren Überlegungen die Entstehungsprozesse der lunaren Maria eine Rolle. Von ihren irdischen Pendanten unterscheiden sich die lunaren Basalte, von denen die Apollo-Astronauten viele Proben mitbrachten, durch ihre sehr hohe Dichte und den sehr hohen Eisengehalt; manchmal findet sich darin auch Titan. Die Zusammensetzung deutet darauf hin, dass sie erst in einem späten Stadium der Verfestigung des Magmaozeans entstanden. Doch wie gelangte der Basalt in die Maria?

Lava ergoss sich in Einschlagbecken

Alle Gesteine, die erst spät erstarrten – nachdem bereits 95 Prozent des lunaren Magmaozeans kristallisiert waren –, enthalten sehr viel Eisen und große Mengen des Minerals Ilmenit (ein Titanoxid). Diese ilmenitreichen Kumulate besitzen eine viel höhere Dichte als der darunterliegende Mantel. Deshalb neigten sie dazu, so die Theorie der Geochemiker, im Lauf der Zeit immer tiefer zu sinken. Möglich war das, weil sich der Mantel unterhalb von ihnen plastisch verformte.

Weil die ilmenitreichen Gesteine so spät aus dem Magmaocean kristallisierten, schlossen sie große Mengen von inkompatiblen Elementen ein: Eisen, Titan und viele andere.



Viele Eigenschaften der Mondrückseite kontrastieren stark mit jenen der Vorderseite. Ganz oben: Das Fehlen der dunklen Maria auf der Rückseite zeichnet sich in Albedo-Messungen der US-Raumsonde Clementine deutlich ab. Oben: Thorium konzentriert sich vor allem in Oberflächengesteinen auf der Mondvorderseite. Unten und ganz unten: Bedeutende Differenzen zwischen den Hemisphären bestehen auch hinsichtlich Topografie und Krustendicke.

SCHLAG AUF SCHLAG

Zu Beginn des dritten Jahrtausends herrscht, nach einigen ruhigen Jahren, wieder hektischer Wissenschaftsbetrieb rund um den Erdtrabanten. Den Anfang machte die europäische Raumsonde Smart-1. 2003 startete sie, um drei Jahre später kontrolliert abzustürzen und – beobachtet und vermessen durch irdische Teleskope – eine Wolke aus Staub und Gesteinspartikeln aufzuwirbeln. Auch das Landegebiet, wo im Juni 2009 Kaguya (oder: Selene) niedergegangen ist, hatte Smart-1 kartiert. Die japanische Sonde untersuchte rund zwei Jahre lang vom Orbit aus die Verteilung radioaktiver Elemente auf der Mondoberfläche. Ihre Nachfolgerin Selene-II soll in ein paar Jahren einen Rover mit sich führen und ihn in der südlichen Polarregion absetzen.

Unterdessen ist auch die NASA wieder im Geschäft. Der Staub um Kaguyas Absturzstelle hatte sich kaum gelegt, da starteten der Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) und der Lunar Crater Observation and Sensing Satellite (LCROSS). Das LRO-Altimeter LOLA etwa soll eine 3-D-Karte des Mondes erstellen und

LCROSS-Orbiter mit Impaktor vor dem Einschlag



geeignete Landeplätze für kommende Missionen suchen. Mit LCROSS' Suche nach Wasser ist es indessen schon wieder vorbei: Am 9. Oktober warf der Orbiter einen Impaktor ab und suchte in der Wolke, die dieser beim Einschlag in den Mondkrater Cabeus nahe des Südpols des Trabanten aufwirbelte, nach Eis, Wasserdampf und Kohlenwasserstoffen. Zumindest vier Minuten lang. LCROSS folgte in dieser Zeit dem Kurs des Impaktors, funkte die Messergebnisse noch in Echtzeit zur Erde und schlug dann selbst auf.

Für 2011 plant die NASA auch den Start des Gravity Recovery and Interior Laboratory. GRAIL wird aus zwei Son-

den im selben Orbit bestehen, die mittels Mikrowellen kontinuierlich ihren jeweiligen Abstand zueinander und zur Erde messen, um so das lunare Schwerfeld zu kartieren und Gravitationsanomalien zu finden, die Rückschlüsse auf tiefere Bodenschichten zulassen.

Erstmals hat es derweil Indien zum Mond geschafft. Nach knapp einem Jahr im Orbit war im August zwar der Kontakt zu Chandrayaan-1 verloren gegangen. Doch zahlreiche Messergebnisse waren schon gewonnen, zudem hatte die Sonde bereits im November 2008 erfolgreich einen Impaktor abgesetzt. Zwei Rover, abgesetzt von Chandrayaan-2, sollen im Jahr 2013 folgen. Schon im März 2009 war nach einer Missionsdauer von eineinhalb Jahren auch die chinesische Chang'e-1 mit Wucht auf den Erdtrabanten niedergegangen. Für das kommende Jahrzehnt sind sanftere Landungen geplant: mal mit Rover, mal zur Abholung von Bodenproben. Im Südpol-Aitken-Becken parken dann aber vielleicht schon die Amerikaner. Sie wollen ebenfalls eine Gesteinsprobe zur Erde bringen, und das Becken auf der Rückseite des Mondes, der bislang größte bekannte Einschlagkrater im Sonnensystem, wäre für diesen Zweck ideal. Denn hier ist nicht nur Krustengestein zu finden, möglicherweise legte der gewaltige Einschlag einst sogar den Mondmantel frei.

Derweil hofft das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt weiter auf ein Mondprojekt. Der »Lunare Erkundungsorbiter« LEO war zwar 2008 gestoppt worden, kurz vor der Bundestagswahl hatten deutsche Mondpläne jedoch wieder neuen Schub erfahren. In der Wirtschaftskrise geht es bislang aber vor allem der bemannten Raumfahrt schlecht. Der NASA fehlen viele Milliarden, um wie geplant wieder Astronauten auf den Trabanten zu schicken.

Thilo Körkel, Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«

Vor allem nahmen sie radioaktives Uran und Thorium auf, zusammen mit Kalium, von dem ebenfalls ein radioaktives Isotop existiert. Auf geologischen Zeitskalen bildet der Zerfall solcher Stoffe eine Quelle großer Wärmemengen. Die Gesteine heizten sich also allmählich auf und dehnten sich aus. Dadurch nahm ihre Dichte ab, bis sie so niedrig war, dass die Gesteine wieder zur Oberfläche aufstiegen und schmolzen. Und schließlich ergoss sich die entstehende Lava in zahlreiche Einschlagbecken und formte die dunklen Maria.

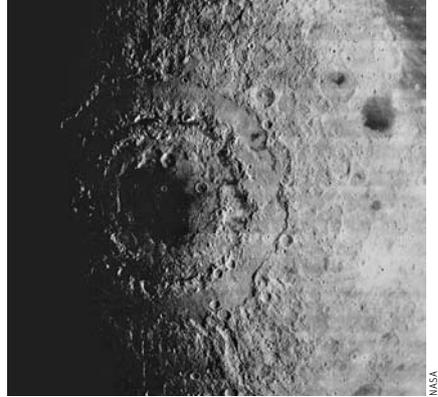
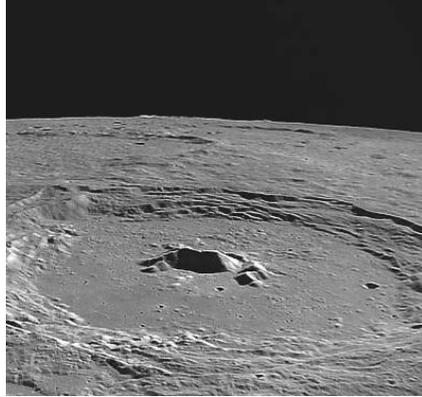
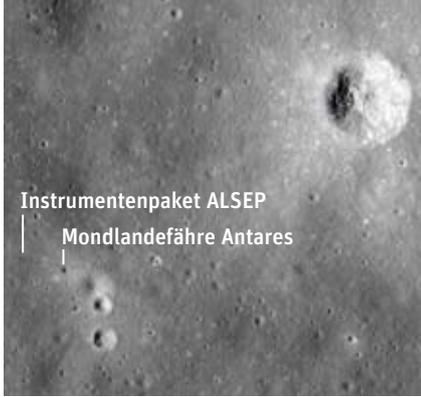
Mittels numerischer Modellierungen dieser Prozesse wurde versucht, die Ursache der Asymmetrien zu klären. Und tatsächlich zeigte eine Forschergruppe am Massachusetts Institute of Technology und an der Brown University im US-Bundesstaat Rhode Island unter Leitung von Shijie Zhong (mittlerweile an der University of Colorado), dass dieser Prozess unter bestimmten Bedingungen ein Fließmuster hervorbringen könnte, bei dem die heißen Kumulate tatsächlich nur unterhalb einer der beiden Mondhemisphären aufsteigen.

Verflüssigt durch kosmische Projektile

Ergänzt wurden diese Arbeiten später von David R. Stegman (seit Kurzem an der Scripps Institution of Oceanography in San Diego) und seinen Kollegen an der University of California in Berkeley: Erstreckt sich ein solcher Auftrieb von Mantelmaterial bis hinunter zur Kern-Mantel-Grenze, könnte er die konvektive Kühlung des flüssigen Metalls im Kern ankurbeln. Die Konvektionsströme wiederum könnten – vorausgesetzt, sie sind stark genug – ein Magnetfeld generieren, wie es der Mond einst möglicherweise besaß. Zur Zeit von Stegmans Arbeiten erschien ein Zusammenhang zwischen diesem Magnetfeld und dem asymmetrischen Auftreten der lunaren Maria durchaus denkbar, so dass hier möglicherweise die Lösung des Rätsels lag.

Leider war das nicht der Fall. Allein schon die Frage des lunaren Magnetfelds ist umstritten. Hinzu kommt, dass Zhongs Berechnungen nur dann zu dem gewünschten Fließmuster führten, wenn der Kern des Mondes 500 Kilometer oder weniger durchmisst. Die mittlerweile besten Abschätzungen – 2001 von einer Gruppe um James G. Williams vom kalifornischen Jet Propulsion Lab ermittelt – deuten jedoch auf einen Kerndurchmesser von rund 700 Kilometern hin. Die Suche nach einer Erklärung muss also weitergehen.

Während meiner Promotion an der Washington University in Missouri untersuchte ich den Erhaltungszustand lunarer Einschlagbecken, um die thermischen Verhältnisse auf dem jungen Mond zu erkunden. Dabei kon-



zentrierte ich mich auf die viskose Relaxation, ein Phänomen, das sich an vielen Orten im Sonnensystem beobachten lässt. Auch in irdischen Regionen, wo die Erdkruste genügend dick und die Temperaturen der unteren Kruste hinreichend hoch sind, beginnen die unteren Krustenschichten, obgleich noch fest, plastisch zu fließen. In vielerlei Hinsicht verhalten sie sich dann wie eine extrem viskose Flüssigkeit.

Unterschiede in der Krustendicke gleichen diese Strömungen bis zu einem gewissen Maß aus. Vorgänge unter dem Himalaja sind dafür ein gutes Beispiel. In der Zone, wo die tektonische Platte des indischen Subkontinents mit Asien zusammenstößt, wird die Kruste zusammengestaucht und aufgehäuft. Mit steigender Temperatur nimmt dann die Viskosität des Gesteins ab, so dass die Kruste tief unter dem Himalaja zu fließen beginnt. Dadurch kann sich der gewaltige, von den aufgetürmten Gesteinsmassen verursachte Druck entladen.

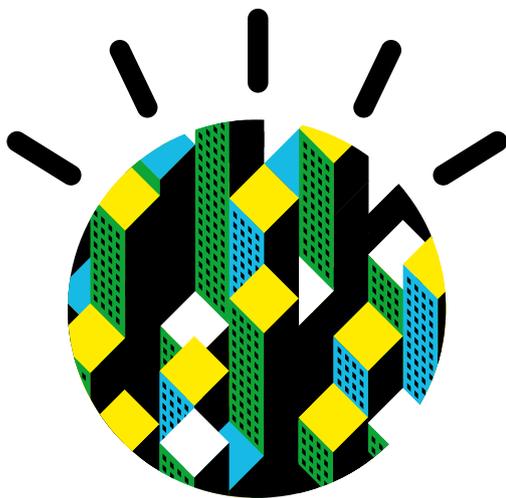
Die meisten bedeutsamen topografischen Veränderungen und die Variation der Krustendicke auf dem Mond sind Folge großer Einschläge, die sich vor Jahrmilliarden ereigneten und tiefe Becken oder Krater hinterließen. Analysiert man, ob und in welchem Maß ein Krater nach seiner Entstehung wieder relaxierte, lassen sich Daten über die Temperatur der unteren Kruste zum Zeitpunkt des Ein-

schlags ermitteln. Führt man solche Untersuchungen an vielen unterschiedlich alten Becken durch, erhält man schließlich eine grobe Zeitreihe der Temperaturen in der unteren Kruste. Dazu muss man allerdings die Form der jeweiligen Becken unmittelbar nach dem Einschlag kennen.

Die Kollision eines Asteroiden oder Kometen mit einem Planeten wirkt sich ähnlich aus wie eine unterirdische Explosion. Tatsächlich ähneln sich die entstehenden Strukturen so sehr, dass man in den 1950er Jahren unterirdische nukleare Explosionen nutzte, um die Entstehung von Einschlagkratern auf der Erde und anderen Himmelskörpern zu untersuchen. Im Moment des Aufpralls wird eine Stoßwelle freigesetzt, die sowohl den Zielplaneten als auch den steinernen Aufschlagkörper durchheilt und große Energiemengen freisetzt. Wegen ihrer hohen Geschwindigkeit verdampfen die kosmischen Projektil dabei üblicherweise vollständig. Dann bleibt auf der lunaren Oberfläche nur ein Krater zurück. Kleine Objekte erzeugen einfache, schüsselähnliche Exemplare; nach dem Einschlag größerer (oder schnellerer) Projektil stürzt der anfängliche Schüsselkrater hingegen bald in sich zusammen; es entsteht eine komplexere Struktur.

Während des Einschlags werden so gewaltige Spannungen aufgebaut, dass sich das Ge-

Einschläge von kleinen Asteroiden oder Kometen erzeugen einfache, schüsselförmige Krater (linkes Bild, Krater rechts oben; die Aufnahme des NASA-Orbiters LRO zeigt zudem Überreste der Apollo-14-Mission und bei genauerem Hinsehen auch den von den Astronauten zurückgelegten Weg). Größere Einschläge, infolge derer sich das Gestein verflüssigt, führen häufig zu Zentralbergen (Mitte; der gezeigte Krater Pythagoras wurde Anfang 2008 von der japanischen Sonde Kaguya aufgenommen). Besonders große Brocken lassen konzentrische Ringe entstehen, so genannte Multi-Ring-Strukturen (rechts).



Ideen für einen smarten Planeten

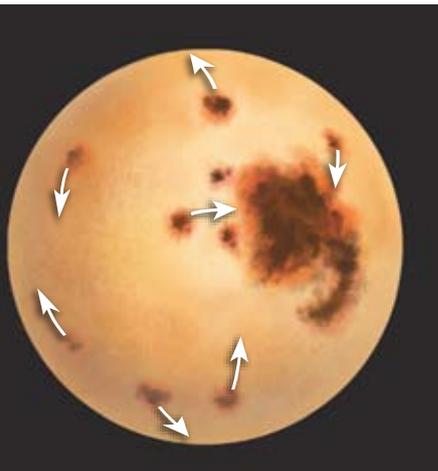
Städte, die uns das Leben leichter machen.

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





BARBARA AULLICINO, AMERICAN SCIENTIST



Noch fehlt eine abschließende Erklärung der lunaren Asymmetrien. Möglicherweise sanken mit radioaktiven Elementen angereicherte Gesteine zuerst ab und stiegen später aus dem lunaren Mantel wieder empor (oben). Die Materialströme ließen die Kruste in einer Hemisphäre dünner werden und sorgten auch dafür, dass basaltische Laven die dortigen Impaktbecken auffüllten. Einer anderen Auffassung zufolge entstanden die Asymmetrien noch während der Existenz des lunaren Magmaozeans. Schwimmende »Steinberge« trieben darin umher und verklumpten auf der uns abgewandten Hemisphäre zu einem riesigen »Kontinent« (unten), was auch die dort sehr dicke Mondkruste erklären würde.

stein rund um den Aufprallort für kurze Zeit wie eine Flüssigkeit verhält. Das Ergebnis ähnelt dem Geschehen in einem stillen Teich, in den ein Stein geworfen wird. Zuerst bildet sich eine Mulde, doch die Wasseroberfläche schnellst rasch zurück. Dabei erhebt sie sich über ihr vorheriges Niveau, bevor sie wieder zurückfällt. Anschließend schwingt sie noch ein paarmal auf und ab, wobei mehrere kreisrunde Wellenringe entstehen. Im Fall eines Impakts stoppt dieser Prozess allerdings, sobald die Spannungen nachgelassen haben und sich das Gestein wieder verfestigt. Deshalb besitzen kleine Krater oft nur einen Zentralberg, während sich größere durch einen zentralen Ring und sehr große Krater durch gleich mehrere größere Ringe auszeichnen.

Für unsere Zwecke sind die Einschlagbecken mit mehreren Ringen, deren Durchmesser mindestens 400 Kilometer betragen, am aufschlussreichsten. Denn die Gravitation ist dort oft ungewöhnlich stark oder, technischer ausgedrückt, die Becken zeigen positive Gravitationsanomalien. Zwar sind sie im Wesentlichen große Löcher im Boden, so dass man eher eine negative Gravitationsanomalie erwarten würde. Doch erstens sind viele von ihnen mit mächtigen Basaltablagerungen gefüllt, die eine große Dichte besitzen. Zweitens haben die schwingungsförmigen Deformationen, welche die Senken entstehen ließen, häufig auch die Basis der Kruste erfasst. Indem diese angehoben wurde, gelangte dichtes Mantelmaterial bis nahe an die Oberfläche. Gemeinsam üben Basalt- und Mantelmaterial durch ihre große spezifische Masse dann eine starke Schwerkraft aus.

Dennoch wurde nicht über allen lunaren Einschlagbecken eine positive Gravitationsanomalie gemessen. Trotz der gewaltigen Menge an Material, das bei den kosmischen Einschlägen ausgeworfen wurde, scheint die Kruste unter den älteren Becken nicht viel dünner zu sein als in den umgebenden Gebieten. Eine mögliche Erklärung lautet, dass zum Zeitpunkt ihrer Entstehung der lunare Magmaocean gerade erst erstarrt und die untere Kruste noch heiß genug war, um in die vom Einschlag gerissene Mulde zurückfließen zu können. Offenbar lässt sich sehr scharf unterscheiden zwischen älteren Becken, die auf diese Weise entspannten, und jüngeren Exemplaren, die ihre ursprüngliche Geometrie beibehielten.

Unter welchen Bedingungen ist viskose Relaxation überhaupt möglich? Das von mir entwickelte Modell planetarer Verformung behandelt Kruste und Mantel des Mondes als viskoelastische Feststoffe. Sie reagieren auf Spannungen also mit einer augenblicklichen elastischen Verformung, der über einen län-

geren Zeitraum hinweg eine viskose Relaxation folgt. Die Zeitskala für diesen Prozess hängt dabei von den physikalischen Materialeigenschaften ab.

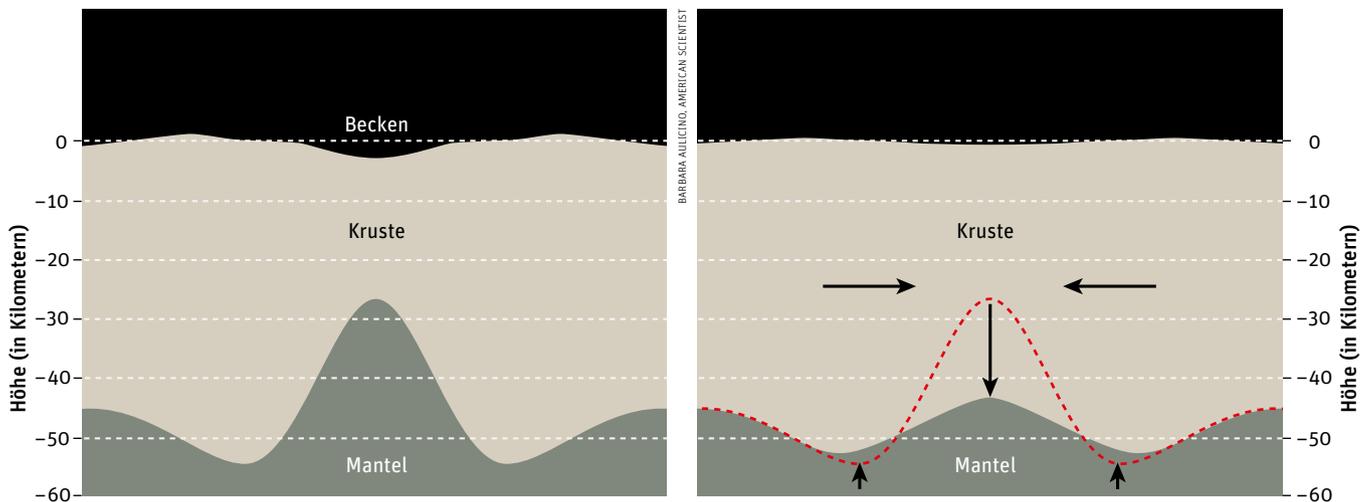
Für mein Modell zog ich die entsprechenden Parameter der lunaren Gesteine heran und berechnete für unterschiedliche Temperaturen die Veränderung der Viskosität mit zunehmender Tiefe. Dann wandte ich das Modell auf die Struktur eines gut erhaltenen lunaren Einschlagbeckens an und untersuchte, wie sich dessen Geometrie unter verschiedenen thermischen Bedingungen im Lauf der Zeit entwickelt. Die viskose Relaxation, so zeigte sich, ist umso wirksamer, je dicker die Kruste ist, weil die plastische Verformung des Gesteins mit zunehmender Tiefe und daher auch zunehmender Temperatur immer ausgeprägter wird.

Die gewaltigsten Einschläge legen den Mantel bloß

Große Einschläge können die Dicke der Kruste um 20 bis 40 Kilometer verringern. Weil sie dadurch schneller auskühlt, spielt die Relaxation gerade bei den heftigsten Einschlägen, die die größten Löcher in die Kruste rissen, die geringste Rolle. Tatsächlich ist die Kruste auf der uns zugewandten Mondhälfte so dünn, dass ein Aufprall, der einen Krater von über 500 Kilometer Durchmesser reißt, nahezu das gesamte Krustenmaterial entfernt und die viskose Relaxation fast gänzlich verhindert.

Die dickere Kruste auf der abgewandten Mondseite erlaubt dagegen viskose Strömungen in ihren unteren Schichten. Zumindest tat sie das früher, für viskose Strömung sind nämlich hohe Temperaturen erforderlich. Sie dürfen höchstens 200 Grad Celsius unterhalb von jenen liegen, die dort unmittelbar nach dem vollständigen Erstarren des lunaren Magmaozeans herrschten; das waren zwischen 1025 und 1125 Grad Celsius. Deshalb konnte die viskose Relaxation nur während einer relativ kurzen Zeitdauer nach der Verfestigung des Magmaozeans stattfinden.

Meine numerischen Modelle zeigen, dass sogar dort, wo die viskose Relaxation die Anhebung der Mantel-Kruste-Grenze nach einem Einschlag ausglich, die Oberflächentopografie erhalten blieb – umso besser, je kühler die Krustentemperatur war. Die Modelle konnten jedoch nicht erklären, warum viele Einschlagbecken vollständig relaxierten, vor allem auf der Vorderseite des Mondes, wo die Kruste dünn und dies laut Theorie gar nicht möglich ist. Eine mögliche Erklärung für dieses Paradox lautet, dass die entsprechenden Becken zu einer Zeit entstanden, als der lunare Magmaocean nicht völlig erstarrt und die untere Kruste noch teilweise ge-



schmolzen war. Flüssiges Gestein in dieser Tiefe würde Fließbewegungen nämlich enorm erleichtern und Relaxationsprozesse sogar in einer dünnen Kruste ermöglichen.

Vorstellbar ist auch, dass die Krater, wie sie von energiereichen Einschlägen in die dünne, geschwächte Kruste gerissen wurden, sofort nach ihrer Entstehung wieder kollabierten, so dass überhaupt keine topografischen Becken zurückblieben. Interessant ist in diesem Zusammenhang, dass die Kruste gerade unter dem ältesten (und größten) lunaren Einschlagbecken, dem Südpol-Aitken-Becken auf der Mondrückseite, sehr dünn ist und hier offenbar keine Relaxation stattfand. Offenbar waren zu der Zeit, als die jüngeren Krater auf der Vorderseite entstanden und wieder relaxierten, die thermischen Bedingungen in der unteren Kruste nicht überall auf dem Mond die gleichen.

Möglicherweise gehen die hemisphärischen Asymmetrien hinsichtlich Temperatur und

Krustendicke auf die Dynamik zurück, mit welcher der Magmaozean erstarrte. Die Mondkruste bildete sich heraus, wie wir wissen, indem hauptsächlich Plagioklas-Feldspat und andere leichte Minerale im Magmaozean aufstiegen. Zufällige Fluidbewegungen führten wahrscheinlich dazu, dass die Plagioklas-Kristalle zu »Steinbergen« analog irdischen Eisbergen zusammenwuchsen, und zwar oberhalb jener Stellen, wo das Magma absank. Durch ungerichtete horizontale Drift könnten sich diese Steinberge zu einem einzigen riesigen »Kontinent« zusammengeballt haben, der das Herzstück der uns abgewandten Mondkruste bildete und die hemisphärische Asymmetrie in der Krustendicke hervorbrachte.

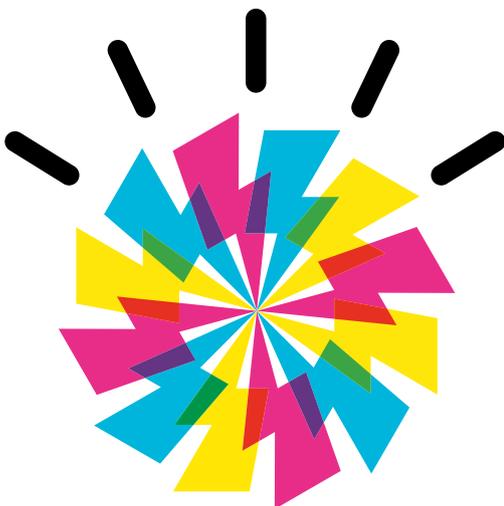
Trifft jene Vermutung zu, dann wäre der Magmaozean zuerst auf der Rückseite des Mondes erstarrt, wodurch sich die verbleibende Gesteinsschmelze – angereichert mit inkompatiblen radioaktiven Elementen – auf der Vorderseite konzentrierte. Die Wärme, die diese

Viele der größten Einschlagbecken zeigen positive Gravitationsanomalien, da während ihrer Entstehung dichtes Mantelmaterial zur Oberfläche aufstieg und einen unterirdischen Berg bildete (links). Ist die Kruste aber genügend heiß, kann der Berg wieder in sich zusammensinken, weil die darüberliegende Kruste in das Einschlagbecken zurückfließt und es wieder auffüllt (rechts). Dann verbleibt eine nur geringe Gravitationsanomalie.

Ideen für einen smarten Planeten

Stromnetze, die Strom sparen.

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



KRATERFORSCHUNG AUCH AUF MARS UND MERKUR

Einschlagbecken auf terrestrischen Himmelskörpern liefern aufschlussreiche Erkenntnisse über deren frühe Entwicklungsgeschichte und inneren Aufbau. Auch auf dem Mars untersuchte der Autor des Artikels darum alte Einschlagbecken mit 275 bis 1000 Kilometer Durchmesser, die sich durch vergleichsweise geringe Tiefen auszeichnen. Grund für diese Eigenschaft könnte sein, dass die Oberfläche des Roten Planeten anders als die des Monds im Lauf der Jahrtausende durch Wind und Wasser sowie die Ablagerung von Sedimenten stark verändert worden ist. Gleichwohl fanden P. Surdas Mohit und seine Kollegen hier ebenfalls Hinweise, dass die viskose Relaxation – auch weil der Vorgang durch den Wassergehalt der Kruste unterstützt wird – gegenüber den Oberflächenprozessen eine dominante Rolle für die heutige Form der Einschlagbecken spielt. Auf diese Weise konnten die Forscher unabhängige Ergebnisse zur frühen thermischen Evolution des Mars bestätigen.

Dass der Mars so wie der Mond eine hemisphärische Dichotomie aufweist – die nördlichen, kraterarmen Tiefebene des Planeten unterscheiden sich deutlich von dem kraterzernarbten, einige Kilometer höher liegenden südlichen Hochland –, scheint

allerdings keineswegs die Folge von Prozessen zu sein, die Jahrmillionen andauerten. Mittlerweile nämlich haben sich die Anzeichen für einen gigantischen Einschlag wenige hundert Millionen Jahre nach der Entstehung des Planeten gemehrt. Er könnte für die rund 10 000 mal 8000 Kilometer messende elliptische Form des Flachlands verantwortlich sein.

Unterdessen hat Mohit seine Untersuchungen sogar auf den Merkur ausgedehnt. Noch ist zwar die Datenlage nicht optimal, denn der sonnennächste Planet wird erst seit Kurzem wieder intensiver erforscht. Im September passierte ihn die Messenger-Sonde zum dritten Mal, bevor sie im März 2011 für rund ein Jahr in eine endgültige Umlaufbahn einschwenken wird. Um die unerwartet flachen Einschlagbecken auf Merkur zu erklären, kommen neben der viskosen Relaxation allerdings weiterhin zwei Alternativszenarien in Frage. Entweder haben Lavaströme die Becken gefüllt, oder aber Einschläge haben die relativ dünne Kruste vollständig entfernt und dabei Mantelmaterial freigelegt. In diesem Fall wäre der Krater im Anschluss an den Impakt kollabiert und hätte sich zum Teil wieder selbst aufgefüllt. **T. K.**

Literaturhinweise:

Loper, D. E., Werner, C. L.: On Lunar Asymmetries: 1. Tilted Convection and Crustal Asymmetry. In: Journal of Geophysical Research 107(E6), S. 5046, 2002.

Mohit, P. S., Phillips, R. J.: Viscous Elastic Evolution of Lunar Multiring Basins. In: Journal of Geophysical Research 111(E12001), 2006.

Stegman, D. R. et al.: An Early Lunar Core Dynamo Driven by Thermochemical Mantle Convection. In: Nature 421, S. 143–146, 2003.

Wieczorek, M. A. et al.: The Constitution and Structure of the Lunar Interior. In: Reviews of Mineralogy and Geochemistry 60, S. 221–364, 2006.

Elemente durch ihren radioaktiven Zerfall produzierten, hätte die Abkühlung der uns zugewandten Kruste verzögert. Zudem hätten sich ilmenitreiche Kumulate bevorzugt auf der lunaren Vorderseite gebildet. Somit hätte es auf dieser Hälfte des Monds sowohl die Ausgangsgesteine für die Laven gegeben, die später die Maria erzeugten, als auch die Wärmequellen, um die Gesteine zu schmelzen. Mit dem Szenario lassen sich einige der Asymmetrien gut erklären: sowohl die dickere Kruste und die ausgeprägtere viskose Relaxation auf der Rückseite des Monds als auch die Konzentration der Krep-Gesteine und der Mare-Basalte auf der Vorderseite.

Nicht erklärbar bleibt jedoch, warum die beiden unterschiedlichen Hemisphären genau

so angeordnet sind, dass wir von der Erde aus nur eine von ihnen sehen. Durch bloßen Zufall vielleicht? Der Gedanke erscheint zwar nicht besonders befriedigend, ist vielleicht aber die beste Hypothese, die wir haben. Denn untersucht man die Asymmetrien des Monds genauer, findet man tatsächlich einige Belege für diese Annahme.

Die Hemisphäre mit der dickeren Kruste ist nämlich nicht völlig deckungsgleich mit der Rückseite des Monds. Sie überlappt mit ihr, ist aber um 23 Grad gegen die Erde-Mond-Achse geneigt. Ähnlich stark gegen diese Achse ist die Linie gekippt, die das Massezentrum des Monds mit seinem geometrischen Mittelpunkt verbindet. (Dass die beiden nicht zusammenfallen, verdankt sich den Mare-Basalten mit ihrer hohen Dichte.) Hätte hier ein Schwerkraftmechanismus dominiert, wären die beiden verschiedenen Mondhemisphären besser auf die Erde ausgerichtet.

Eine faszinierende Lösung für das Problem schlugen David E. Loper und Christopher L. Werner von der Florida State University vor. Sie postulierten, dass die Asymmetrien des Monds auf die »schiefe Konvektion« zurückgehen, ein Konzept, das Ruby Krishnamurti und Louis N. Howard von derselben Universität in Labortests entwickelten. Wird eine Flüssigkeitsschicht von unten erwärmt, von oben abgekühlt oder geschieht beides gleichzeitig, dann hängt ihr Verhalten stark vom Verhältnis zwischen der treibenden Kraft (der Dichtedifferenz zwischen unterschiedlich war-



mer Ober- und Unterseite der Schicht) und der Widerstandskraft (vor allem der Viskosität der Flüssigkeit) ab. Sobald dieses Verhältnis einen kritischen Wert überschreitet, beginnt die warme Flüssigkeit aufzusteigen und die kalte Flüssigkeit abzusinken: Es kommt zu einer vertikalen Durchmischung. So wird die Wärme wesentlich effektiver transportiert, als es durch Wärmeleitung allein geschähe.

Zunächst spielt sich die Durchmischung in Form stabiler »Zellen« ab, in denen die auf- und absteigenden Flüssigkeitsportionen ein einfaches geometrisches Muster bilden. Derartige Strömungen lassen sich in jedem japanischen Restaurant beobachten, wenn Sie der Bewegung der feinen Sojakörnchen in einer heißen Misosuppe zusehen.

Asymmetrie schon nach zehn Millionen Jahren?

Führt man der Flüssigkeitsschicht immer mehr Wärme zu, werden die Konvektionsströme aber immer heftiger, bis die geordneten Zellen zerfallen. An ihre Stelle treten dann heiße und kalte »Blasen«, die an zufälligen Orten auf- und absteigen. Krishnamurti und Howard entdeckten, dass bei einer Erwärmung der Flüssigkeitsschicht über einen weiteren kritischen Wert hinaus Blasen entstehen, die sich sowohl vertikal als auch horizontal bewegen. Sie steigen nun nicht mehr senkrecht nach oben, sondern in einem bestimmten Winkel – das ist die schiefe Konvektion.

Im Modell lässt sich der Winkel beeinflussen, indem man ein laterales Temperaturgefälle anlegt. Loper und Werner mutmaßten daher, dass die schiefe Konvektion im lunaren Magmaozean (in dem ihren Berechnungen zufolge genügend starke Konvektionsströme herr-

schen) die aufsteigenden Anorthosit-Kristalle auf die Rückseite des Monds transportiert haben könnte. Gemäß ihrer Hypothese war die uns zugewandte Mondhemisphäre etwas wärmer als die von uns abgewandte, weil sie, solange sie nicht im Sonnenlicht lag, immerhin von Licht beschienen wurde, das die Erde reflektierte.

Diese Erklärung setzt voraus, dass der Mond schon sehr früh eine gebundene Rotation vollführte, uns also schon seit langer Zeit immer dieselbe Seite zeigt. Schätzungen zufolge könnte es gerade einmal zehn Millionen Jahre gedauert haben, bis es so weit war. Zu diesem Zeitpunkt war der lunare Magmaozean vermutlich noch flüssig. Die Hypothese von Loper und Werner, auch wenn ihre experimentelle Überprüfung sehr schwierig ist, scheint also immerhin plausibel zu sein.

Wie auch immer die Erklärung dafür lauten wird, dass die beiden verschiedenen Mondhemisphären mehr oder weniger auf die Erde ausgerichtet sind: Der Mechanismus, der die lunare Asymmetrie ursprünglich hervorbrachte, steht womöglich kurz vor der Aufklärung – zumindest, wenn man den hier dargelegten Gedanken folgen will. Gleichwohl sind weitere Forschungen nötig, um diese Ideen voll auf zu bestätigen.

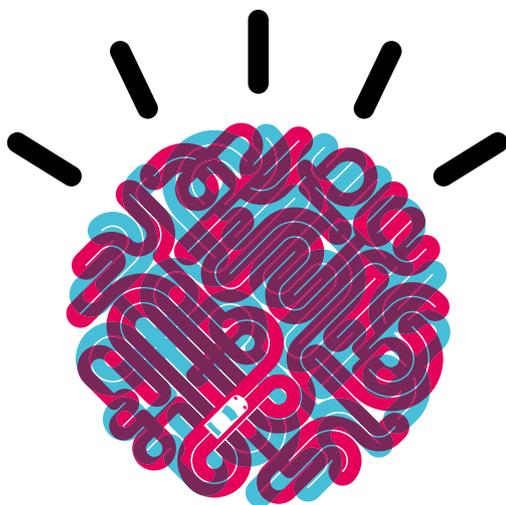
Das Datenmaterial könnten die zahlreichen Mondmissionen liefern, die in den nächsten Jahren starten sollen (siehe Kasten S. 46). Zwar werden wir abwarten müssen, ob es tatsächlich dazu beitragen kann, die hemisphärische Asymmetrie des Monds zu erklären. Eines immerhin ist ganz sicher: Unser rätselhafter Begleiter mit den zwei Gesichtern wird wieder einmal einige seiner Geheimnisse preisgeben müssen. <



P. Surdas Mohit promovierte 2007 in Planetologie an der Washington University im US-Bundesstaat Missouri. Jetzt ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachbereich Earth & Ocean Sciences der University of British Columbia im kanadischen Vancouver. Sein Forschungsinteresse gilt viskoelastischen Verformungen in verschiedenen Himmelskörpern des Sonnensystems.

© American Scientist
www.amsci.org

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/1006314.



Ideen für einen smarten Planeten

Straßen, die helfen, Staus zu verhindern.

Die Straßen von heute sind dem Verkehr nicht mehr gewachsen. Allein die Staus in der EU haben 2007 mehr als 135 Mrd. Euro gekostet, Umweltfolgen nicht mitgerechnet. Bevor wir nun immer neue Straßen bauen, sollten wir die vorhandene Infrastruktur besser und intelligenter nutzen: Zum Beispiel durch Verkehrsmanagement-Systeme, die Pendlerströme effizient steuern. Das reduziert Staus, Benzinverbrauch, Abgase. Und liefert Stadtplanern wichtige Hinweise für die Gestaltung der Städte von morgen. Es ist, mit einem Wort, smart. Welchen Beitrag IBM dazu leistet, erfahren Sie unter ibm.com/think/de/traffic



Spiralwirbel in der Wasserschale

Jets aus Kohlenstoffdioxidgas versetzen Trockeneiskrümel in heftige Bewegung.

... die Spirale ist dort, wo die Materie (...) beginnt, etwas Lebendiges zu werden.
Friedensreich Hundertwasser (1928–2000)

Es ist noch gar nicht lange her, da befanden sich die nächstgelegenen Trockeneisreservoirs in beträchtlicher Entfernung. Auf dem Mars nämlich friert in jedem Winter Kohlendioxid aus der Atmosphäre aus, wird also zu Trockeneis, und lässt die jeweilige Polkappe wachsen. In schönem Kontrast zu diesem ganz allmählichen Wandel steht ein kleines Experiment, bei dem wir Trockeneiskrümel, wie sie sich mittlerweile in irdischer Eigenproduktion herstellen lassen, in eine Schale Wasser geben. Denn plötzlich entwickelt sich eine zeitrafferschnelle Dynamik, die uns ein geradezu kosmisch anmutendes Szenario von Gasjets und galaktischen Spiralen vor dem Hintergrund eines nachtschwarzen Sternenhimmels vorgaukelt (großes Foto).

Steigt die Temperatur von Trockeneis über seinen Schmelzpunkt von minus 78,5 Grad Celsius, überspringt der Feststoff den Übergang zur flüssigen Phase: Er sublimiert, wird also unmittelbar gasförmig. Wenn nun Bruchstücke aus Trockeneis auf Wasser treffen, gehen die größeren von ihnen auf Grund ihrer im Vergleich zu H_2O größeren Dichte erst einmal unter, machen aber mit einer im Wasser aufsteigenden, durch die Sublimation genährten Gasfahne weiter auf sich aufmerksam.

Haben die Bruchstücke genügend Substanz verloren, steigen sie an die Oberfläche, wo sich bereits die gar nicht erst versunkenen kleineren Krümeln tummeln. Ihre geringere mittlere Dichte verdanken diese, ähnlich den Rosinen im Mineralwasser (SdW 7/2009, S. 38, in dieser Rubrik), anhaftenden CO_2 -Gasbläschen. Aber auch der Rückstoß nach unten abgehender Gasströme kann zu einem Aufstieg führen, infolge der Flächen-Volumen-Relation (siehe SdW 4/2009, S. 29) – allerdings erst bei genügend kleinen Krümeln.

Im Kontaktbereich zwischen Wasseroberfläche und Trockeneis strömt das Gas nun in wirkungsvollen Jets aus; mit Vorliebe aus exponierten Stellen in der stark zerklüfteten Oberfläche des Eises, an denen die Wärmeaufnahme aus dem Wasser besser funktioniert (abermals die Flächen-Volumen-Relation!) als anderswo. Optisch wahrnehmbar wird das



ALLE FOTOS: H. JOACHIM SCHLICHTING

Geschehen aber erst, weil Wasserdampf aus der Luft unmittelbar über der Wasseroberfläche durch das Gas abgekühlt wird und kondensiert: Entlang der unsichtbaren Gasströme bilden sich infolgedessen Kondensstreifen aus kleinen Wassertröpfchen.

Damit gerät der Schauplatz richtig in Schwung. Je nach Morphologie der Trockeneisbrösel führen die Jets bei »zentralem« Ausstoß des Gases zu einer mehr oder weniger schnellen Translationsbewegung, exzentrischer Ausstoß hingegen lässt ein Drehmoment entstehen, wodurch die Teilchen auf der Stelle rotieren. Am interessantesten sind natürlich komplexe Kombinationen beider Bewegungstypen. Zudem verlieren die sublimierenden Trockeneisbrösel ständig an Substanz, so dass sich ihre Form und Bewegung in unvorhersehbarer Weise ändern.

Prallen verschiedene Jets aufeinander oder gleiten aneinander ab, bilden sich obendrein charakteristische Grenzlinien zwischen den im Nebel verlaufenden Aktivitätsbereichen des sublimierenden Eises. Dann ist auch unser ästhetisches Bedürfnis befriedigt: Aus ihnen modelliert das an den Tröpfchen gestreute Licht eine höchst ansprechende Struktur, in der die Dynamik des zerfallenden Trockeneises wie eingebettet erscheint. ◀

Die dynamische Selbstauflösung durch Sublimation: Trockeneiskrümel auf einer Wasseroberfläche



Kohlendioxid wird erst unterhalb von minus 78,5 Grad Celsius fest. Dann kann es als Kühl- und Vereisungsmittel genutzt werden.



H. Joachim Schlichting ist Professor und Direktor des

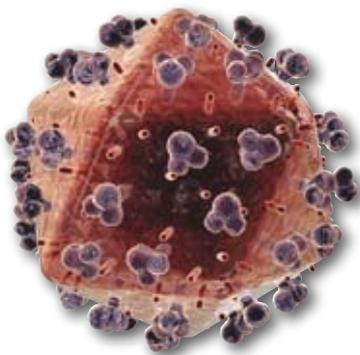
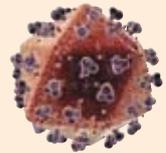
Instituts für Didaktik der Physik an der Universität Münster.

Links zu zwei kurzen Filmen der dargestellten Situation: www.spektrum.de/artikel/1009912.

25 JAHRE HIV-FORSCHUNG

Neue Strategien gegen das AIDSVIRUS

Dass ein Retrovirus die Immunschwäche verursacht, die zu Aids führt, erkannten Forscher 1983 und 1984. Damals glaubten viele Experten, ein Impfstoff ließe sich in wenigen Jahren entwickeln. Er steht immer noch nicht zur Verfügung – neueste Studienergebnisse stimmen dennoch optimistisch. Seit den 1990er Jahren lässt sich das Virus mit Medikamenten zumindest in Schach halten. Wieder hieß es, bald müsste es gelingen, HIV-Patienten von dem Erreger zu kurieren. Auch das hat sich nicht bewahrheitet. Zwei führende HIV-Forscher schildern die Aussichten, eines der widerspenstigsten Viren dennoch zu besiegen.



Der schwierige Kampf um den **HIV-IMPFSTOFF**

Mit erprobten Verfahren erlitten die Impfstoffentwickler bei HIV viele Fehlschläge. Sie suchen nun nach grundsätzlich neuen Strategien.

Von David I. Watkins

Das Aidsvirus war kaum entdeckt, schon erklärte die damalige US-Gesundheitsministerin den Journalisten, jetzt könnten Forscher bald einen Impfstoff gegen HIV, das humane Immunschwächevirus, entwickeln. »In ungefähr zwei Jahren möchten wir so weit sein, dass wir mit den Tests einer Vakzine anfangen können«, äußerte sich die Politikerin optimistisch. Das war im Jahr 1984.

Von Politikern sind wir falsche Prognosen gewöhnt. Doch Wissenschaftler haben sich in breiter Front selten so völlig verschätzt wie bei diesem Thema. Auch ein Vierteljahrhundert nach der Entdeckung des HI-Virus gibt es noch immer keinen überzeugenden Impfstoff gegen den Erreger. Erst im Jahr 2007 brach die US-Firma Merck (Merck & Co, Inc.) groß angelegte klinische Tests eines Impfstoffkandidaten wegen ungünstiger Ergebnisse ab. Die schon geplante Prüfung einer ähnlichen Vakzine sagten die US-Ge-



FOTO: GETTY IMAGES / PAULA BRONSTEIN; ALLE HIV-3D-RENDERINGS IM ARTIKEL: ZYGOTE MEDIA GROUP INC.

Erstmals erzielte jetzt ein groß getesteter HIV-Kombinationsimpfstoff immerhin fast 30 Prozent Wirkung.

sundheitsinstitute in Bethesda (Maryland) im Sommer 2008 ab, denn dessen Auswirkungen erschienen nicht besser (siehe Kasten S. 61).

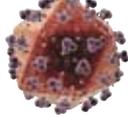
Nach über zwei Jahrzehnten angestrengter Forschung waren das schwere Rückschläge. Wir mussten uns eingestehen, dass Impfstoffe der üblichen Art gegen das HI-Virus mit seinen besonderen Tricks offenbar nichts nützen. Keines der klassischen Verfahren zur Impfstoffentwicklung scheint sich bei diesem Erreger zu eignen. Uns wurde klar, dass wir stattdessen ganz andere, neue Konzepte finden müssen. Es gilt, doch noch die Achillesferse des Virus zu finden, irgendetwas also, das es verwundbar macht. Trotzdem waren diese Jahre nicht umsonst. Jeder Fehlschlag hat auch Strategien des Erregers offenbart und uns immer wieder zu neuen Ideen angeregt, sie zu unterlaufen. Außerdem haben die Forscher begriffen, dass sie stärker zusammenarbeiten und ihre Erkenntnisse rascher austauschen sollten. Mit vereinten Kräften müssten wir das Virus mit all seinen Feinheiten schließlich enträtseln können.

Warum helfen übliche Impfstoffansätze nicht gegen eine HIV-Infektion? Die traditionellen Vakzinen aktivieren im Körper natürliche Immunreaktionen. Das kann auf verschiedene Weise geschehen, auch unter Beteiligung unterschiedlicher Immunpartner. Zur Impfung gegen Influenza (Virusgrippe) werden beispielsweise inaktivierte oder abgetötete Viren mehrerer gerade kursierender Stämme verwendet. Das Serum wird unter die Haut oder in einen Muskel gespritzt, wo Immunzellen die Virusproteine als fremd erkennen. Nun stellt unser Körper binnen weniger Wochen so genannte Antikörper her, kleine Moleküle, die speziell gegen die verimpften Virusstämme wirken. Sollten die betreffenden Erreger später in den Körper gelangen, würden jene Antikörper sie abfangen und neutralisieren: Sie lagern sich an die aggressiven Viruspartikel an und verhindern so, dass sie Zellen infizieren.

Bei der Schluckimpfung gegen Kinderlähmung (Polio) werden hingegen abgeschwächte Lebendviren verabreicht. Sie lösen die Krankheit nicht aus (bis auf sehr seltene

In Kürze

- ▶ Ein Impfstoff gegen eine **Ansteckung mit dem Aidsvirus HIV** steht immer noch nicht zur Verfügung. Die Forschung erlebte bisher meist nur herbe Rückschläge. Das Virus unterläuft die Immunabwehr allzu geschickt.
- ▶ Am **zweitbesten nach einer vorbeugenden Impfung** erscheint eine, die zumindest verhindert, dass sich der Erreger im Körper stark vermehrt. Solch eine Vakzine würde die Virusträger gesund lassen und die Ansteckungsgefahr senken.
- ▶ Den Forschern ist klar: Sie müssen **neuartige Impfkonzepete** entwerfen. Dafür braucht es vor allem Grundlagenstudien.



Ausnahmefälle), befallen aber in begrenztem Umfang Zellen. Dadurch bildet das Immunsystem nicht nur spezifische Antikörper gegen diese Viren, sondern reagiert auch mit einer so genannten zellulären Immunantwort, bei der T-Zellen (T-Lymphozyten) mitwirken. Falls so Geimpfte mit regulären Polioviren in Kontakt kommen, zerstören diese Lymphozyten alle vom Virus infizierten Zellen – wenn den ebenfalls vorhandenen Antikörpern Erreger entgangen sein sollten. (In Deutschland wird diese Schluckimpfung heute wegen der damit verbundenen geringen Gefahren nicht mehr empfohlen. Stattdessen impft man wieder mit Totmaterial.)

Die beiden Beispiele verdeutlichen, wie herkömmliche Impfstoffe funktionieren: Sie regen die Bildung von spezifischen Antikörpern beziehungsweise T-Zellen an. Seit Jahrzehnten nutzen Mediziner diese Mechanismen erfolgreich gegen unterschiedlichste Krankheitserreger. Die gebräuchlichen Vakzinen provozieren gewissermaßen Teile der Immunvorgänge wie bei einer wirklichen Infektion. Dabei entwickelt das Immunsystem ein Gedächtnis und kann dann im Ernstfall schnell und aggressiv reagieren. Nur beim Aidsvirus versagen solche Strategien offensichtlich. Denn vertrackterweise unterläuft HIV genau diese Immunreaktionen. Es scheint durch und durch dafür gemacht, dem Abwehrsystem zu entkommen – ja sogar es außer Gefecht zu setzen.

Wenn HI-Viren einen neuen menschlichen Wirt finden, vermehren sie sich gleich in den ersten Tagen und Wochen rasant (Kasten S. 58), welche T-Zellen mittels ihres T-Zell-Rezeptors erkennen. Die in solchen Komplexen präsentierten Fragmente des Eindringlings zusammen mit Helferzellensignalen bringen Killerzellen dazu, sich zu vermehren, auszuschwärmen und infizierte Zellen zu töten. Dieser Angriff setzt ungefähr drei Wochen nach der HIV-Infektion ein. Tatsächlich werden dabei die meisten infizierten Zellen erwischt. Die Viruslast sinkt wieder stark ab. Trotzdem ist die Reaktion gewöhnlich für eine Heilung zu schwach und erfolgt auch zu spät, denn die Betroffenen sind jetzt schon chronisch infiziert – lebenslang.

Blutplasma eine Viruslast von 100 Millionen Kopien auf. Danach sinkt die Menge aber zunächst wieder deutlich ab. Wie kommt das?

Normalerweise tritt bei einer Erstinfektion, auch bei HIV, vor allem anderen die so genannte angeborene, somit unspezifische Immunabwehr in Aktion. Die geschilderten spezifischen Immunfronten mit Antikörpern und T-Lymphozyten müssen sich ja erst formieren. In der vordersten Abwehrlinie agieren aber schon Wächterzellen, die immerfort im Körper patrouillieren und gegen etwaige Eindringlinge vorgehen. Einige jener Immunzellen zerstören aufgestöberte virusinfizierte Zellen auf der Stelle. Nur überschwemmt HIV den Organismus im ersten Ansturm offenbar dermaßen, dass die Wächterzellen dem nicht Einhalt gebieten können.

Wie HIV der Immunabwehr davonläuft

Auch andere Mitglieder der angeborenen Immunität, so genannte antigenpräsentierende Zellen, sind von Anfang an tätig: Sie nehmen Virusproteine auf, die sie später den spezialisierteren Immunkomponenten vorweisen können. Zu jenen spezifischen, erst erworbenen Komponenten gehören die erwähnten T-Zellen mit zwei Haupttypen: »Helfern« und »Killern«. T-Helferzellen alarmieren und koordinieren die spezifische zelluläre Abwehr. Und zwar zeigen antigenpräsentierende Zellen ihnen und den Killerzellen Fragmente der entdeckten Fremdproteine (Antigene). Hierfür benutzen sie so genannte MHC-Moleküle (für *major histocompatibility complex*, Kasten S. 58), welche T-Zellen mittels ihres T-Zell-Rezeptors erkennen. Die in solchen Komplexen präsentierten Fragmente des Eindringlings zusammen mit Helferzellensignalen bringen Killerzellen dazu, sich zu vermehren, auszuschwärmen und infizierte Zellen zu töten. Dieser Angriff setzt ungefähr drei Wochen nach der HIV-Infektion ein. Tatsächlich werden dabei die meisten infizierten Zellen erwischt. Die Viruslast sinkt wieder stark ab. Trotzdem ist die Reaktion gewöhnlich für eine Heilung zu schwach und erfolgt auch zu spät, denn die Betroffenen sind jetzt schon chronisch infiziert – lebenslang.

Anscheinend stellen die T-Helferzellen die wichtigsten Regulatoren im Kampf gegen Erreger dar. Umso schlimmer ist es, dass HI-Viren von Anfang an ausgerechnet sie befallen, sich in ihnen vermehren und sie dabei zerstören. Mehr noch: Das Virus sucht sich insbesondere Helfergedächtniszellen, also die Fraktion der T-Zellen für ein Immungedächtnis. Der Bestand an diesen Gedächtniszellen schwindet binnen Wochen nach der Infektion geradezu dramatisch (Kasten S. 62). Das Herz der Abwehr, ihr

VON DER VIELFALT ÜBERWÄLTIGT

Das Aidsvirus mutiert viel zu schnell, als dass die Immunabwehr dessen aus eigenen Kräften Herr werden könnte. HIV befällt die ersten Immunzellen schon Stunden nach der Ansteckung. Zwar ruft das Immunsystem sogleich seine gesamten Strategien auf den Plan, und die agieren durchaus heftig und nachhaltig. Doch das Virus entwischt jeder errichteten Phalanx durch immer wieder neue Tarnung. Ähnlich bei Impfstoffen, die auf herkömmlichen Konzepten beruhen: Das Virus macht sich für durch Vakzinen erzeugte Erkennungsmoleküle rasch wieder unkenntlich.

NEIN, ALS HIV-IMPfung TAUGT ES LEIDER NICHT-
ABER ES WIRKT BESSER ALS VIAGRA!

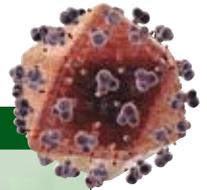


Befehls- und Kontrollzentrum, ist damit lädiert und wird sich nie mehr wirklich erholen.

Viele Sorgen bereitet zudem eine andere fatale Eigenschaft von HIV: Das Virus lernt zunehmend, den Killerzellen zu entgehen. Denn es mutiert immerfort und sehr schnell. Um sich zu vermehren, baut es sein genetisches Material in das von infizierten Zellen ein. Als Retrovirus verfügt es über ein Genom aus so genannter RNA, deren Sequenzen erst in DNA umgeschrieben werden müssen. Dabei unterlaufen ständig Kopierfehler. Zudem häufen sich diese Mutationen mit der Zeit an. Es kommt sogar vor, dass zwei verschiedene Viruspartikel die gleiche Zelle befallen und sich ihr Genmaterial mischt. Dann können neue Varianten entstehen.

So werden die HI-Viren im Körper immer vielfältiger, ihre Proteine im Vergleich zum Ausgangserreger immer fremder. Immunzellen, welche auf die zum Zeitpunkt der Infektion vorhandene Version geeicht sind, können die veränderten Moleküle immer schlechter erkennen. Deswegen übersehen die Killerzellen mit der Zeit immer mehr der infizierten Zellen, bis diese schließlich die Oberhand gewinnen. Ein ähnliches Schicksal erleben die Antikörper, die sich drei bis vier Wochen nach der Infektion herausbilden. Sie erkennen später viele der Viruspartikel einfach nicht mehr.

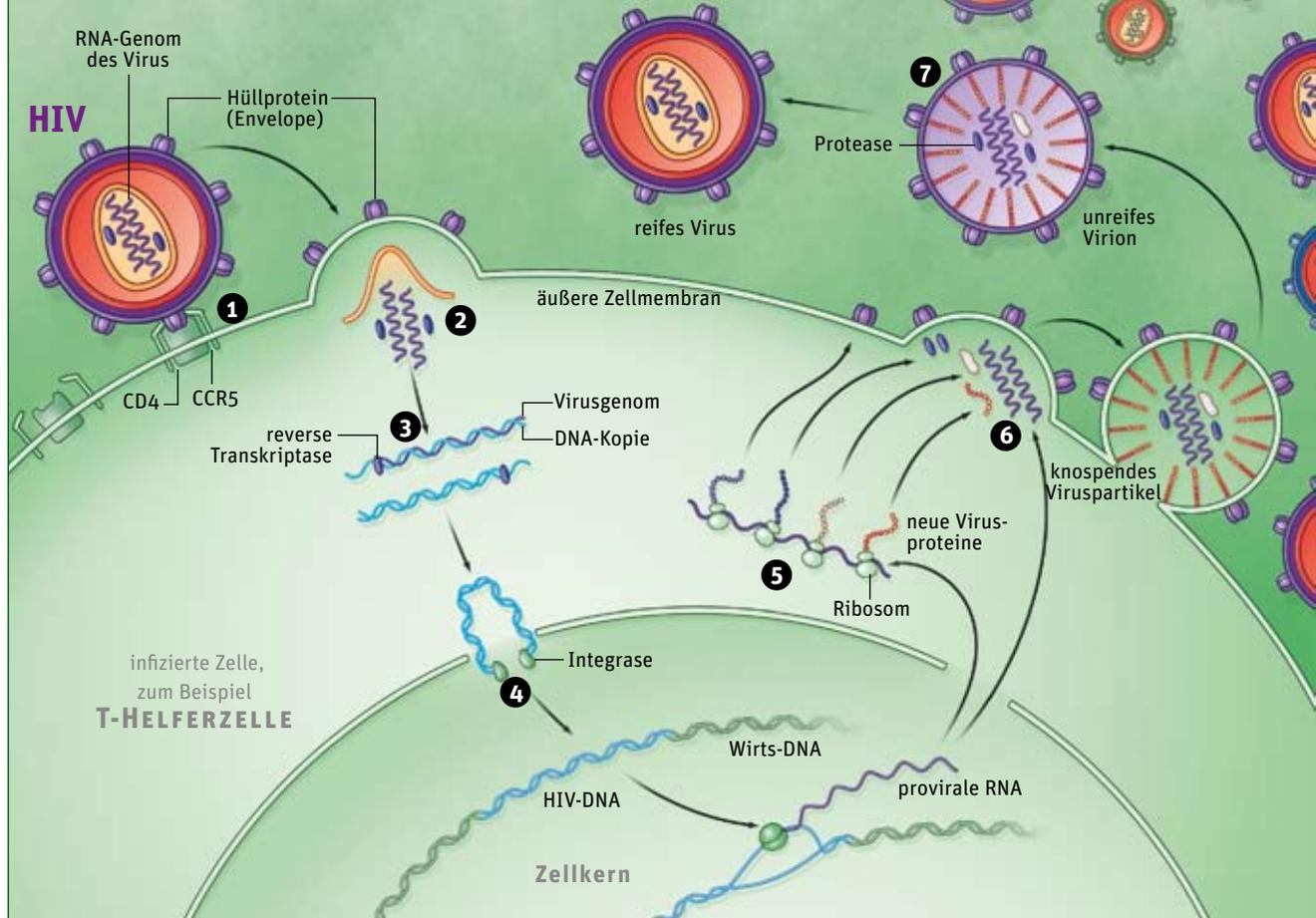
Vor demselben Problem stehen die Impfstoffentwickler. Selbst wenn es gelingt, mit einer neuen Vakzine ein starkes Immungedächtnis hervorzurufen, reagieren die dafür gebil-



VERMEHRUNGSZYKLUS VON HIV

Das Aidsvirus benutzt zur Vervielfältigung Wirtszellen, deren Maschinerie es für seine Zwecke einsetzt. Zuerst muss sich HIV mit seinem Hüllprotein Envelope an Rezeptormoleküle der Zelle binden (1). Daraufhin verschmilzt seine Hülle mit der Zellaußenmembran, und der Virusinhalt gelangt in die Zelle (2). Das Virusenzym reverse Transkriptase kopiert dann die virale RNA (das Virusgenom) in doppelsträngige DNA um (3) – wobei viele Kopierfehler auftreten, die zu Virusvarianten führen. Das Virus-

enzym Integrase baut die neuen Erbstränge ins Wirtsgenom ein (4). Die Zellmaschinerie schreibt diese Sequenzen wieder in RNA um. Dabei entstehen auch Vorlagen, an denen die Zelle Virusproteine herstellt (5). Virale Proteine und RNA finden sich zu neuen Viruspartikeln zusammen – und die noch unreifen Virionen knospen aus (6) und trennen sich ab. Ein Protease genanntes Virusenzym schneidert die viralen Proteine noch zurecht (7), so dass schließlich neue infektiöse Viren entstehen.

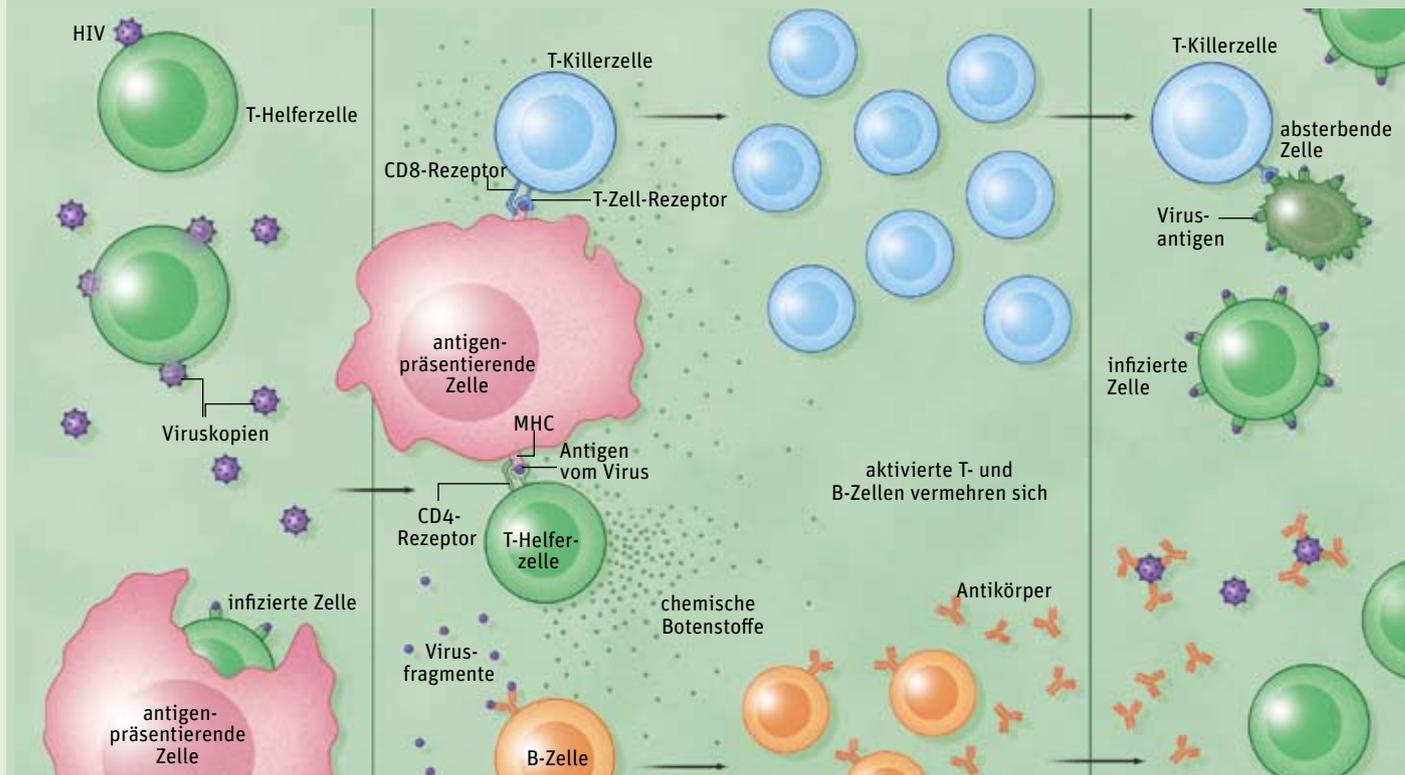


FRÜHE REAKTIONEN DES IMMUNSYSTEMS

Am besten sollte eine Schutzimpfung die HIV-Infektion völlig verhindern. Zumindest aber müsste sie die Virusvermehrung von Anfang an stark eingrenzen. Impfstoffe stimulieren in der Regel einige Immunreaktionen wie bei einer natürlichen Infektion. T-Zellen und Antikörper

bilden das Immungedächtnis für den Ernstfall. Doch HIV mutiert dafür zu schnell. Das Immungedächtnis müsste Viren noch erkennen können, wenn ihre Moleküle zu 20 Prozent von denen im Impfstoff abweichen. Das könnten etwa breit wirkende Antikörper leisten (Kasten S. 60/61).

DIE ERSTEN WOCHEN NACH INFektion MIT HIV



Gleich in den ersten Stunden im Körper infiziert HIV T-Helferzellen. Antigen-präsentierende Zellen verschlingen alles, was sie an Viren und infizierten Zellen finden.

In den nächsten Tagen zeigen die antigen-präsentierenden Zellen Teile des Virus mit Hilfe von MHC-Molekülen vor. Sie präsentieren diese Antigene gesunden T-Helfer- und T-Killerzellen. Die Helferzellen aktivieren dann mit Signalstoffen B-Zellen und T-Killerzellen, die sich nun vermehren und immer spezifischere Moleküle gegen das Virus ausbilden. Einige davon bleiben später als Gedächtniszellen erhalten.

Binnen Wochen treten spezifische Killerzellen auf, die infizierte Zellen an den präsentierten Antigenen erkennen und vernichten, sowie Antikörper, die Viruspartikel abfangen und so unschädlich machen.

TAMI TOLPA

Schon bald nach einer Impfung kann das infizierende Virus wieder ganz anders aussehen als das der Vakzine

deten Antikörper wie T-Killerzellen vor allem auf den beim Impfstoff verwendeten Virusstamm. Das infizierende Virus kann aber schon wieder ganz anders aussehen, oder zumindest wird es weiter mutieren und sich den maßgeschneiderten Immunwaffen bald entziehen können.

Dieses Verhalten lässt sich beim HI-Virus noch wesentlich schwerer beherrschen als beim Influenzavirus. Schon den Grippeimpfstoff müssen die Hersteller jedes Jahr verändern und neu anpassen, weil die kursierenden Erreger andauernd mutieren. Antikörper von der letztjährigen Impfung würden manche der neuen Stämme gar nicht mehr erkennen. HIV mutiert aber so rasch, dass seine Vielfalt bei einem einzelnen Menschen sechs Jahre nach

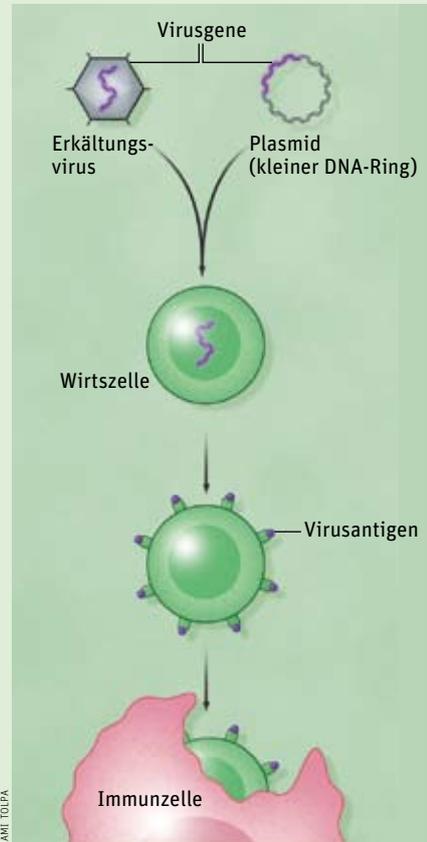
der Ansteckung größer sein dürfte als die Vielfalt sämtlicher Influenzastämme innerhalb eines Jahres auf der ganzen Welt. Ein effektiver HIV-Impfstoff, der auf herkömmliche Weise funktioniert, müsste vor Tausenden, vielleicht gar Hunderttausenden Virusvarianten schützen.

Sicherlich wäre auch langfristig die beste Lösung eine HIV-Vakzine, die jede Ansteckung mit dem Aidsvirus von vornherein verhindert, also Menschen präventiv schützt. Jener ideale Impfstoff der Zukunft müsste Antikörper hervorbringen, die sehr breit gegen alle nur möglichen HIV-Varianten und -Stämme agieren. Die Antikörper müssten so gut funktionieren, dass das Virus erst gar nicht in Körperzellen eindringen kann.



IMPFEN MIT TRICK

Die ideale Vakzine erzeugt ein Immungedächtnis gegen HIV. Für die Scheininfektion werden Virusbestandteile benutzt.



Kandidaten einer Schutzimpfung wären beispielsweise eher harmlose Erreger, in die Virusgene eingebaut wurden. Oder man nimmt so genannte Plasmide. Die Wirtszellen sollen die Fremdkörper aufnehmen und als Antigene vorweisen, damit ein Immungedächtnis entsteht.



Viele Jahre lang glaubten die Forscher, sie könnten siegen, wenn sie Folgendes ausnutzen: Nur dank eines komplexen molekularen Erkennungsmechanismus kann HIV überhaupt T-Helferzellen befallen. Es muss sich mit einem bestimmten seiner Oberflächenproteine an den so genannten CD4-Rezeptor der Helferzellen anlagern und zugleich an einen Korezeptor (zuerst meist CCR5, siehe Kasten S. 57). Das griff die Impfstoffforschung auf. Insbesondere zielte sie auf das erwähnte Oberflächenprotein des Virus, ein Glykoprotein, das einfach Envelope (»Hülle«) getauft wurde. Dieses Protein erweist sich allerdings als noch variabler als die übrigen Virusproteine.

Das Impfmittel AIDSVAX war dafür gedacht, Antikörper gegen das Hüllprotein hervorzubringen. Mit ihm begann 1998 einer der ersten großen HIV-Impfstofftests am Menschen. Doch nach fünf Jahren wurde die Studie abgebrochen. Die erzeugten Antikörper verhinderten nicht die Infektion von T-Helferzellen und schützten somit nicht gegen Ansteckung mit dem Aidsvirus (siehe Kasten S. 61 oben). Bis heute gibt es keinen schlagkräftigen HIV-Impfstoff, der einer Ansteckung vorbeugt.

Fehlschläge mit Erkältungsviren

Als zweitbeste Lösung suchen Forscher deswegen inzwischen auch nach einer Vakzine, die wenigstens die Gefahr stark senkt, dass HIV-Infizierte an Aids erkranken oder andere Personen anstecken. Solch ein Impfstoff müsste die Viruslast von vornherein ganz niedrig halten. Speziell auf das Virus abgerichtete T-Killerzellen müssten bereitstehen, schon die ersten infizierten Zellen zu vernichten, so dass der Erreger sich gar nicht erst heftig vermehrt. So ließe sich der Bestand der T-Helferzellen retten. Geimpfte infizierte Personen könnten das Virus dann auch nicht so leicht an andere weitergeben. Im Normalfall, ohne Therapie, sinkt die Virusmenge nach den ersten Wochen im Median (grob gesagt das statistische Mittel) auf ungefähr 30000 pro Milliliter Blutplasma. Wir wissen aber, dass das Ansteckungsrisiko für HIV-negative Partner beträchtlich geringer ist, wenn die Viruslast unter 1700 liegt. Daran sieht man, dass ein die Infektion eindämmender Impfstoff erstens hohe Maximalwerte verhindern und zweitens die chronische Viruslast sehr viel tiefer lassen sollte als beim natürlichen Verlauf, mindestens unter 1700 Partikeln pro Milliliter Blutplasma.

Eine entscheidende Funktion dabei, die Viruslast niedrig zu halten, haben die T-Killerzellen. Das wissen wir von Untersuchungen HIV-Infizierter sowie Studien an Affen, die

mit dem Primatenpendant des Erregers, SIV, infiziert wurden (S für *simian*, Affe). In seltenen Fällen geschieht es, dass ein Mensch oder Affe die Virusvermehrung von allein stark eingrenzen kann. Anscheinend verdanken das die meisten dieser Individuen bestimmten schützenden Genvarianten für die erwähnten MHC-Moleküle, die zur T-Zell-Aktivierung mit Antigenen dienen. Auch Killerzellen werden durch MHC-Antigen-Komplexe spezifisch angestachelt und ausgerichtet (Kasten links).

Deswegen liebäugelten Forscher mit Vakzinen, die diesen T-Zell-Mechanismus anwenden. Besonders ein von der US-Firma Merck entwickelter Impfstoff weckte Hoffnung. Er bestand aus einem normalen Erkältungsvirus (dem Adenovirus Ad5), in das drei Gene von HIV eingefügt wurden. Das Erkältungsvirus sollte die HIV-Gene in Zellen einschleusen, die dann die Proteine dazu herstellen würden, Gag, Pol und Nef genannt. Das Immunsystem würde nun gegen die Fremdproteine sein Arsenal auffahren, als ob eine HIV-Infektion bestünde. Man hatte dazu Proteine ausgewählt, die sich eher wenig verändern.

Doch die Tests schlugen fehl und wurden darum 2007 abgebrochen (Kasten S. 61 oben). Die provozierten T-Zellen reagierten unerwartet träge, im Mittel nur ein Zehntel bis ein Fünftel so stark wie bei Menschen, die das HI-Virus von selbst gut in Schach halten. Überdies richteten sich die Angriffe nur gegen insgesamt drei Abschnitte der drei Virusgene. Drei bis sechs Abschnitte vom Gag-Protein allein wären normal, wenn jemand durch sein eigenes Immunsystem einigermaßen vor Aids geschützt ist.

War die Wahl des Erkältungsvirus als Genvektor ungünstig? Oder eigneten sich die ausgesuchten Gene nicht so gut? Vielleicht trug beides seinen Teil zum Fehlschlag bei. Viele von uns haben schon Infektionen mit Ad5 durchgemacht. Dann müssten Antikörper vorhanden sein, die verhindern, dass sich das geimpfte Erkältungsvirus nochmals genug vermehrt, um die HIV-Gene in eine größere Anzahl Zellen einzubringen und das Immunsystem dagegen aufzustacheln. Ebenso könnten von früheren Erkältungen herrührende T-Killerzellen dafür sorgen, dass sich erst gar kein oder nur ein viel zu schwacher Impfschutz aufbaut.

Besseren Erfolg versprach zunächst eine Studie an Rhesusaffen mit einem abgeschwächten SIV-Lebendimpfstoff. Bis auf Teile des Nef-Proteins produziert diese Vakzine alle viralen Antigene des Affenvirus. Dieses Impfvirus vermehrt sich in den Tieren, allerdings vergleichsweise langsam. Tatsächlich wa-



MINDEN PICTURES / PETE OXFORD

An Rhesusaffen werden Impfstoffe gegen SIV erprobt, die Primatenversion von HIV, die eng mit dem Aidsvirus verwandt ist.

ren die Affen später vor SIV geschützt, selbst dann, wenn man ihnen ganz andere Virusvarianten verabreichte als für den Impfstoff verwendet. Doch dann kam die Enttäuschung: Nach einigen Jahren hatte das geimpfte Virus den Defekt repariert und wurde aggressiv. Die Nachkommen aus der Vakzine selbst lösten nun eine volle SIV-Infektion mit Immunschwäche aus, an der Affen sterben. Zudem haben sich in einigen Fällen das Impfvirus und Testviren zu einem neuen tödlichen Virusstamm vermischt. Für den Menschen käme ein abgeschwächter Lebendimpfstoff demnach wohl keineswegs in Frage.

Als die erwähnte Merck-Studie mit dem Erkältungsvirus gestoppt wurde, fragten sich viele, ob es einen HIV-Impfstoff mit durchschlagender Wirkung überhaupt geben kann. Es wurde klar, dass auch andere derzeitige Kandidaten neu bewertet werden müssen. Eine große internationale Studie, die im Herbst 2008 beginnen sollte, wurde kurzfristig abgeblasen (wie eingangs erwähnt). In ihr

sollte ein Impfstoff auf DNA-Plasmidbasis (Kasten S. 59 rechts) getestet werden, der von den Nationalen Gesundheitsinstituten der USA entwickelt worden war. Der Direktor des betreffenden Instituts, Antony S. Fauci, ließ verlauten, die Datenlage würde den großen Aufwand nicht rechtfertigen. Als einziger Großversuch läuft zurzeit noch in Thailand eine Studie, deren vorläufige Ergebnisse zumindest auf eine etwas bessere Wirkung hindeuten (Kasten rechts).

Laut Fauci will seine Institution die Forschungsmittel fortan verstärkt in der Grundlagenforschung zum HI-Virus einsetzen. Die Wissenschaftler erhoffen sich davon weitere Erkenntnisse über den Erreger und sein Verhalten im Körper. Hiervon versprechen sie sich ganz neue Ansätze für einen Impfstoff.

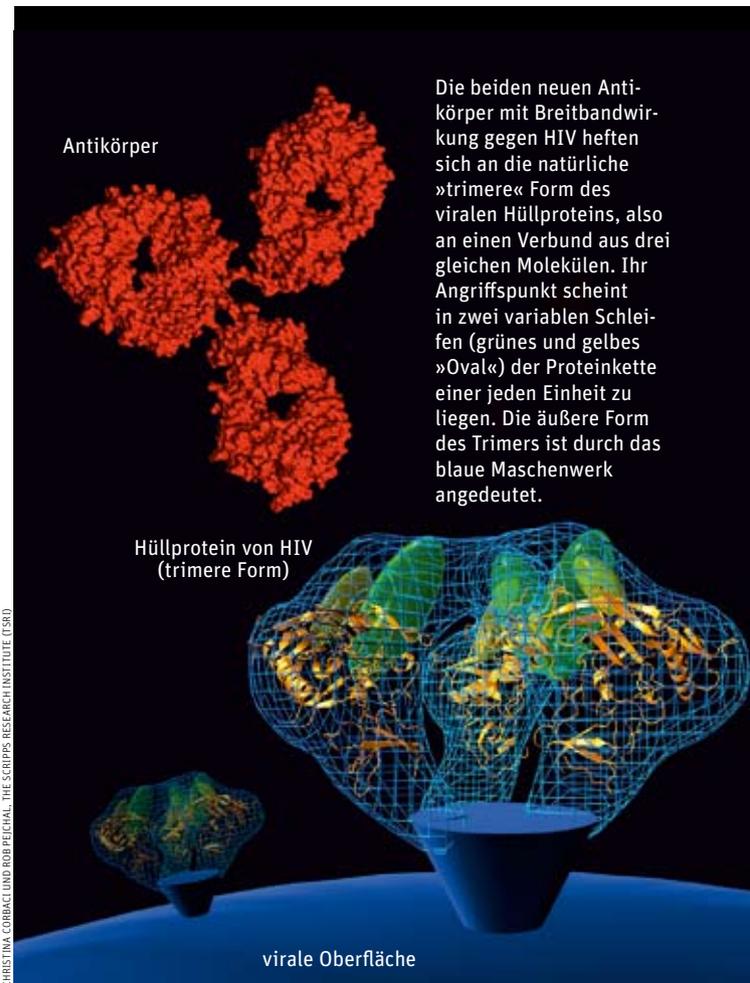
Nach wie vor bildet die enorme Vielfalt der HIV-Varianten die entscheidende Hürde. Denn nicht selten müsste der Impfstoff vor einem Virus schützen, das von der Ausgangsversion, wogegen er entwickelt wurde, bereits

EIN NEUER HOFFUNGSSCHIMMER?

Zwei jüngst entdeckte Antikörper gegen HIV sind einzigartig: Schon in geringer Konzentration neutralisieren sie in Testsystemen verschiedene Stämme des Aidsregers – und sie richten sich gegen Teilstrukturen des viralen Hüllproteins, die einen neuen Ansatz zur Impfstoffentwicklung versprechen.

Die Hindernisse bei der Entwicklung einer Schutzimpfung gegen HIV erscheinen oft unüberwindbar. In den verschiedenen Erdteilen grassieren unterschiedliche Stämme in unzähligen Varianten. Zudem entstehen in jedem HIV-Infizierten immer wieder neue abgewandelte Versionen des Erregers. Allerdings enthält das Hüllprotein, mit dem das Virus an seine Zielmoleküle auf menschlichen Zellen andockt, auch gewisse wenig veränderliche Elemente. Theoretisch sollte es also möglich sein, mit dem Hüllprotein als Impfstoffkomponente auch breit wirkende neutralisierende Antikörper zu erzeugen. Das sind solche, die nicht bloß wenige ähnliche Virusvarianten am Befall der Zellen hindern, sondern ein ganzes Sortiment aus mehr als einen Stamm. Doch bisherige Versuche in diese Richtung verliefen weit gehend enttäuschend.

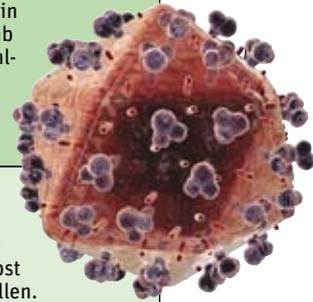
Nicht dass solche Breitband-Antikörper gegen HIV im menschlichen Körper nie entstünden: Eine Hand voll sind seit rund zehn Jahren bekannt. Leider erwiesen sich Breite und Stärke ihrer neutralisierenden Wirkung als meist zu begrenzt, wenn es um Viren ging, die nicht dem Stamm (Subtyp) B angehören. Aber gerade die Nicht-B-Stämme verursachen die Mehrzahl der Infektionen außerhalb von Nordamerika und Europa, vor allem in Entwicklungsländern. Insgesamt ereignen sich 95 Prozent aller Infektionen in der Dritten Welt, so die Internationale Aids-Impfstoff-Initiative IAVI. Nach Schätzungen dieser globalen Non-Profit-Organisation würde schon ein zu 50 Prozent wirksamer Impfstoff, den man 30 Prozent der Bevölkerung verabreichte, die Zahl der Neuinfektionen in Entwicklungsländern binnen 15 Jahren halbieren können.



CHRISTINA CORBACI UND ROBERTO PECHAL, THE SCRIPPS RESEARCH INSTITUTE (TSRI)

Die beiden neuen Antikörper mit Breitbandwirkung gegen HIV heften sich an die natürliche »trimere« Form des viralen Hüllproteins, also an einen Verbund aus drei gleichen Molekülen. Ihr Angriffspunkt scheint in zwei variablen Schleifen (grünes und gelbes »Oval«) der Proteinkette einer jeden Einheit zu liegen. Die äußere Form des Trimers ist durch das blaue Maschenwerk angedeutet.

<p>EIN STEINIGER WEG</p> <p>Erst eine Hand voll potenzieller HIV-Impfstoffe erschien viel versprechend genug, um damit breite Tests durchzuführen. Bisher verhalf jedoch keine dieser Vakzinen, die auf traditionellen Verfahren der Impfstoffentwicklung basieren, zum gewünschten Erfolg. Weder schützten sie vor der Infektion noch verhindern sie, dass infizierte Patienten Aids bekommen. Nun wollen die Forscher sich nochmals verstärkt der Grundlagenforschung zuwenden.</p>	<p>1984</p> <p>Am 23. April verkündete die damalige Gesundheits- und Sozialministerin der USA, man habe ein Virus entdeckt, das wahrscheinlich die neue Krankheit Aids verursacht. Die Ministerin stellte einen Impfstoff gegen HIV binnen zwei Jahren in Aussicht.</p>	<p>Neu gebildete HIV-Partikel lösen sich von der Oberfläche einer T-Helferzelle ab.</p>  <p>WELLCOME IMAGES / R. DOORMASHKIN</p>	<p>1998</p> <p>Als erster potenzieller Impfstoff gegen HIV ging AIDSVAX von der Firma VaxGen in mehreren Ländern in klinische Tests der Phase 3. Er sollte Antikörper gegen das Hüllprotein des Virus induzieren, wirkte aber nicht besser als ein Placebo. 2003 gab die Firma den Fehlschlag bekannt.</p>
<p>2003</p> <p>In Thailand begann eine große Feldstudie, bei der zwei Impfstoffe kombiniert wurden: Der eine sollte die zelluläre Abwehr mittels T-Zellen anregen, der andere Antikörper gegen das HIV-Hüllprotein hervorrufen. Ein vorläufiges Ergebnis wurde Ende September 2009 bekannt: Offenbar sank die Ansteckungsgefahr für geimpfte Teilnehmer um fast ein Drittel. Dieses komplexe Impfschema könnte nach Ansicht einiger Forscher endlich einen Weg zu einem wirklich effektiven Impfstoff weisen.</p>	<p>2004</p> <p>Beginn der STEP-Studie der US-Firma Merck mit einem Impfstoff, der ebenfalls auf eine T-Zell-Reaktion abzielte. Er enthielt das Erkältungsvirus Ad5 sowie drei HIV-Gene. Es gab starke Immunantworten, jedoch steckten sich mehr Geimpfte als Kontrollpersonen mit HIV an. 2007 wurde die Studie abgebrochen.</p>	<p>2008</p> <p>Im Sommer wurde die PAVE-100-Studie der amerikanischen Gesundheitsinstitute abgesagt, die im Herbst desselben Jahres hätte beginnen sollen. Teilnehmer in mehreren Ländern sollten zunächst mit nackter DNA und HIV-Genen, später mit Ad5 und denselben Genen geimpft werden. Kleinere Tests hatten im Vergleich zur Merck-Studie keine deutlichen Unterschiede ergeben. Der Ansatz soll aber in einem kleinerem Studie weiter untersucht werden.</p>	



Wie die IAVI und mit ihr assoziierte Forscher aus dem akademischen und industriellen Bereich kürzlich in der Online-Ausgabe der Fachzeitschrift »Science« berichteten (DOI: 10.1126/science.11787463; 3. 9. 2009), entdeckten sie zwei neue Antikörper mit ungewöhnlich »guten« Eigenschaften: Die beiden Abwehrmoleküle konnten über 70 Prozent der in Zellkulturen getesteten 162 »Virusvarianten« verschiedener Stämme neutralisieren – und das schon bei geringer Konzentration. (Die Forscher arbeiteten dazu stellvertretend mit so genannten Pseudoviren.) Die nötige Konzentration war, gemessen am Median über alle Stämme, immerhin eine ganze Größenordnung kleiner als bei den vier altbekannten Antikörpern, die weithin als breit neutralisierend gelten.

Die beiden neuen Antikörper sind das erste Ergebnis einer groß angelegten Suche. Die klinischen Forschungspartner der IAVI sammelten Blutproben von 1798 HIV-infizierten Freiwilligen in mehreren schwarzafrikanischen Ländern, Thailand, Australien, Großbritannien und den Vereinigten Staaten. Mit einer speziellen Technologie durchmusterte das Unternehmen Monogram Biosciences zusammen mit weiteren Forschern das Blutserum auf dessen Fähigkeit, mit dem darin enthaltenen natürlichen Antikörpergemisch ein Sortiment von Viren zu neutralisieren. Ergebnis: Rund zehn Prozent der Proben waren mittelbreit oder breit wirksam, und ein Prozent entpuppten sich sogar als »Elite-Neutralisierer« (*Journal of Virology* 83(14), S. 7337 – 7348, Juli 2009). Dazu gehörte ein schwarzafrikanischer Spender. Aus seinem Blut wurden für die nun veröffentlichte erste weitere Studie 30 000 Immunzellen durchmustert, um die Quelle für seine besten Antikörper zu finden. Dies erledigte ein Team mit einem Hochdurchsatzverfahren des Unternehmens Theraclone Sciences.

Ohne solche innovativen Verfahren wären die beiden neuen Antikörper den Forschern durch die Lappen gegangen. Die herkömmlichen Tests verwenden freie Komponenten des Hüllprote-

ins als Köder, um relevante Antikörper im Serum zu erkennen. Interessanterweise besetzen die beiden nun entdeckten Antikörper aber das Hüllprotein praktisch nur in seiner natürlichen Konstellation aus drei identischen Molekülen auf dem Virus (siehe Grafik). Durch Mutationsexperimente konnten die Forscher dann erschließen, welche Teilbereiche des Hüllproteins von den beiden breit neutralisierenden Antikörpern wohl erkannt werden: Sie liegen vor allem in so genannten konservierten Bereichen zweier variabler Schleifen der gp120- Untereinheit des Hüllproteins.

Bisherige Breitband-Antikörper richten sich gegen andere Teilbereiche von gp120. Leider erwiesen sich alle Versuche der letzten fünf Jahre als ineffektiv, dem Körper diese Regionen in geeigneter Form als Feindbild zu präsentieren und ihn zur Produktion der entsprechenden breit wirkenden Antikörper zu veranlassen. Weil die neuen Antikörper erheblich potenter sind, könnten sie vermutlich bereits in einer relativ mäßigen Konzentration schützen, wie sie durch Immunisierung erreichbar ist. Wie aber wäre das Immunsystem mit einem nach den neuen Erkenntnissen gestrickten Impfstoff zu »überreden«, sich auf konservierte Bereiche innerhalb variabler Schleifen des Hüllproteins in der natürlichen Dreiergruppe zu konzentrieren? Dies zu erreichen ist noch eines der großen aktuellen Ziele der Impfstoffforschung.

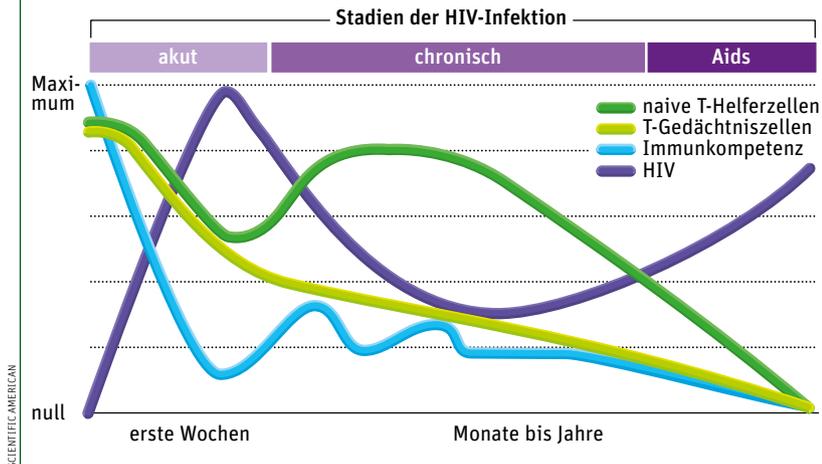
Selbst wenn schützende Antikörper entstehen, hätten sie nur ein enges Zeitfenster, um die HI-Viren bei einer Ansteckung rechtzeitig abzufangen – nämlich, bevor sich die Erreger fest in Zellen einnisten und Unmengen neuer Viren hervorbringen. Dem schwarzafrikanischen Spender (und anderen Elite-Neutralisierern) nutzen seine besonderen Antikörper nicht nennenswert, denn die sind erst allmählich entstanden, nachdem sich die Infektion etabliert hatte.

Inge Hoefler

Die Autorin ist Redakteurin bei »Spektrum der Wissenschaft«.

INFektionsverlauf bis zu AIDS

HIV vernichtet in den ersten drei Wochen nach der Ansteckung beträchtliche Mengen der T-Helferzellen, der Koordinatoren der Immunabwehr. Besonders große Verluste erleidet die Fraktion der Gedächtniszellen. Davon erholt sich die Helferzellpopulation nie mehr richtig. Ließe sie sich durch einen Impfstoff retten, auch wenn der die Infektion nicht zu verhindern vermag, bliebe das Immunsystem viel länger schlagkräftig.



David I. Watkins hat eine Professur für Pathologie an der University of Wisconsin in Madison inne, wo er auch klinisch tätig ist und ein Labor für molekulare Diagnostik leitet. Er untersucht seit Langem HIV und Aids. Außerdem richtete er Studienprojekte für das Affenvirus SIV ein.

Armitage, A. E. et al.: Reflecting on a Quarter Century of HIV Research. In: Nature Immunology 9(8), S. 823–826, August 2008.

Baruch, D. H.: Challenges in the Development of an HIV-1 Vaccine. In: Nature 455, S. 613–619, 2. Oktober 2008.

Fauci, A. S. et al.: HIV Vaccine Research: The Way Forward. In: Science 321, S. 530–532, 25. Juli 2008.

Watkins, D. I.: Basic HIV Vaccine Development. In: Topics in HIV Medicine 16(1), S. 7–8, März/April 2008.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/1006315.

zu mehr als zehn Prozent abweicht. Man betrachte nur das Gen des Hüllproteins Envelope: Wegen seiner hohen Variabilität dient es der Einteilung von HIV in die Gruppen M, N und O, innerhalb derer wiederum Subtypen unterschieden werden. Zwischen diesen Subtypen können bei dem Protein 35 Prozent der Aminosäuren abweichen. Selbst innerhalb eines Subtyps sind es teils 20 Prozent.

Deswegen wird dieses Hüllprotein als Angriffsziel von Impfstoffen nicht mehr so gern benutzt. Stattdessen probieren die Forscher beständigere Virusbestandteile aus, etwa die Proteine Pol und Gag. Allerdings könnten auch da Mutationen auftreten, bei denen der Impfschutz versagt. Unter Umständen macht schon eine einzige ausgetauschte Aminosäure das Immunsystem wieder blind für dieses Protein. Das oberste Ziel einer Aidsimpfung wären in jedem Fall Antikörper mit Breitbandwirkung. Hier geben nun zwei soeben entdeckte solche Antikörper gegen das Hüllprotein neue Hoffnung (siehe Kasten S. 60/61).

Wie kitzelt man Killerzellen?

Auch die Wirkungen von T-Killerzellen müssen wir noch besser verstehen. Diese Immunzellen reagieren auf eine HIV-Infektion in vielerlei Weise. Wir wüssten gern, ob wir mit einem Impfstoff sämtliche dieser Reaktionen herauskitzeln oder verstärken sollten oder ob wir uns besser nur auf einige davon konzentrieren. Provozieren lassen sich die Killerzellen von verschiedenen Bestandteilen des HI-

Virus, genauer gesagt von Aminosäuresequenzen in seinen Proteinen. Auf manche Virusregionen sprechen Killerzellen außerdem öfter an als auf andere. Offensichtlich sind ihre verschiedenen Antworten funktionell nicht gleichwertig, denn manche davon unterdrücken die Virusvermehrung besser. Vielleicht würden ja gerade bestimmte seltene Killerzellreaktionen, die normalerweise bei einer HIV-Infektion im Hintergrund stehen, das Virus besonders gut unter Kontrolle halten. Solches Verhalten müsste ein Impfstoff dann verstärken.

Besonders interessiert die Impfstoffforscher dabei, wieso einzelne Menschen – englisch *elite controller* genannt – von Natur aus mit dem Virus gut zurechtkommen. Woran mag es liegen, dass sich HIV in ihrem Körper nicht oder schlecht weiter vermehrt? Auch bei Affen gibt es Individuen, denen SIV nichts anhaben kann. Auffälligerweise tritt die Hemmung der Virusvermehrung in Erscheinung, wenn die erste akute Infektionsphase abklingt. Was spielt sich speziell in dieser Zeit im Einzelnen ab? Soweit bekannt, tragen manche dieser Individuen Mutationen, die sich fördernd auf die Anzahl oder Funktionsweise von Immunzellen auswirken. Teils erschwert dem Virus in diesen Fällen auch der CCR5-Korezeptor den Zellzugang. Die Wissenschaftler versuchen gegenwärtig, möglichst viele Personen mit derart günstigen Immuneigenschaften zu untersuchen. Von eingehenden genetischen, immunologischen und virologischen Analysen dieses Kreises versprechen sie sich Ideen für neue Impfstoffkonzepte, die sich an Affen testen ließen.

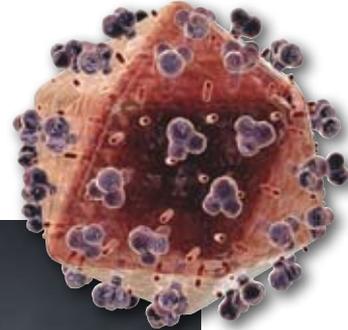
Ebenso wären noch mehr Affenstudien mit Vakzinen aus abgeschwächten, lebenden SIV-Stämmen wertvoll. Zwar kommen entsprechende Impfstoffe beim Menschen wegen der Gefahren vermutlich nie in Frage. Doch die Affen hatten damit immerhin für Jahre einen starken Immunschutz aufgebaut, der sogar gegen vom Ausgangsmaterial deutlich abweichende, hochpathogene SI-Viren funktionierte. Der Grund dafür dürfte aufschlussreich sein.

Neu ist auf unserem Forschungsgebiet, dass sich die einzelnen Wissenschaftlerteams verstärkt austauschen. Viele schließen sich jetzt zu Konsortien zusammen. Unterstützt werden sie von der Bill-&Melinda-Gates-Stiftung, der Internationalen Aids-Vakzine-Initiative und den Nationalen Gesundheitsinstituten der USA.

Wir werden nicht aufgeben. Anfangs hatte niemand geahnt, dass sich dieses Virus als so widerspenstig erweisen würde. Doch auch Forscher können hartnäckig sein. Sie werden dem Aidsreger auf die Schliche kommen. <

Lässt sich eine HIV-**INFEKTION** besiegen?

Eine HIV-Infektion wäre erst dann geheilt, wenn der Erreger auch aus seinen Verstecken im Körper vertrieben werden kann. Noch ist das Ziel fern. Doch die Forscher konzipieren neue Therapien.

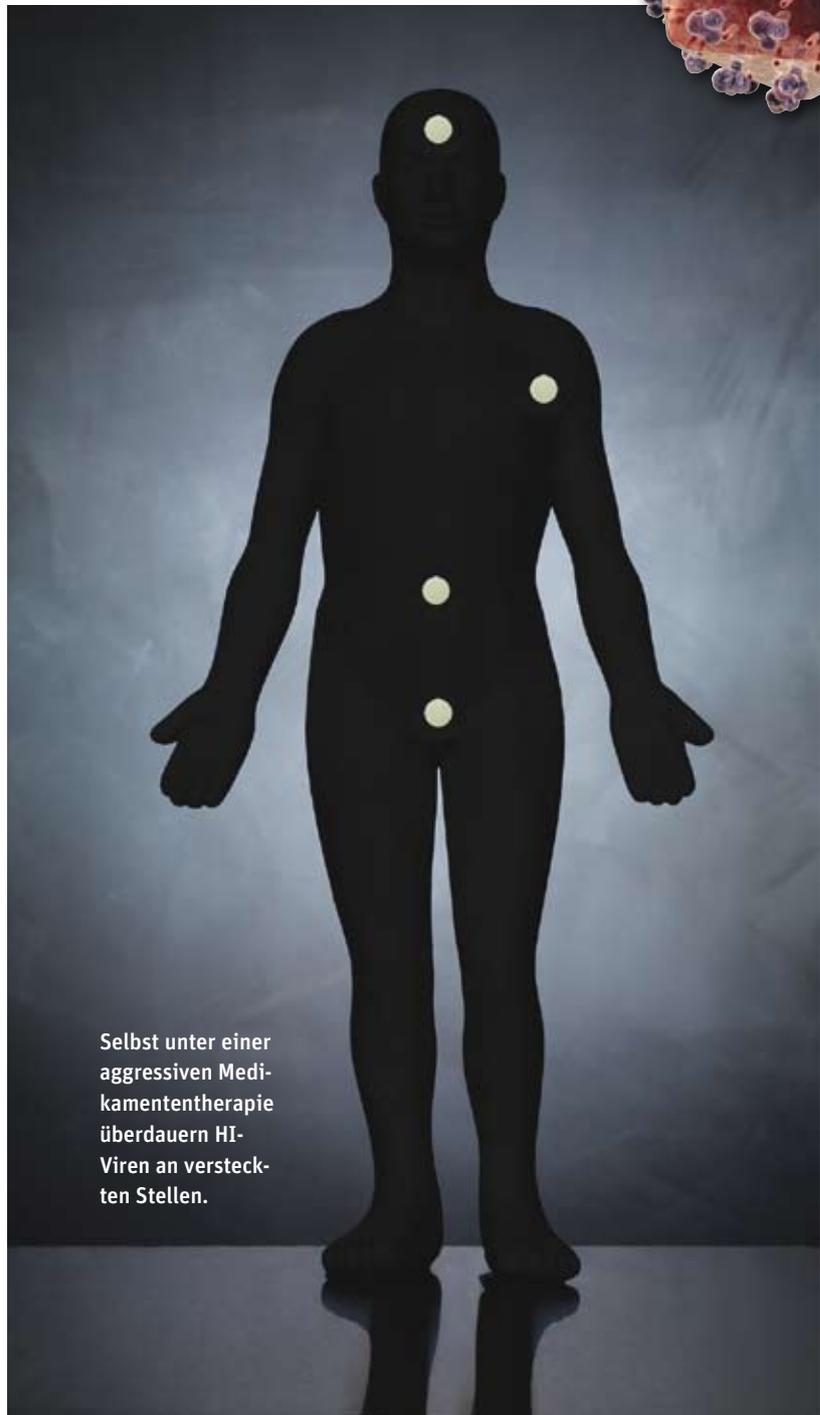


Von Mario Stevenson

Anders als bei Impfstoffen gegen das Aidsvirus verbuchen die Forscher mit Medikamententherapien bei HIV-Infizierten relativ gute Erfolge. Über zwei Dutzend Wirkstoffe sind mittlerweile zur Behandlung zugelassen. In bestimmten, an den Einzelfall angepassten Kombinationen unterbinden sie die weitere Virusvermehrung oft so gut, dass der Erreger mit den üblichen Tests nicht mehr im Blut nachweisbar ist. Die bei solch einer so genannten hochaktiven antiretroviralen Therapie – HAART – verabreichten Arzneicocktails halten den Gesundheitszustand von HIV-Patienten stabil und schenken ihnen viele weitere Lebensjahre. Allerdings bringt die Behandlung keine Heilung, denn die Infektion an sich bleibt bestehen. Falls die Therapie aus irgendwelchen Gründen unterbrochen wird, meldet sich der Erreger rasch wieder zurück.

Dringend möchten die Forscher deswegen herausfinden, wie es dem Aidsvirus wohl gelingt, im Körper zu überdauern – trotz der scharfen Medikamente. Einige Blicke hinter dieses Rätsel waren den Fachleuten in den letzten zehn Jahren schon vergönnt. Ob es jemals möglich sein wird, HIV-Patienten von dem Erreger wieder völlig zu befreien, werden wir wohl nur wissen, wenn wir sein Verhalten wirklich verstehen.

Zunächst: Wie sieht das typische Verhalten von HIV bei einer Infektion aus? Wie alle Viren benötigt der Aidserreger zu seiner Vermehrung Zellen des Körpers. Er befällt sie und missbraucht ihre Synthesemaschinerie für neue Kopien seines Genoms und die Herstellung neuer Proteine (siehe vorherigen Artikel, Kasten S. 57). Daraus entstehen dann neue Viruspartikel oder Virionen, die weitere Zellen infizieren. Doch anders als die meisten anderen menschlichen Viren baut HIV sein Genom fest in das der Wirtszelle ein. Dadurch werden bei jeder Zellteilung auch seine Gene mitkopiert und an die Tochterzellen weiterge-



Selbst unter einer aggressiven Medikamententherapie überdauern HIV-Viren an versteckten Stellen.

ALLE HIV-3D-RENDERINGS: ZYGOTE MEDIA GROUP INC.; BILD UNTEREN: MARK HOOPER

In Kürze

- ▶ Zwar unterdrücken die **modernen Medikamentencocktails** die Viruslast von HIV im Blut bis unter die Nachweisgrenze. Doch das Aidsvirus bleibt im Körper. Es lässt sich so nicht völlig zum Verschwinden bringen – und bricht bei nächster Gelegenheit wieder hervor.
- ▶ Eine **Heilung** würde erfordern, dass die Forscher auch die Verstecke des Virus aufspüren. Wüssten sie mehr darüber, wo und wie es sich verbirgt, könnten sie neue Angriffsstrategien entwickeln. Einige Verstecke sind seit Kurzem bekannt.

geben. Das bedeutet: Solange irgendwelche infizierten Zellen weiterleben oder ihre Abkömmlinge existieren, verschwindet das Virus nicht aus dem Organismus.

Viele andere virale Erreger besiegt das Immunsystem dadurch, dass es befallene Zellen abtötet. Diese erkennt es gewöhnlich ohne Weiteres an den Antigenen, die infizierte Zellen der Körperabwehr an ihrer Oberfläche präsentieren, also an Fragmenten von Virusproteinen. (Zellen pflegen auf die Weise Eindringlinge anzuzeigen.) HIV macht es dem Immunsystem allerdings besonders schwer – schon deswegen, weil dieses vertrackte Virus dessen eigene Zellen befällt, somit Immunkomponenten angreift und dem Untergang weihet. Eine Zeit lang vermag sich der Organismus noch zur Wehr zu setzen. Er bildet neue, gesunde Immunzellen, die das Virus oder auch andere Gefahren erkennen und bekämpfen können. Nur ist das nicht von Dauer. Ohne eine spezielle, fortdauernde Medikamententherapie gewinnen die HI-Viren schließlich doch die Oberhand. Der Patient bekommt Aids, eine schwere Immunschwäche (im vorangehenden Artikel Kasten S. 62).

Die derzeit verabreichten Arzneimittel sorgen augenscheinlich dafür, dass HIV sich zumindest nicht weiter vermehrt und keine neu-

en Zellen befällt. Eigentlich sollte man annehmen, dass die noch gesunden Teile des Immunsystems nun Gelegenheit haben, alle noch infizierten Zellen restlos auszumerzen. Doch das geschieht nicht – wieso?

Heimlich infizierte Zellen

Schuld scheinen großteils Immunzellen zu haben, die nicht mitteilen, dass sie infiziert sind. Sie beherbergen das Viruserbgut und könnten eigentlich neue Viruspartikel produzieren, doch das tun sie nicht. Deswegen merkt das Immunsystem nichts von ihnen. Wie David Watkins im voranstehenden Beitrag erzählt, bevorzugt HIV zur Infektion so genannte T-Helferzellen. Diese speziellen Lymphozyten halten sich vor allem im Verdauungstrakt, in dessen Lymphknoten und Bindegewebe, auf. Des Weiteren kommen sie in anderen Lymphknoten vor sowie im Blut.

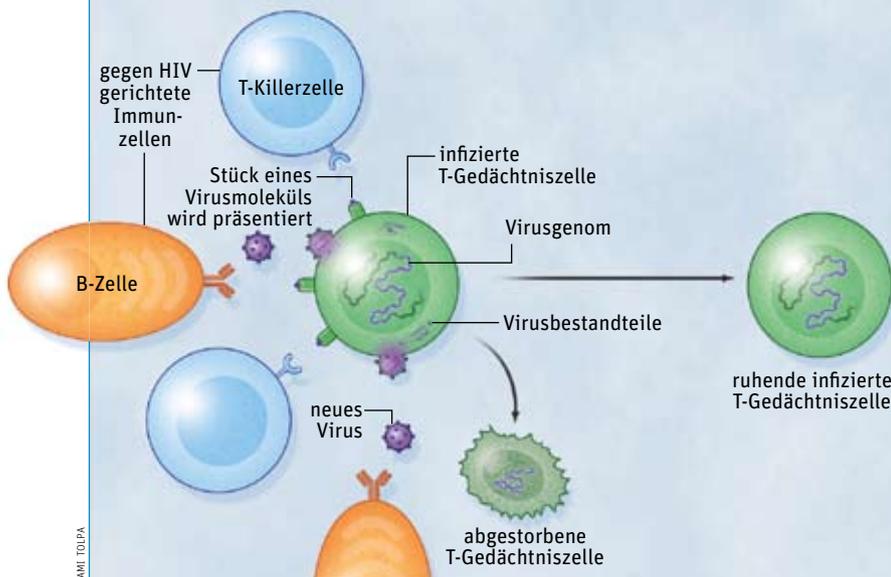
Nachdem eine Infektion bekämpft ist, pflegen nicht mehr benötigte, zuvor massenhaft produzierte T-Helferzellen bis auf einen kleinen Rest abzusterben. Dieser bleibt in Form langlebiger T-Gedächtniszellen erhalten, die bereitstehen, sich bei Anzeichen einer erneuten gleichen Infektion sofort wieder zu vermehren und somit eine Abwehr einzuleiten. Im Fall einer HIV-Infektion nun erzeugen aktivierte, also sich teilende Gedächtniszellen anscheinend den Hauptanteil von neuen Viren. Denn einerseits sind sie geeicht auf den Erreger, der ja weiterhin vorhanden ist, und reagieren, sobald sie auf ihn treffen. Andererseits sind viele von ihnen selbst damit infiziert. Somit stellen sie bei jeder Teilung zugleich neue Viruspartikel her. Die allermeisten dieser infizierten Immunzellen sterben dann entweder am Virus selbst oder durch einen Immunangriff. Ein paar von ihnen bleiben aber übrig und werden wieder zu schlafenden Gedächtniszellen.

Jetzt existiert HIV zunächst (zumindest während der Therapie) nur noch in Form von »stillen« DNA-Sequenzen, integriert in das Genom der ruhenden Immunzellen. Sonst ist nichts zu merken, denn weder wird das Virus kopiert noch treten irgendwelche verräterischen Proteinfragmente als Antigene in Erscheinung. Die Medikamente, die den Erreger unterdrücken sollen und gegen verschiedene Mechanismen seiner Vermehrung und Verbreitung wirken, können den schlafenden Gedächtniszellen nichts anhaben. Und das Immunsystem erkennt diesen verborgenen Feind nicht.

Schon im Jahr 1997 berichteten drei Forscherteams unabhängig voneinander, dass ruhende T-Zellen von HIV-Infizierten keine Aidsviren herstellen, dass sie dies jedoch tun, sobald sie geweckt werden. (Leiter der Teams

VERSTECKT IN IMMUNZELLEN

Wenn die HIV-Last im Blut wieder anwächst, scheint dies hauptsächlich auf T-Gedächtniszellen zurückzugehen, die das Virusgenom tragen. Die meisten solchen Zellen gehen durch die Infektion zu Grunde oder werden von anderen Immunzellen vernichtet, die ihren gefährlichen Inhalt an präsentierten Molekülen erkennen. Doch einige Gedächtniszellen überleben und treten in einen Ruhezustand ein, der jahrelang andauern kann (grüne Zelle rechts). Werden sie wieder reaktiviert, können sie neue Viren herstellen.



waren Robert F. Siliciano von der Johns Hopkins University in Baltimore, Anthony S. Fauci von den Nationalen Gesundheitsinstituten der USA in Bethesda, beides Maryland, sowie Douglas D. Richman von der University of California in San Diego.) Das Phänomen ist an sich nicht ungewöhnlich. Auch eine ganze Reihe anderer Viren versteht sich zu verstecken. Manche produzieren sogar Proteine, die sie dazu anregen. Eines davon ist das Herpesvirus. Beim Aids-erreger würde es angesichts der langen Lebensdauer von T-Gedächtniszellen wahrscheinlich 50 Jahre dauern, bis bei einem Patienten alle infizierten, ruhenden solchen Immunzellen natürlich gestorben sind.

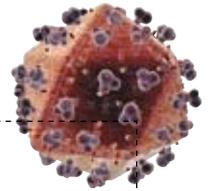
Erste Virusattacke im Darm

Allerdings ist das wohl doch nicht die einzige Quelle für neue Viruspartikel, wenn die Medikamentenbehandlung bei HIV-Infizierten aussetzt. Denn es gibt Anzeichen, dass sogar während der Therapie einige T-Helferzellen und noch andere Zellen weiterhin auf niedrigem Niveau Viren bilden – obwohl die Behandlung gut anzuschlagen scheint und der Erreger dann im Blut nicht nachweisbar ist. Den üblichen Tests entgeht das, so glauben wir, teils weil sich das Virus in Zellen verbirgt, teils weil freikommende Viren nicht im Blut auftauchen, sondern in Geweben bleiben. Hierfür spricht zum Beispiel eine Beobachtung an T-Helferzellen in der Darmwand. Jene Immunzellen nehmen gleich in den ersten Wochen nach einer HIV-Infektion drastisch ab, und zwar noch bevor der Erreger in Bluttests überhaupt auftaucht. Folglich können wir uns vorstellen, dass sich das Virus in manchen Geweben trotz Therapie weiter im Hintergrund vermehrt, ob im Darm oder auch sonstwo. Das kann lange unbemerkt bleiben – bis dann irgendwann größere Virusmengen ins Blut übertreten.

Doch nicht nur die T-Helferzellen gerieten in Verdacht. Auf sie konzentrierte sich bisher die meiste Forschung zum Aidsvirus einfach deswegen, weil sie im Blut vorkommen und deswegen gut zugänglich sind. Erst in jüngerer Zeit stellte sich heraus, dass zur Rückkehr des Virus auch andere Sorten von Immunzellen beitragen können, wenn die Therapie aussetzt oder der Erreger gegen die verabreichten Wirkstoffe resistent wird: so genannte Makrophagen und dendritische Zellen, die ebenfalls von HIV infiziert werden. Über beide Sorten wissen wir in dem Zusammenhang noch nicht besonders viel, denn sie leben ausschließlich in Geweben. Vielleicht hindern die HIV-Medikamente auch diese Zellen nicht vollständig an der Virusvermehrung. Vermutlich bleibt die Anzahl aber zu gering, als dass der Erreger in messbarer Menge

im Blut auftauchen würde. Andererseits könnte die Vermehrung ausreichen, um T-Lymphozyten in der Umgebung zu infizieren. So würde stets ein Bestand an befallenen ruhenden T-Gedächtniszellen aufrechterhalten. Einige infizierte Makrophagen scheinen am Virus nicht zu sterben und auch der Immunüberwachung zu entgehen. Somit würden diese Zellen bereitstehen, die Virusproduktion wieder mit anzukurbeln.

In dem Zusammenhang entdeckten etwa Malcolm A. Martin von den National Institutes of Health und seine Kollegen bei Affen, die mit SIV infiziert waren (das dem menschlichen HI-Virus stark ähnelt), dass die Tiere zwar innerhalb weniger Wochen die meisten ihrer T-Helferzellen eingebüßt hatten, aber trotzdem weiter riesige Mengen an Viren bildeten. Woher kamen die, da doch die bekannte Quelle zunehmend versiegt? Wie sich herausstellte, sorgten die Makrophagen für reichlich Nachschub. Die Affen erhielten dann einen Wirkstoff, der angeblich eine Vermehrung des viralen Erbguts unterbindet und somit auch den Befall neuer Zellen verhindern sollte. Selbst dieser Eingriff senkte die Blutvirusmenge nicht wesentlich. Im Gegensatz zu T-Zellen starben die Makrophagen offenbar nicht, wenn sie neue Viruspartikel ausspielen.



FAKTEN

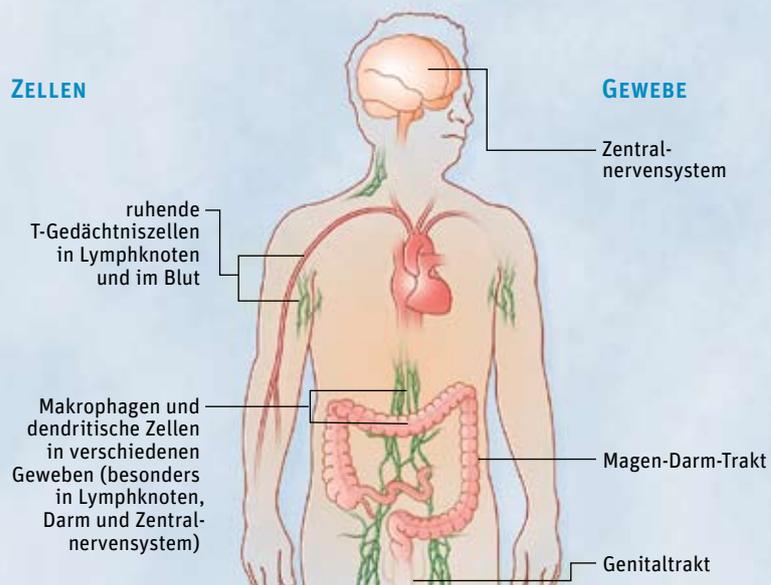
Weltweit sind 33 Millionen Menschen mit HIV infiziert. Täglich stecken sich etwa 7000 Personen damit an, und 6000 sterben an Aids.

► In Deutschland leben über 60 000 HIV-Infizierte. Schätzungsweise 3000 Menschen im Jahr stecken sich derzeit mit dem Aidsvirus an.

► HAART, die hochaktive antiretrovirale Therapie, verlängert das Leben von HIV-Infizierten um durchschnittlich etwas über 13 Jahre. Doch nicht einmal jeder dritte Infizierte auf der Welt erhält solch eine Behandlung.

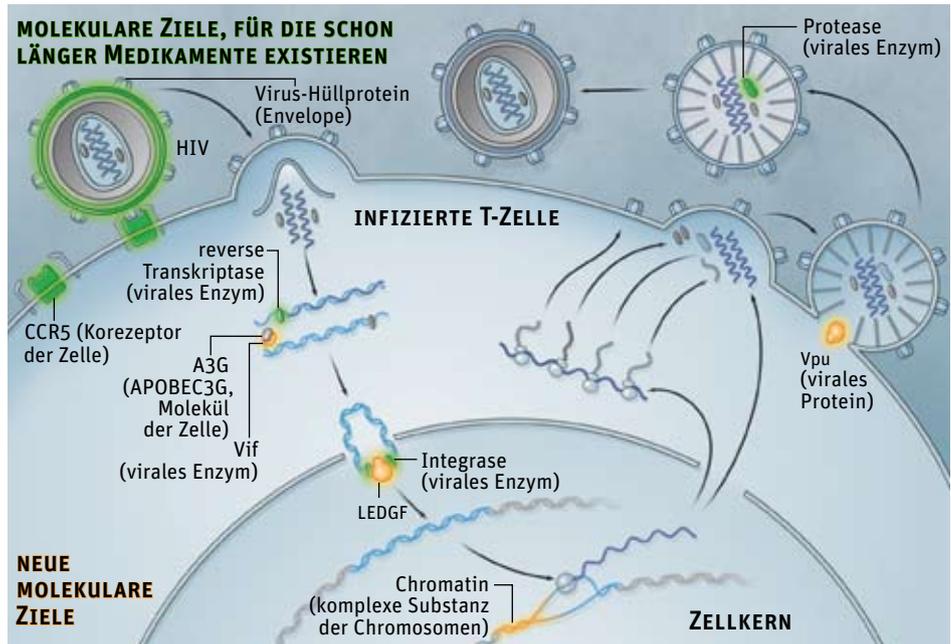
HEIMLICHE AUFENTHALTSORTE

Selbst während HIV in ruhenden T-Gedächtniszellen still verharrt, vermag sich das Virus in einigen anderen Immunzellsorten ein wenig zu vermehren. Das dürfte insbesondere Makrophagen und dendritische Zellen betreffen, die der Immunabwehr und den Medikamenten besser entgehen als T-Zellen. An manchen Orten, etwa im Gehirn, sind betreffende Zellen ohnehin vor beidem recht gut geschützt. Oft bleiben die HIV-Reservoirs lange unbemerkt. Setzt die Therapie aus, kommt von dorthin aber bald Virusnachschub ins Blut.



ANGRIFFSPUNKTE GEGEN DIE VIRUSVERMEHRUNG

Um HIV vollkommen aus dem Körper zu entfernen, müssten all seine Quellen vernichtet werden. Dazu würde unbedingt gehören, ruhende T-Gedächtniszellen zu aktivieren, die das Virus tragen. Außerdem scheint es nötig zu sein, den Zyklus der Virusvermehrung an noch mehr Stellen als bisher abzu-blocken.



NEUE ZIELE FÜR MEDIKAMENTE

Vif (viraler Infektiositätsfaktor): Das Zellprotein A3G schwächt neu gebildete Viren, denn es sorgt für eine gefährlich hohe Mutationsrate. Im Gegenzug setzt HIV sein Protein Vif ein. Das müsste man unterbinden.

LEDGF (Linsenepithel-Wachstumsfaktor): Dieses Zellprotein unterstützt die Integrase dabei, die HIV-DNA ins Zellgenom einzubauen. Offenbar vermehrt sich das Virus schlechter, wenn der Wachstumsfaktor gehemmt wird.

Chromatin (der Komplex aus verschiedenartigen Mole- ...

Die Virusvermehrung durch Makrophagen scheint teils anders abzulaufen als durch T-Zellen. Bei Letzteren sammeln sich die neuen Virusbestandteile unter der Zelloberfläche. Dort umschließt sie die äußere Zellmembran, das Gebilde wird abgeschnürt und kommt nach außen frei (siehe vorangehender Artikel Kasten S. 57). Bei Makrophagen verbleibt ein Teil der neuen Viruspartikel anscheinend in der Zelle und wird dort in membranumhüllten Bläschen, so genannten Vakuolen, zwischengelagert. Erst später wandern diese Bläschen irgendwann zur Zelloberfläche und setzen ihre Fracht frei. Bis dahin dürften sie ein gutes Versteck bieten, denn solange die Zelle keine Virusantigene vorzeigt, schöpft die Immunabwehr keinen Verdacht.

Um die Virusvermehrung durch Makrophagen mit Medikamenten zu hemmen, scheinen überdies höhere Wirkstoffkonzentrationen erforderlich zu sein als für T-Zellen. Die Gründe dafür sind noch unklar. Doch hier könnten Proteine besonders stark agieren, die auch normalerweise Stoffe aus der Zelle herausbefördern. Möglicherweise behindern solche Moleküle eine zureichende Aufnahme der Medikamente. Ähnliches könnte für dendritische Zellen gelten. Über ihr Verhalten im Zusammenhang mit HIV wissen wir allerdings noch sehr wenig.

Zum einen tragen solche Phänomene also dazu bei, dass HI-Viren die Medikamententherapie überleben. Hinzu kommt aber, dass sich manche T-Helferzellen oder Makropha-

gen an Orten befinden, wo die Immunabwehr oder Arzneimittel sie schlecht finden. Zu genau diesen Stellen im Körper müssten wir jedoch gelangen, um HIV-Infektionen auszukurieren.

Ein solcher Schutzraum ist das Zentralnervensystem (ZNS) mit Gehirn und Rückenmark. Dass HIV ins Gehirn eindringt, ist schon lange bekannt. Die neurologischen Komplikationen in späten Aidsstadien gehen vorwiegend auf Neurotoxine zurück, die dort von infizierten Makrophagen freigesetzt werden. Anscheinend können anderswo infizierte Makrophagen die Blut-Hirn-Schranke überwinden. Dort übertragen sie das Virus offenbar auf hirnspezifische Makrophagen, Mikroglia genannt.

Die verabreichten antiviralen Medikamente scheinen dagegen schlecht ins Gehirn vorzudringen, insbesondere so genannte Proteaseinhibitoren, die verhindern, dass neue Viren fertiggestellt werden (siehe Kasten oben). Im Übrigen gelangen auch die meisten Immunzellen nicht dorthin. Noch wissen wir nicht, ob HI-Viren aus dem ZNS ins Blut finden. Doch wenn Makrophagen die Blut-Hirn-Schranke in einer Richtung überwinden können, ist der umgekehrte Weg auch vorstellbar.

Weitere offenbar schwer angreifbare Rückzugsorte für HIV stellen beispielsweise die Wände des Magen-Darm-Trakts dar – sowie die Geschlechtsorgane: Auch dann, wenn im Blut von Patienten keine Erreger mehr nachweisbar sind, enthält ihr Sperma sie doch oft noch in größerer Menge.

Um HIV-Infizierte zu kurieren, müssten unbedingt alle infizierten T-Zellen vernichtet werden, insbesondere auch solche an versteckten Stellen. Unter anderem probieren Mediziner nun, schlafende befallene T-Zellen zu wecken. Sie sollen sich teilen und folglich Virusbestandteile produzieren. Das könnte sie, so die Hoffnung, für antivirale Wirkstoffe empfindlich machen. Die bisherigen Studien in dieser Richtung brachten allerdings recht gemischte Ergebnisse.

Im Idealfall würde man die T-Zellen nur gerade so wenig aktivieren, dass sie ein paar Virusproteine bilden und diese an ihrer Oberfläche präsentieren; komplette Viren würden sie nicht produzieren. Die Forscher erproben dazu Substanzen, die auf den Aktivitätszustand der Chromosomen Einfluss nehmen, indem sie das so genannte Chromatin umorganisieren (das Gesamtmaterial der Chromosomen, die neben DNA unter anderem auch Proteine enthalten). Am besten wäre es, die Synthesemaschinerie gewissermaßen im kleinen Gang freizugeben, die infizierten Zellen aber sonst im Halbschlaf zu lassen. Die würden sich dann dem Immunsystem ausweisen. Falls der Trick allerdings nur bei den T-Zellen wirkt und nicht bei den Makrophagen, wäre der Nutzen begrenzt.

Neue Medikamente in der Pipeline

Ein weiterer Schachzug wäre, sämtliche Virusvervielfältigung zu unterbinden, wodurch der Erreger schließlich insgesamt verschwände. Die lange üblicherweise verordneten Mittel zielten in der Regel auf mindestens eines der folgenden beiden viralen Enzyme: die reverse Transkriptase sowie die Protease. Erstere kopiert das RNA-Genom des Virus in DNA um, so dass diese Erbsequenzen in das Zellgenom eingebaut werden können. Letztere besorgt die Reifung von frischen Viruspartikeln zum infektiösen Erreger (siehe Kasten links). Meistens lässt sich das Virus dann schon nach wenigen Wochen nicht mehr im Blut nachweisen. Und zwar sinkt die Viruslast bei so gut wie allen Erstbehandelten ziemlich gleich schnell. Deswegen glaubten die Mediziner bis vor Kurzem, diese Mittel würden eine neue Virusbildung sogar vollständig verhindern.

Nur – gibt man zusätzlich Raltegravir, ein neueres Medikament, das den Einbau des Virusgenoms ins Zellgenom stört (indem es das Enzym Integrase hemmt), dann verschwinden die Viren aus dem Blut noch schneller. Vermutlich ließe sich also gegen infizierte Zellen rascher und effizienter durchgreifen als früher gedacht. Möglicherweise könnte eine noch intensivere Therapie sogar bewirken, dass erst

gar keine bedrohlich großen Reservoirs infizierter Immunzellen entstehen. Im Idealfall gäbe es so wenig Virusnachschub, dass das Immunsystem diesen vernichten könnte. Dann würde es nach den infizierten Gedächtniszellen sogar noch die allerletzten Verstecke mit gefährlichen Zellen ausmerzen können.

Außer dem erwähnten Integrasehemmer werden weitere neuartige Wirkstoffe, die eine Virusvermehrung verhindern sollen, an Patienten geprüft oder sind teils schon zugelassen. Dazu gehört ein Mittel, das die Bindung des Virus an den Korezeptor CCR5 auf der Zelloberfläche blockiert und den Erreger somit davon abhält, die Zelle zu infizieren (siehe vorangehender Artikel Kasten S. 57). Vermutlich wären noch mehr zelluläre Proteine für Therapiezwecke geeignet. CCR5 gehört dabei zur Fraktion jener Moleküle, die dem Virus nützen. Wir kennen außerdem aber schon Zellproteine, welche den Erreger behindern oder gegen ihn vorgehen.

Zu denen zählt das Protein A3G. Es war die erste solche Substanz, die Forscher fanden. Entdeckt haben sie Michael H. Malim und seine Mitarbeiter vom King's College in London. Makrophagen und Lymphozyten enthalten dieses Protein in Menge. Aber HIV versteht sich zu wehren, und zwar mit dem Protein Vif (viraler Infektiositätsfaktor), der den Abbau von A3G einleitet. Beide Proteine bilden viel versprechende Angriffsziele für Therapien. Könnte man Vif ausschalten oder umgekehrt A3G schützen, müsste das die Zellen eigentlich vor einer HIV-Infektion bewahren.

Letztes Jahr identifizierten zwei Forschergruppen unabhängig voneinander eine weitere zelleigene Substanz, die HIV behindert: das so genannte Tetherin, das die Freisetzung neuer Viruskopien aus der Zelle unterbindet. (Paul D. Bieniasz vom Aaron-Diamond-Aids-Forschungszentrum in New York und John C. Guatelli von der University of California in San Diego waren die leitenden Forscher.) Auch gegen dieses Molekül wehrt sich das Virus: mit seinem Protein Vpu. Ließe sich Vpu blockieren, könnte HIV sich nicht im Körper ausbreiten.

Sicherlich werden die Forscher immer wieder auf neue potenzielle Angriffspunkte für eine HIV-Therapie stoßen. Mit Medikamenten, die gegenwärtige Eingriffsmöglichkeiten ergänzen oder auch verstärken, sollte es schließlich doch gelingen, die Rückzugsorte des Aidsvirus von ihm zu reinigen. Zu dem Zweck laufen bereits größere Tests, in denen die Auswirkungen von derart heftigen Langzeitbehandlungen erfasst werden sollen. Bald werden wir wissen, ob man eine HIV-Infektion kurieren kann. Wir sind zuversichtlich. ◀

»
külen, aus dem die Chromosomen bestehen: insbesondere DNA und Proteine): Wirkstoffe (Chromatin-Remodeler) würden das Chromatin ruhender T-Zellen stellenweise »wecken«, so dass die Zellen HIV-Proteine herstellen. Damit würden sie sich den Abwehrkräften und Medikamenten ausliefern.

Vpu (virales Protein U): HIV-infizierte Zellen könnten neue Viruspartikel an ihrer Oberfläche festhalten (mit dem Protein Tetherin). Das Virus wehrt sich mit seinem Protein Vpu. Dieses müsste man blockieren.



Mario Stevenson hat die David-Freelander-Professur für Aids-Forschung im Programm für Molekulare Medizin an der Medizinischen Fakultät der University of Massachusetts in Worcester inne.

Müller, B., Kräusslich, H.-G.:

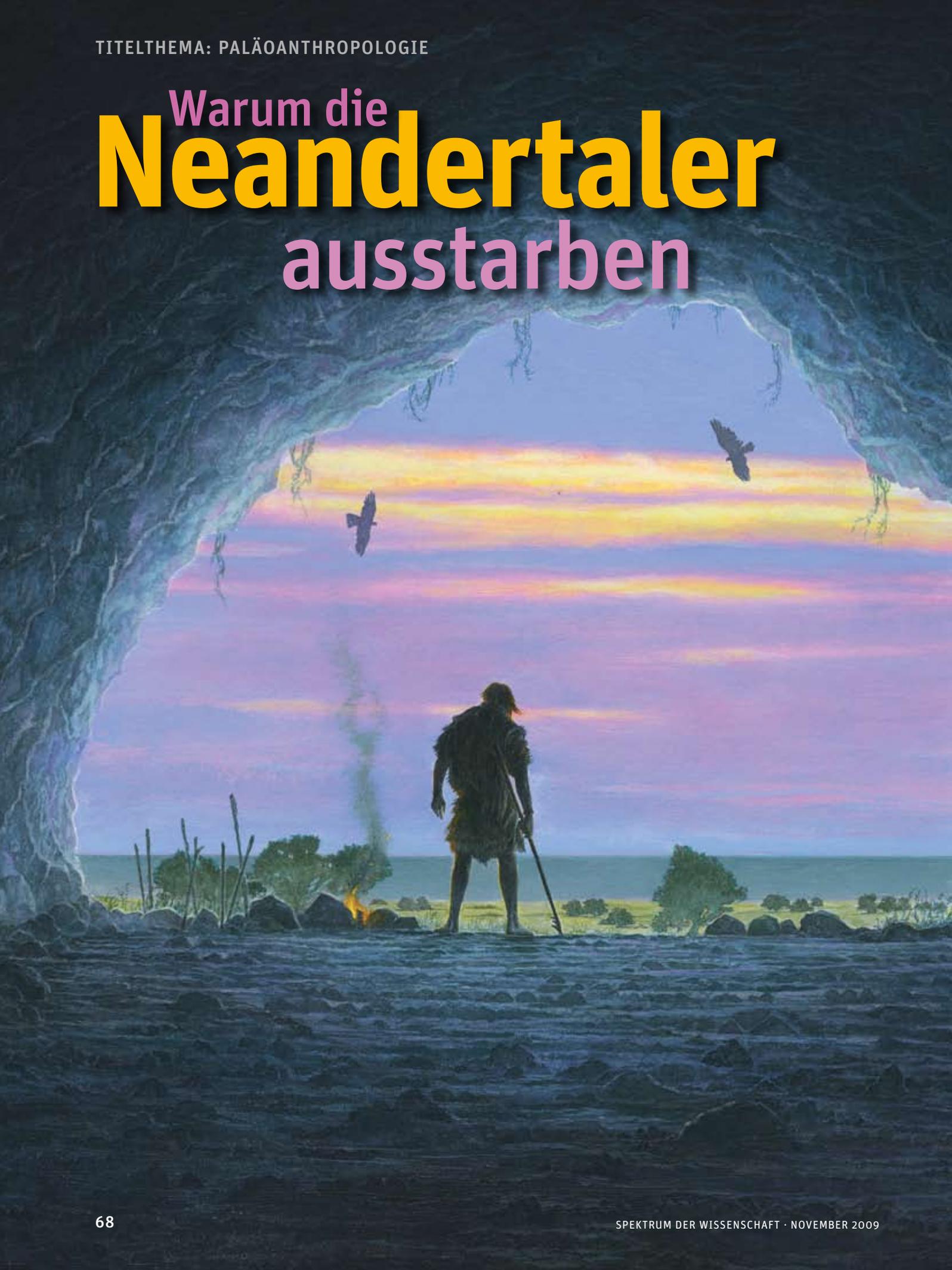
Wettrüsten gegen ein mörderisches Virus. In: Spektrum der Wissenschaft, Dossier 3/2006, Seuchen. S. 72–79.

Murray, J. M. et al.: Antiretroviral Therapy with the Integrase Inhibitor Raltegravir Alters Decay Kinetics of HIV, Significantly Reducing the Second Phase. In: AIDS 21(17), S. 2315–2321, 12. November 2007.

Neil, S. J. D. et al.: Tetherin Inhibits Retrovirus Release and Is Antagonized by HIV-1 Vpu. In: Nature 451, S. 425–430, 24. Januar 2008.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/1006316.

Warum die **Neandertaler** ausstarben



Vom Neandertaler wissen Forscher mehr als von allen anderen ausgestorbenen Menschenarten. Doch noch immer gibt das Verschwinden unserer engsten Verwandten Rätsel auf.

Von Kate Wong

An der Felsküste am Mittelmeer, auf dem Gelände des heutigen Gibraltar, hauste vor rund 28 000 Jahren eine Gruppe von Neandertalern. Möglicherweise waren sie die letzten ihrer Art. Anderswo in Europa und Asien waren die Neandertaler schon Jahrtausende zuvor verschwunden, nachdem sie rund 200 000 Jahre lang die Vorherrschaft innehatten.

Die Iberische Halbinsel mit ihrem vergleichsweise milden Klima und ihrer reichhaltigen Tier- und Pflanzenwelt war die letzte Bastion unserer engsten Verwandten. Wenig später jedoch sollte auch die Restpopulation von Gibraltar aussterben. Als einzige Hinterlassenschaften fanden sich ein paar verstreute Steinwerkzeuge sowie verkohlte Überreste ihrer Lagerfeuer.

Seit 1856, als Arbeiter in einem Steinbruch bei Mettmann das erste Neandertalerfossil entdeckt hatten, diskutieren Wissenschaftler über die Frage, wo diese vorzeitlichen Menschen in unserem Stammbaum stehen. In der Debatte dominierten zwei Theorien. Nach der einen These waren die Neandertaler eine archaische Vorform unserer eigenen Spezies, des *Homo sapiens*, die sich zu der anatomisch modernen, europäischen Form weiterentwickelte oder in ihr aufging. Die andere These betrachtet die Neandertaler als eigenständige Spezies namens *H. neanderthalensis*. Diese wären vom modernen Menschen schnell ausgerottet worden, nachdem jener in das Siedlungsgebiet der archaischen Hominiden eingedrungen war.

Aber von der Frage, ob Neandertaler mit modernen Menschen nun Nachkommen zeugten oder Krieg führten, hat sich die Diskussion in den letzten Jahren entfernt. Dafür gab es zwei Gründe. Erstens lieferte die Analyse von Neandertaler-DNA bisher keine Anhaltspunkte für eine Kreuzung mit dem *Homo sapiens*; eine solche Vermischung hielten viele Fachleute immerhin für möglich, wenn beide Gruppen nennenswerten Kontakt gehabt hätten.

Und zweitens konnte man mit verbesserten Datierungen nachweisen, dass die Neandertaler nicht sofort nach der Besiedelung Europas durch die modernen Menschen verschwanden, die vor etwas mehr als 40 000 Jahren begann.

Die beiden Gruppen lebten danach noch mindestens 15 000 Jahre zumindest nebeneinander her – was nicht gerade für eine schnelle Verdrängung spricht, die sich Anhänger der »Blitzkriegtheorie« ausgemalt hatten.

Solche Erkenntnisse veranlassten eine Reihe von Fachleuten, sich auch mit anderen Einflüssen genauer zu beschäftigen, die zum Aussterben der Neandertaler geführt haben könnten. Ihre Befunde legen nun die Vermutung nahe, dass die Antwort in Wirklichkeit in einem komplizierten Wechselspiel mehrerer Stressfaktoren liegt.

Die aufschlussreichsten Indizien lieferte womöglich die Paläoklimatologie. Wie schon seit einiger Zeit bekannt war, erlebten die Neandertaler während der langen Lebensdauer ihrer Spezies sowohl Eiszeiten als auch mildere Perioden in den dazwischenliegenden Warmphasen. In den letzten Jahren jedoch konnten die Forscher durch Analysen von Isotopen in Eis, Meeressedimenten und Pollen aus Grönland, Venezuela, Italien und anderen Regionen ein detaillierteres Bild dieser Klimaveränderungen zeichnen. Sie ereigneten sich in einer Periode, die als Sauerstoffisotopen-Stadium 3 (*Oxygen Isotope Stage 3*, OIS-3) bezeichnet wird. OIS-3 umfasst die Zeit vor ungefähr 60 000 bis 20 000 Jahren; zu Beginn dieses Zeitraums herrschten noch gemäßigte Klimabedingungen, an seinem Ende dagegen war ganz Nordeuropa mit Eis bedeckt.

Am Anfang von OIS-3 lebten in Europa als einzige Hominiden nur die Neandertaler, am Ende ausschließlich die modernen Menschen. Deshalb fragten sich die Experten, ob die Neandertaler vielleicht wegen der fallenden Temperaturen ausstarben. Vielleicht fanden sie dann keine ausreichende Nahrung mehr, oder sie konnten sich nicht genügend warm halten. Ein solches Szenario hakt jedoch an einem Problem: Die Neandertaler hatten bereits in früheren Phasen Eiszeiten überlebt.

Tatsächlich weisen Biologie und Verhalten dieser Hominiden darauf hin, dass sie an Kälte relativ gut angepasst waren. Ihr tonnenförmiger Brustkorb sowie ihre stämmigen Gliedmaßen konnten Körperwärme ziemlich gut speichern; zum Schutz gegen Kälte benötigten sie allerdings zusätzlich Kleidung aus Tierfellen. Auch der unteretzte Körperbau war offensichtlich daran angepasst, große, relativ so-



In Kürze

► **Die Neandertaler**, unsere engsten Verwandten, dominierten mehr als 200 000 Jahre lang Europa und Westasien. Irgendwann vor rund 28 000 Jahren verschwanden sie.

► **Die Ursachen ihres Aussterbens** sind unter Forschern umstritten. Die neuesten Theorien favorisieren Klimaveränderungen sowie subtile Unterschiede in biologischen Eigenschaften, die den modernen Menschen gegenüber Neandertalern Vorteile verschafften.

litäre Säugetiere aus dem Hinterhalt heraus zu jagen, etwa Wollhaarnashörner, die während der Eiszeiten durch Nord- und Mitteleuropa streiften. (Andere charakteristische Merkmale der Neandertaler wie ausgeprägte Brauenwülste oder die große, ausladende Nase dürften im Hinblick auf die Anpassung neutral gewesen sein: Sie bildeten sich nicht durch Selektion, sondern durch Gendrift heraus.)

Die Isotopenanalysen zeigen aber auch, dass das Klima sich keineswegs stetig von milden zu kalten Temperaturen veränderte; vielmehr wurde es auf dem Weg zur maximalen Vereisung zunehmend instabil und schwankte stark. Diese Oszillationen lösten tief greifende ökologische Veränderungen aus: Die Wälder wichen baumlosen Graslandschaften, Rentiere ersetzten Nashörner. Die Schwankungen vollzogen sich bisweilen so schnell, dass einzelne Individuen sogar im Lauf ihres Lebens beobachten konnten, wie Pflanzen und Tiere, mit denen sie noch aufgewachsen waren, verschwanden und durch eine ihnen unvertraute

Flora und Fauna ersetzt wurden. Ebenso schnell konnte die Umwelt sich auch wieder in die umgekehrte Richtung verändern.

Dieses Auf und Ab der Umweltbedingungen – und nicht zwangsläufig die Kälte als solche – drängte die Populationen der Neandertaler allmählich an einen Punkt, von dem es kein Zurück mehr gab; das jedenfalls besagen Szenarien, wie sie Clive Finlayson vom Gibraltar-Museum postuliert. Der Evolutionsökologe leitete auf der britischen Exklave die Ausgrabungen in mehreren Höhlen. Die Veränderungen hätten erfordert, folgerte Finlayson, dass Neandertaler sich in sehr kurzer Zeit an eine ganz neue Lebensweise anpassten. Ein Beispiel: Sobald Graslandschaften an die Stelle bewaldeter Flächen traten, hätten Jäger, die aus dem Hinterhalt angriffen, plötzlich keine Bäume zum Verstecken mehr. Um zu überleben, hätten die Neandertaler demnach ihre Jagdmethoden ändern müssen.

Fatale Konkurrenz vom *Homo sapiens*

Dass manche Neandertaler sich tatsächlich an die Wandlungen ihrer Welt anpassten, belegen Veränderungen ihrer Werkzeuge und Beutetiere. Dennoch werden viele von ihnen während solcher Schwankungsphasen umgekommen sein, so dass immer stärker zerstückelte Populationen übrig blieben. Sobald die Schwankungen nachließen und nur noch in größeren Abständen auftraten, hätten sich unter normalen Bedingungen diese archaischen Menschen wahrscheinlich wieder vermehren können. Dieses Mal ließen die raschen Veränderungen der Umwelt jedoch nicht genügend Zeit für eine solche Erholung. Am Ende, so vermutet Finlayson, waren die Neandertalpopulationen durch die wiederholten widrigen Klimabedingungen so stark reduziert, dass sie sich nicht mehr halten konnten.

Die Vorstellung, wonach die Hominidenbevölkerung wie in Finlaysons Szenario zerstückelt war, wird auch durch eine genetische Studie bestätigt, die Virginie Fabre und ihre Kollegen von der Université de la Méditerranée in Marseille im April dieses Jahres publizierten. In Untersuchungen an Mitochondrien-DNA von Neandertalern stellten sie fest, dass diese in drei Untergruppen zerfielen: eine in Westeuropa, eine zweite in Südeuropa und die dritte im Westen Asiens; diese Populationen schwankten in ihrer Größe immer wieder.

Nach Ansicht anderer Forscher deutet jedoch die Tatsache, dass die Neandertaler erst nach der Einwanderung der modernen Menschen in Europa verschwanden, eindeutig auf eine Mitwirkung der Eindringlinge hin, auch wenn sie die ansässige Bevölkerung nicht regelrecht umbrachten. Vielleicht mussten die

[HYPOTHESE 1] EIN KLIMAWANDEL VERDAMMTE DIE NEANDERTALER ZUM UNTERGANG

Ungefähr vor 55 000 Jahren setzten in Europa starke Klimaschwankungen ein. Innerhalb weniger Jahrzehnte wurde es mal kalt, mal warm und wieder kalt. Während der Kältephasen rückten die Eiskappen nach Süden vor. In großen Teilen des Verbreitungsgebiets der Neandertaler ersetzte baumlose Tundra die Wälder. Mit diesem Wandel änderte sich für die Hominidenart auch das Angebot an Beutetieren. Früher lagen zwischen den Klimaschwankungen noch lange Zeiträume, so dass sich die Neandertalpopulationen erholen und an die Veränderungen anpassen konnten.

Dieses Mal jedoch variierten die Verhältnisse so rasch, dass keine Erholung mehr möglich war. Vor 30 000 Jahren lebten Neandertaler nur noch in vereinzelt Regionen, insbesondere auf der Iberischen Halbinsel mit ihrem vergleichsweise milden Klima und großen Nahrungsangebot. Aber diese Gruppen waren klein und isoliert, so dass sie sich nicht selbst erhalten konnten. So verschwanden sie schließlich. Die Karte zeigt die Verhältnisse auf dem Maximum der letzten Vereisungsperiode vor rund 20 000 Jahren.



Neandertaler, so sagen die Vertreter dieser Denkschule, mit den neu hinzugekommenen modernen Menschen um Nahrung konkurrieren, wobei sie allmählich immer mehr Terrain verloren. Was aber dem *Homo sapiens* letztlich den entscheidenden Vorteil verschaffte, ist bis heute heftig umstritten.

Eine Vorstellung besagt, die modernen Menschen seien in ihrer Ernährung weniger wählerisch gewesen. Der französische Urgeschichtler Hervé Bocherens von der Universität Tübingen analysierte die chemische Zusammensetzung von Neandertalerknochen und schloss daraus, die Hominiden hätten sich in ihrem Speiseplan auf große Säugetiere spezialisiert, etwa auf die relativ seltenen Wollhaarnashörner. Die frühen modernen Menschen verzehrten dagegen alle möglichen Tiere und Pflanzen. Als unsere direkten Vorfahren nun auf das Gebiet der Neandertaler vordrangen und einen Teil der großen Tiere für sich selbst beanspruchten, wären die Neandertaler – dieser Argumentation zufolge – in Schwierigkeiten geraten. *Homo sapiens* dagegen konnte die erlegten großen Tiere mit kleineren Tieren und pflanzlicher Nahrung ergänzen.

»Die Neandertaler machten alles auf ihre typische Weise, und das war genug, solange sie nicht mit den modernen Menschen in Konkurrenz treten mussten«, erklärt Curtis Marean von der Arizona State University. Unsere Hominidenart, die sich im tropischen Klima Afrikas entwickelt hatte, konnte auch in eine ganz andere Umwelt vordringen und sehr schnell mit neuen Verhältnissen klar kommen. »Der wichtigste Unterschied besteht darin, dass der Neandertaler kognitiv nicht so hoch entwickelt war wie der moderne Mensch«, meint der Archäologe.

Nicht nur Marean nimmt an, dass unsere Vorfahren eher einseitig begabt waren. Nach einer alten Vorstellung waren ihnen die modernen Menschen nicht nur in Werkzeugtechnologie und Überlebensstrategie überlegen, sondern auch mit ihrer Sprachfähigkeit. Gerade diese half *Homo sapiens*, zuverlässige soziale Netzwerke aufzubauen. Die einfältigeren Neandertaler hatten nach dieser Vorstellung gegen die Neuankömmlinge keine Chance.

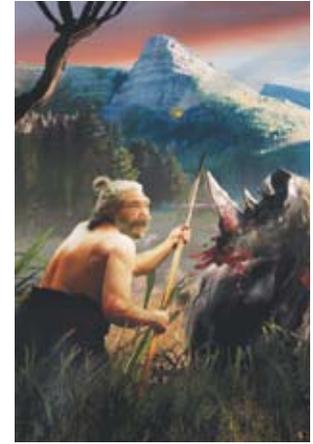
Mittlerweile mehren sich aber Indizien, dass Neandertaler in Wirklichkeit beträchtlich schlauer waren, als man ihnen bislang zugestand. Offensichtlich verfügten sie doch über Verhaltensweisen, die man früher zur ausschließlichen Domäne des modernen Menschen rechnete.

Wie der Paläoanthropologe Christopher B. Stringer vom Natural History Museum in London es formuliert: »Die Grenze zwischen Neandertaler und *Homo sapiens* verschwimmt

WIEDERAUFERSTEHUNG DER NEANDERTALER?

Wissenschaftler unter Leitung von Svante Pääbo vom Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig könnten demnächst ihren Rohentwurf des Neandertalergenoms fertig stellen. Das Projekt gab bereits Anlass zu etwas gewagten Spekulationen, es könne eines Tages gelingen, wieder vorzeitliche Menschen zu erzeugen. Selbst wenn dies technisch gelänge, würde das ethische Fragen aufwerfen: Welche Rechte hätte ein Neandertaler? Wo würde er leben – im Labor, im Zoo oder in einer Wohnung?

Davon einmal abgesehen: Was könnten Wissenschaftler von einem wiederauferstandenen Neandertaler lernen? Antwort: weniger, als man vielleicht glauben würde. Ein Neandertaler, der in unserer modernen Umwelt geboren wird und aufwächst, hätte keine eiszeitlichen Kenntnisse, für die wir uns eigentlich interessieren – woher auch? Weder könnte der Neuerschaffene Moustérien-Werkzeuge herstellen noch Wollhaarmammuts jagen. Er wäre nicht in der Lage, Wissenschaftlern etwas über die Kultur seines Volks zu erzählen. Allerdings würde die Erforschung der biologischen Eigenschaften und der Kognition der Neandertaler möglicherweise neue, bisher unbekannte Unterschiede zwischen diesen archaischen Menschen und uns selbst ans Licht bringen. Aber solchen Fragen soll schließlich auch der DNA-Vergleich nachgehen.



VICTOR DEK

immer mehr.« Dass die Linie zwischen beiden Gruppen zunehmend verwischt, verdankt sich auch den neuen Funden aus Gibraltar. Im September 2008 berichteten Stringer und seine Kollegen über Hinweise, wonach die Neandertaler der Gorham-Höhle und der benachbarten Vanguard-Höhle Delfine und Robben jagten sowie Schalentiere sammelten. Außerdem ernährten sie sich offenbar von Vögeln und Kaninchen. Die Entdeckungen von Gibraltar und weiteren Fundstellen scheinen die hergebrachte Weisheit zu kippen, wonach allein die modernen Menschen Meeres- und andere Kleintiere verspeisten.

Weitere Befunde, welche die Grenzlinie zwischen Neandertaler und Jetztmenschen verschwimmen lassen, stammen von der Fundstätte »Hohle Fels«, einer Höhle auf der Schwäbischen Alb. Der Paläoanthropologe Bruce Hardy vom Kenyon College (US-Bundesstaat Ohio) verglich Werkzeuge von Neandertalern, die vor 40 000 bis 36 000 Jahren in der Höhle wohnten, mit den Produkten moderner Menschen, die an gleicher Stelle vor 36 000 bis 33 000 Jahren unter ähnlichen Klima- und Umweltbedingungen zu Hause waren. Im vergangenen Jahr berichtete Hardy, was seine Analysen der Abnutzungsmuster an Werkzeugen und der damit bearbeiteten Substanzen ergeben hatten: Demnach stellten die modernen Menschen zwar vielfältigere Werkzeuge

Neandertaler waren vermutlich doch erheblich schlauer, als man ihnen bislang zugestand

her als die Neandertaler. Beide Gruppen waren aber im Hohle Fels im Wesentlichen mit den gleichen Tätigkeiten beschäftigt.

Dabei handelte es sich unter anderem um recht raffinierte Arbeiten: So wurden Steinspitzen mit Baumharz an hölzerne Handgriffe gekittet, andere Steinspitzen als Schlag- oder Wurfaffen verwendet, aus Knochen und Holz Gerätschaften fabriziert. Warum hatten die Neandertaler im Hohle Fels dann weniger Werkzeugtypen angefertigt als die später dort lebenden modernen Menschen? Bruce Hardy vermutet, dass sie eben auch ohne solche Gerätschaften zurechtkamen. »Um eine Grapefruit zu essen, braucht man keinen Grapefruitlöffel«, meint der Forscher.

Auch die Behauptung, Neandertaler hätten nicht über eine Sprache verfügt, erscheint im Licht neuer Entdeckungen unwahrscheinlich. Heute wissen die Experten, dass zumindest einige von ihnen ihren Körper mit Schmuck und vermutlich auch mit Farben dekorierten.

Will man Verhaltensweisen auf Grund archäologischer Befunde rekonstruieren, gelten solche physischen Manifestationen symbolhaften Verhaltens häufig als Ausdruck für Sprache. So berichteten im Jahr 2007 Johannes Krause und Kollegen vom Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig, dass Hominiden die gleiche Version des Gens *FOXP2* besitzen, das auch bei uns die Sprachfähigkeit steuert.

Nachdem die Kluft zwischen dem Verhalten von Neandertalern und modernen Menschen also kleiner wird, suchen viele Forscher nach subtileren kulturellen und biologischen Unterschieden, um zu verstehen, warum die Neandertaler ausstarben. »Angesichts immer schlechterer, instabiler Klimabedingungen wurde die Konkurrenz zwischen den diversen Menschengruppen sicher immer härter«, spekuliert die Paläoanthropologin Katerina Harvati, ebenfalls vom MPI in Leipzig. »Unter solchen Umständen sind schon kleine Vorteile von größter Bedeutung und können den Unterschied zwischen Überleben und Aussterben ausmachen.«



Messer

[HYPOTHESE 2] DIE NEANDERTALER WURDEN VOM KLÜGEREN *HOMO SAPIENS* VERDRÄNGT

Früher vermuteten Forscher, dass die Neandertaler von der Bildfläche verschwanden, weil die modernen Menschen intelligenter und deshalb der Konkurrenz überlegen waren. Immer mehr Befunde zeigen jedoch, dass unsere archaischen Verwandten etliche anspruchsvolle Verhaltensweisen beherrschten, die früher ausschließlich dem *Homo sapiens* zugeschrieben wurden (siehe Tabelle). Zumindest manche Neandertaler waren vermutlich zum symbolischen Denken in der Lage – und verfügten demnach womöglich auch über eine Sprache. Außerdem hatten sie Werkzeuge sowie Kenntnisse, um ein breites Spektrum von Nahrungsmitteln zu nutzen. Dennoch waren solche Tätigkeiten in der Kultur des *Homo sapiens* anscheinend stärker verankert als bei Neandertalern.



Zahnanhänger



Knochennähle



Robbenkiefer

INDIZIEN FÜR MODERNES VERHALTEN BEI NEANDERTALERN

MERKMAL	häufig	gelegentlich	fehlt	unsicher
Kunst				✓
Farben	✓			
rituelle Bestattungen		✓		
Schmuck				✓
Handel über große Distanzen				✓
Mikrolithe		✓		
Pfeilspitzen			✓	
Knochenwerkzeuge		✓		
Klingen		✓		
Nadeln			✓	
Nutzung des Meeres		✓		
Vogeljagd		✓		
Arbeitsteilung			✓	

Frauen und Kinder jagten mit

Stringer vertritt seinerseits die Theorie, dass der *Homo sapiens* mit seiner weiter gefassten kulturellen Anpassungsfähigkeit etwas besser gegen schlechte Zeiten gewappnet war. Die modernen Menschen hinterließen beispielsweise Nadeln – ein Indiz, dass sie über genähte Kleidungsstücke und Zelte verfügten, die mehr Schutz gegen Kälte boten. Von den Neandertalern kennt man keine Funde, die auf Nahrungsmitteln hindeuten; ihre Kleidung und Unterkünfte dürften also nach heutiger Kenntnis gröber gestaltet gewesen sein.

Vermutlich teilten die Neandertaler auch Arbeiten anders unter sich auf als die Jetztmenschen. In einem Artikel von 2006 in »Current Anthropology« behaupteten Steven L. Kuhn und Mary C. Stiner von der University of Arizona, dass die vielseitige Ernährung der ersten modernen Menschen, die nach Europa gelangten, eine bestimmte Form der Arbeitsteilung begünstigte: Männer jagten größere Tiere, Frauen sammelten Nüsse, Samen und Beeren. Die Neandertaler dagegen konzentrierten sich allein auf größere Tiere. Das bedeutete, dass auch Frauen und Kinder sich an der Jagd beteiligen mussten – möglicherweise trieben sie die Tiere in Richtung der wartenden Männer. Da *Homo sapiens* seine Kinder offenbar besser ernähren und schützen konnte, sind ihre Populationen auf Kosten der Neandertaler angewachsen. Denn egal, wie die Neandertaler sich ihre Nahrung besorgten: Sie brauchten viel davon. »Sie wa-

UNTERKIEFER: MIT FRIEDL. GEN. VON CLIVE FINLAYSON; GIBRALTAR MUSEUM; ÜBRIGE ARTIFAKTE: LABORATOIRE D'ETHNOLOGIE PRÉHISTORIQUE, UNIVERSITÉ PARIS



ren die Benzinschlucker in der Welt der Hominiden«, meint die Paläoanthropologin Leslie Aiello von der Wenner-Gren Foundation in New York.

Eine Expertin für den Energiehaushalt der Hominiden ist Karen Steudel-Numbers von der University of Wisconsin-Madison. Nach ihren Untersuchungen benötigten die Neandertaler beispielsweise für die Fortbewegung 32 Prozent mehr Energie als anatomisch moderne Menschen. Der Grund liegt in dem stämmigen und gedrungenen Körperbau der archaischen Hominiden.

Der tägliche Energiebedarf der Neandertaler dürfte um 100 bis 350 Kalorien über dem von modernen Menschen gelegen haben, die im gleichen Klima lebten. Das jedenfalls besagt ein Modell, das Andrew W. Froehle von der University of California in San Diego und Steven E. Churchill von der Duke University entwickelten. Nach der Analyse der beiden Anthropologen war *Homo sapiens* dem Neandertaler einfach deshalb überlegen, weil er seine Nahrung effizienter nutzte: Für grundlegende Lebensfunktionen verbrauchte er weniger Energie und konnte deshalb mehr für andere Aufgaben einsetzen: Fortpflanzung und Sicherung des Nachwuchses.

Erwähnenswert ist noch ein zweiter Unterschied zwischen den Neandertalern und uns. Wie Rachel Caspari von der Central Michigan University zeigen konnte, schoss die Zahl der modernen Menschen, die alt wurden und Enkel hatten, vor etwa 30 000 Jahren steil in die Höhe. Worauf dieser Anstieg der Lebenserwartung zurückzuführen war, ist nicht im Einzelnen geklärt, aber der Wandel hatte zwei wichtige Auswirkungen.

Erstens waren dadurch die Menschen über längere Lebensjahre fortpflanzungsfähig, was ihre Fruchtbarkeit begünstigte. Und zweitens hatten sie mehr Zeit, um Spezialkenntnisse zu erwerben und an die nächste Generation weiterzugeben. So konnten sie beispielsweise ihrem Klan vermitteln, wo man auch bei Dürre noch Wasser findet. »Eine längere Lebensdauer schafft das Potenzial für größere soziale

Netzwerke und einen größeren Wissensfundus«, erklärt der Paläoanthropologe Christopher B. Stringer. Bei den kurzlebigeren Neandertalern dagegen, so seine Vermutung, gingen Kenntnisse häufig wieder verloren.

Weitere Anhaltspunkte in der Frage, warum die Neandertaler verschwanden, könnten sich aus Genomanalysen ergeben; die vollständige DNA-Sequenz durch die Svante-Pääbo-Gruppe in Leipzig könnte demnächst vorliegen. Dennoch werden Detailfragen noch etwas länger brauchen. So weiß man bisher über die funktionelle Bedeutung der meisten Genomabschnitte selbst beim modernen Menschen nur sehr wenig, vom Neandertalergenom ganz zu schweigen. »Wir sind noch weit davon entfernt, lesen zu können, was das Neandertalergenom aussagt«, sagt Stringer. Immerhin könnte eine Analyse die Unterschiede in Stoffwechsel und Kognition aufklären. Auch sind alle gespannt, ob wir Spuren von Neandertalererbgut in uns tragen.

Bis zur Auflösung dieses Steinzeitkrimis ist es noch ein weiter Weg. Aber die Forscher gelangen immer wieder zu der gleichen Erkenntnis: Egal, ob Klima, die Konkurrenz mit dem *Homo sapiens* oder eine Kombination beider Faktoren den Ausschlag für den Untergang der Neandertaler gab – im Einzelnen spielten jeweils unterschiedliche Faktoren eine Rolle beim Aussterben der verschiedenen Populationen dieser nächsten Verwandten im Stammbaum des Menschen. In manchen Fällen könnten Krankheiten die Ursache gewesen sein, in anderen lag es vielleicht an Inzucht. »Wahrscheinlich erzählt jedes Tal seine eigene Geschichte«, sagt Clive Finlayson.

Und was die letzten bekannten Neandertaler angeht, die noch vor 28 000 Jahren in den Höhlen an der Küste Gibraltars lebten, so ist sich Finlayson sicher, dass sie mit *Homo sapiens* keine Probleme hatten. Denn moderne Menschen ließen sich an der Südspitze der Iberischen Halbinsel erst nieder, als die Neandertaler dort schon seit einigen Jahrtausenden verschwunden waren. Der Rest ihrer Geschichte harret noch der Aufklärung. ◀

Vielleicht die letzte Bastion der Neandertaler: Höhlen an der Küste von Gibraltar. Hier lebten die archaischen Hominiden noch vor 28 000 Jahren. Gibraltar und die ganze Iberische Halbinsel hatten damals im Vergleich zu großen Teilen des eiszeitlichen Europa ein mildes Klima und üppige Nahrungsressourcen.



Kate Wong ist leitende Redakteurin bei »Scientific American« Online.

Finlayson, C.: *The Humans Who Went Extinct – Why Neanderthals Died Out and We Survived.* Oxford University Press 2009.

Froehle, A. W., Churchill, S. E.: *Energetic Competition Between Neanderthals and Anatomically Modern Humans.* In: *PaleoAnthropology*, S. 96–116, 2009.

Stringer, C. B. et al.: *Neanderthal Exploitation of Marine Mammals in Gibraltar.* In: *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* 105(38), S. 14319–14324, 2008.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/1006318.

KNOBELEIEN

Die cleveren Bremer Grashüpfer

Die Aufgaben der Internationalen Mathematik-Olympiade wirken sehr schwierig, haben jedoch oft verblüffend einfache Lösungen. Gastgeber der 50. Olympiade war die Jacobs University Bremen.

Von Holger Dambeck

Mathematische Probleme haben eine gewisse Heimtücke. Man sieht ihnen nicht auf den ersten Blick an, wie schwer sie sind. Das krassste Beispiel ist sicherlich die berühmte fermatsche Vermutung: Sie ist einfach zu formulieren; dennoch haben sich die größten Geister 350 Jahre lang an ihr die Zähne ausgebissen, und die Lösung, die Andrew Wiles 1994 gefunden hat, auch nur nachzuvollziehen erfordert intensive Vorbereitung und viel Mühe.

Bei den Internationalen Mathematik-Olympiaden (IMO) bekommen die Schüler an zwei Tagen je drei Aufgaben gestellt, die zunächst nicht wesentlich anders wirken als Fermats Vermutung. Da gehört zu den besonderen Herausforderungen, den Schwierigkeitsgrad der Aufgabe einzuschätzen: Lohnt es, in diese eine Auf-

gabe Schweiß und Mühe zu investieren und dafür eine andere liegen zu lassen? Schließlich hat man an jedem der beiden Tage nur viereinhalb Stunden Zeit.

Aber so schlimm wie bei dem berühmten Problem wird es bestimmt nicht. Die mehr als 550 Teilnehmer wissen genau: Jede der sechs Aufgaben ist zu schaffen. Und wer Glück hat, findet sogar einen Lösungsweg, der auf ein einziges Blatt Papier passt.

Die Mathematik-Olympiaden haben eine lange Tradition (Spektrum der Wissenschaft 4/2006, S. 84). Der Wettbewerb wandert über die Jahre um die Welt; die 50. IMO fand im Juli dieses Jahres an der Jacobs University in Bremen statt. Da haben sich mit der Zeit Bräuche eingespielt. Zum Beispiel der, dass sich Vertreter fast aller Länder schon Tage vor den Klausuren treffen, um aus Dutzenden Vorschlägen jene sechs Auf-

gaben auszusuchen, welche die Schüler lösen müssen.

»Für jedes auf der IMO gestellte Problem sollte eine übersichtliche, klar strukturierte Lösung existieren«, sagt Elias Wegert aus dem sächsischen Freiberg. Der Mathematikprofessor denkt sich selbst immer wieder verzwickte Knobelaufgaben für Mathe-Olympiaden aus. In Bremen gehörte er zum Kreis der so genannten Koordinatoren, welche die Lösungen der IMO-Teilnehmer bewerten. Bis zu sieben Punkte sind pro Aufgabe zu vergeben. Wegert hat sich ausschließlich um die Aufgabe 1 gekümmert, die traditionell die leichteste ist.

Dass am ersten Klausurtag stets ein einfaches Problem dabei ist, hat auch psychologische Gründe. »Niemand sollte mit null Punkten nach Hause fahren«, sagt Wegert. Das passiert allerdings trotzdem, denn nicht in allen der über 100

DIE AUFGABE 1 DER IMO 2009

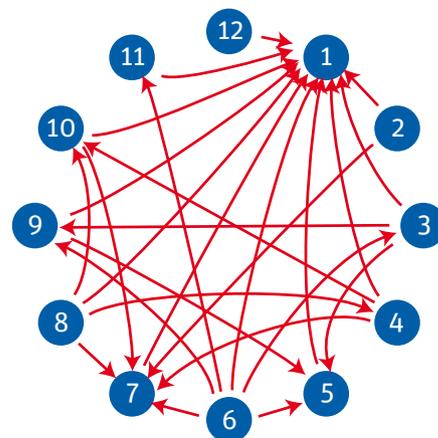
In der ursprünglich eingereichten Problemvariante geht es um einen Klub mit n Mitgliedern, die fortlaufende Mitgliedsnummern von 1 bis n haben und sich gern gegenseitig Geschenke machen. Manches Präsent wird jedoch nur weitergegeben, weil es so hässlich ist. Um die peinliche Situation zu verhindern, dass ein Mitglied eines Tages ein von ihm stammendes Geschenk zurückerhält, hat der Klub folgende Regel aufgestellt: Das Mitglied mit der Nummer a darf dem Mitglied mit der Nummer b nur dann ein Geschenk machen, wenn das Produkt $a(b-1)$ durch n teilbar

ist. Beweise, dass diese Regel tatsächlich den gewünschten Effekt hat.

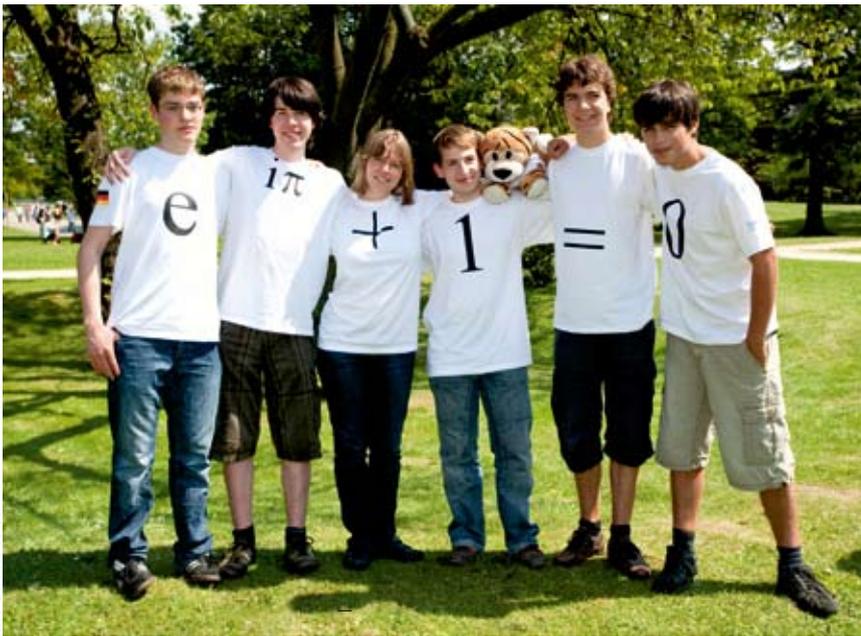
Es gibt mehrere Lösungsvarianten. Die hier vorgestellte besteht aus zwei Teilen. Zunächst zeigen wir, dass in jeder Geschenkkette $a \rightarrow b \rightarrow c$ auch a direkt an c schenken kann. Im zweiten Schritt wird bewiesen, dass zwei Personen sich nicht gegenseitig beschenken können, ohne gegen die Regel zu verstoßen.

Wenn a an b schenkt und b an c , dann gilt Folgendes:

$$\begin{aligned} n &\text{ teilt } a(b-1) \\ n &\text{ teilt } b(c-1) \end{aligned}$$



CHRISTOPH PÖPPE



Das deutsche Team der Internationalen Mathematik-Olympiade 2009. Von links nach rechts: Christoph Kröner, Malte Lackmann, Lisa Saueremann, Martin Merker mit dem Mannschaftsmaskottchen, der »Mathematigerin«, Jens Reinhold und Bertram Arnold

Länder, die Teams zur IMO nach Bremen geschickt haben, werden Mathetalente so gezielt gesucht und gefördert wie in Russland, China oder Deutschland.

Die Idee zur diesjährigen ersten Aufgabe hatte der Australier Ross Atkins, im Jahr 2003 noch selbst IMO-Teilnehmer. Atkins berichtete von einem seltsamen Klub, in dem sich die Mitglieder hässliche Dinge untereinander immer weiter-schenken. Die Aufgabe bestand darin, zu beweisen, dass eine mathematische Regel tatsächlich verhindert, dass ein Klubmitglied eines Tages das von ihm einst verschenkte Präsent wieder zurückgeschenkt bekommt (Kasten unten).

Mehr als die Hälfte der IMO-Teilnehmer löste das Geschenkproblem vollständig und bekam die volle Punktzahl. »Die Aufgabe 1 war als leichteste Lösung gedacht – und war tatsächlich sehr leicht«, sagt Wegert. »Noch leichter kann

man es kaum machen.« Spitzenleute könnten derartige Probleme in kürzester Zeit lösen und sich den schwereren Aufgaben widmen.

So wollte es auch Lisa Saueremann aus Dresden halten. Die 16-Jährige war die Top-Favoritin im deutschen Team, hatte sie doch schon ein Jahr zuvor bei der IMO eine Goldmedaille geholt, weil sie unter die ersten 50 gekommen war. Allerdings bereitete ihr das Geschenkproblem unerwartete Schwierigkeiten. »Die Aufgabe 1 ging nicht so schnell, weil ich etwas nervös war«, erinnert sie sich. Sie habe sogar einen kleinen Fehler gemacht, der ihr erst später, nach dem Lösen der zweiten Aufgabe, aufgefallen sei. »So was passiert.«

Von einem ganz anderen Kaliber war freilich die Aufgabe 6 – die letzte am zweiten Klausurtag. Sie fungiert bei der IMO traditionell als eine Art Scharfrich-

ter. Meist finden nur wenige Spitztalente unter den ohnehin schon außerordentlich begabten Schülern eine Lösung. In diesem Jahr schafften lediglich drei Teilnehmer die volle Punktzahl, darunter auch Lisa Saueremann. »Aufgabe 6 war richtig spannend und hat die Spitze sehr gut differenziert«, sagt Elias Wegert. Es habe sich um »eine der schwersten schweren Aufgaben« der letzten Jahre gehandelt.

Das Problem ist kurz und prägnant formuliert und leicht zu verstehen – genau so, wie es sich die IMO-Organisatoren wünschen:

Es seien n eine positive ganze Zahl, a_1, a_2, \dots, a_n paarweise verschiedene positive ganze Zahlen und M eine Menge von $n-1$ positiven ganzen Zahlen, die nicht die Summe $s = a_1 + a_2 + \dots + a_n$ als Element enthält. Ein Grashüpfer springt längs der reellen Zahlengerade. Er startet im Nullpunkt und vollführt n Sprünge nach rechts mit Längen a_1, a_2, \dots, a_n in beliebiger Reihenfolge. Man zeige, dass der Grashüpfer seine Sprünge so anordnen kann, dass er nie auf einem Punkt aus M landet.

Man kann die Aufgabe auch als ein Spiel zwischen dem Grashüpfer und einem böswilligen Gegenspieler verste-

Die erste Gleichung besagt, dass alle Primfaktoren von n , die nicht in a stecken, in $b-1$ stecken müssen. Da b und $b-1$ keinen gemeinsamen Teiler außer 1 besitzen

Das Beispiel eines Klubs mit 12 Mitgliedern offenbart, dass die Klubregel auf eine krasse Ungleichbehandlung hinausläuft. Mitglied 12 bekommt nie etwas, während Mitglied 1 von jedem anderen etwas annehmen (und auf ewig behalten) muss. Das Diagramm enthält keinen geschlossenen Rundweg in Richtung der Pfeile.

(»teilerfremd« sind), folgt aus der zweiten Gleichung, dass diese Primfaktoren von $b-1$ alle auch in $c-1$ stecken müssen. Daraus folgt sofort, dass $a(c-1)$ durch n teilbar ist.

In einer laut Klubregel erlaubten Geschenkette $a_1 \rightarrow a_2 \rightarrow a_3 \rightarrow \dots \rightarrow a_n$ kann Mitglied a_1 deshalb auch direkt an a_n schenken, ohne dass gegen die Regel verstoßen wird. Es muss also gelten:

$$n \text{ teilt } a_1(a_n - 1)$$

Nun ist die Frage: Teilt n auch $a_n(a_1 - 1)$? Das heißt, könnte Mitglied a_n das hässliche Präsent wieder an den ursprünglichen Besitzer zurückschenken?

Dies geht nicht, und der Beweis wird indirekt geführt. Angenommen, das Zurückschenken sei möglich. Dann muss gelten:

$$n \text{ teilt } a_1(a_n - 1) \text{ und } n \text{ teilt } a_n(a_1 - 1)$$

Daraus ergibt sich sofort, dass n auch die Differenz $a_1(a_n - 1) - a_n(a_1 - 1)$ teilen muss (wir nehmen dabei an, dass $a_n > a_1$ sein soll). Also gilt:

$$n \text{ teilt } a_n - a_1$$

Das ist jedoch nicht möglich, da sowohl a_n als auch a_1 kleiner als n sind, mithin auch ihre Differenz kleiner als n ist. Aus diesem Widerspruch folgt, dass die Annahme falsch ist.

DAS GRASHÜPFERPROBLEM

Wir gehen davon aus, dass für n Sprünge und $n - 1$ Minen sowie für $n - 1$ Sprünge und $n - 2$ Minen jeweils eine Lösung existiert, und erweitern diese Lösung auf den Fall $n + 1$. Wir wissen, dass der Grashüpfer in den Fällen $n = 1$ (ein Sprung, keine Mine) und $n = 2$ (zwei Sprünge, eine Mine) problemlos ans Ziel kommt. Damit kann die Induktion beginnen.

Der Trick ist, mit dem längsten der $n + 1$ Sprünge am Nullpunkt zu beginnen und zu schauen, was dabei alles schiefgehen kann. Jeder dieser Fälle wird einzeln diskutiert – und am Ende werden wir feststellen, dass der Grashüpfer tatsächlich stets sicher ans Ziel kommt.

Fall 1: Der längste Sprung landet auf einem freien Feld und überspringt dabei mindestens eine Mine.

Dann müssen bei den verbleibenden n Sprüngen noch höchstens $n - 1$ Minen bewältigt werden. Das ist laut Induktionsannahme möglich. Dieser – einfachste – Fall ist damit gelöst.

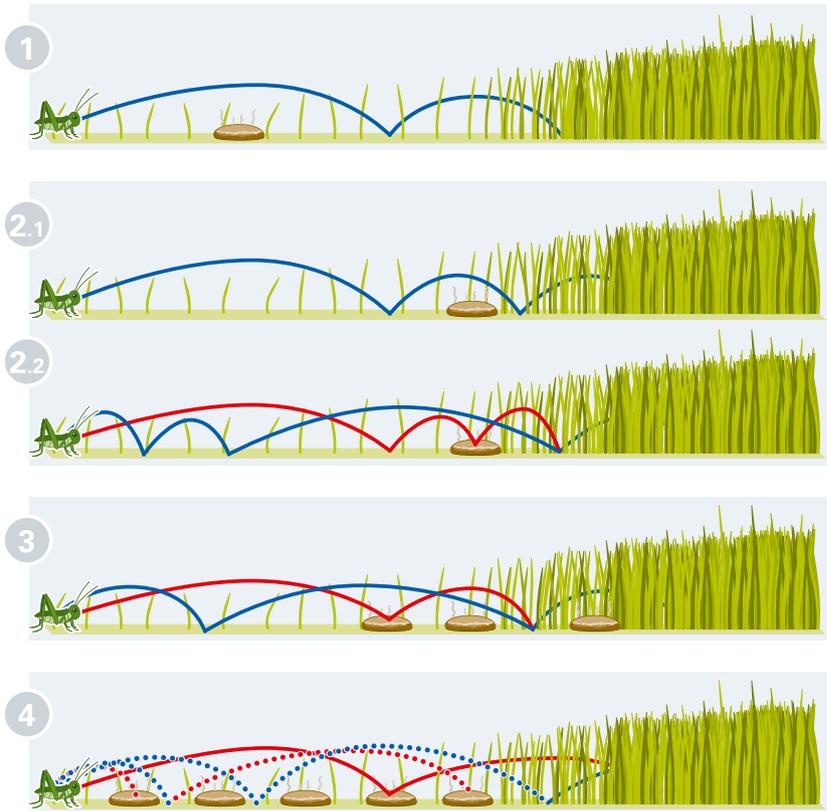
Fall 2: Der weiteste Sprung landet auf einem freien Feld, aber dabei wird keine Mine passiert.

Jetzt kommt der nächste Kniff: Wir räumen in Gedanken die am weitesten links liegende Mine beiseite. Damit sind wir wieder bei dem Fall n Sprünge und $n - 1$ Minen, der nach Induktionsannahme eine Lösung besitzt.

Fall 2.1: Wenn bei dieser Lösung kein Sprung auf der weggeräumten Mine landet, sind wir fertig.



Fall 2.2: Ein Sprung landet auf der weggeräumten Mine. Wir tun nun so, als würden wir nicht vom Nullpunkt beginnend nach rechts springen, sondern vom Endpunkt nach links (was auf dasselbe hinausläuft: Haben wir einen zulässigen Parcours von rechts nach links, dann haben wir auch einen von links nach rechts). Der Sprung, der auf der weggeräumten Mine landet, wird durch den längsten Sprung a_{n+1} ersetzt. Damit landen wir auf jeden Fall in sicherem Gelände, denn links von der weggeräumten



Mine liegt ja keine weitere. Mit den verbleibenden Sprüngen – es können mehrere sein oder auch nur einer – gelangen wir sicher zum Ausgangspunkt und sind damit fertig.

Fall 3: Der weiteste Sprung landet auf einer Mine, dabei wird jedoch keine weitere Mine übersprungen.

Auch in diesem Fall beginnen wir nicht am Nullpunkt, sondern von der anderen Seite. Wir wissen nach Induktionsannahme, dass es für n Sprünge und $n - 1$ Minen eine Lösung gibt, deren letzter Sprung auf jener Mine landet, auf der wir von links kommend mit dem weitesten Satz angekommen sind. Wenn wir einfach den letzten dieser n Sprünge mit dem längsten Satz a_{n+1} vertauschen, überqueren wir heil die letzte Mine, kommen danach in das minenfreie Anfangsstück und damit sicher zum Punkt null.

Fall 4: Der weiteste Sprung landet auf einer Mine, dabei wird jedoch mindestens eine weitere Mine übersprungen.

Wir nehmen an, dass beim ersten Satz f Minen ($f \geq 1$) passiert werden. Inclusive

der Mine, auf welcher der Grashüpfer landet, liegen im ersten Teilstück also $f + 1$ Minen. Das bedeutet wiederum, dass sich auf dem restlichen Weg bis zum Ende noch $n - (f + 1) = n - f - 1$ Minen befinden.

Wir beginnen nun nicht mit dem längsten Satz a_{n+1} , sondern mit einem der n kürzeren. Im ersten Teilstück liegen f Minen, also muss es mindestens $n - f$ verschiedene erste Sprünge geben, die auf einem freien Feld im ersten Teilstück landen. Der zweite, danach ausgeführte Sprung soll dann der längste sein (a_{n+1}). Mit diesem Doppelsprung kommen wir heil über die $f + 1$ Minen.

Weil uns $n - f$ verschiedene erste Sprünge zur Verfügung stehen, kann der Doppelsprung auf $n - f$ verschiedenen Punkten rechts der $f + 1$ Minen enden. Dort befinden sich jedoch nur $n - f - 1$ Minen. Also muss es mindestens einen Doppelsprung geben, der auf keiner Mine landet. Dieser Doppelsprung passiert $f + 1$ Minen, also mindestens zwei. Damit müssen mit den verbliebenen $n - 1$ Sprüngen höchstens $n - 2$ Minen gemeistert werden, was laut Induktionsannahme möglich ist. Damit ist der Beweis erbracht.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / EMME GRATIK



DIE IMO-SPIELREGELN

hen. Der gibt dem Grashüpfer nicht nur die Längen der n Sprünge vor, die dieser auszuführen hat, sondern legt noch $n - 1$ Tretminen an Stellen, die er sich aussuchen kann. Hätte er nur eine Mine mehr zur Verfügung, so könnte er stets gewinnen, indem er sämtliche Stellen vermint, auf die der Grashüpfer im ersten Sprung gelangen kann. Es wird also ziemlich eng für das arme Tier; aber die Aufgabenstellung behauptet, dass es seinem Widersacher stets entkommen kann.

Um ein erstes Gefühl für das Problem zu bekommen, lohnt der Blick auf den simplen Fall $n = 2$. Der Grashüpfer hat dann zwei unterschiedlich lange Sprünge zu vollführen, beispielsweise 2 und 3. Und irgendwo zwischen dem Startpunkt 0 und dem Endpunkt 5 liegt eine Mine.

Kann das Tier immer so springen, dass es sicher ans Ziel kommt? Offensichtlich! Denn sollte der erste Sprung genau auf der Mine landen, dann vertauscht der Hüpfer einfach die Reihenfolge der Sprünge. Weil beide Sprünge unterschiedlich lang sind und es nur eine Mine gibt, landet der erste Sprung dann stets auf einem freien Feld – für $n = 2$ ist die Aufgabe gelöst.

Heil bis zum Ziel springen – dank Induktion

Bereits an dieser Stelle ahnt man: Die Lösung läuft auf eine vollständige Induktion hinaus. Bei dieser Methode wird angenommen, dass die Aufgabe im Fall n eine Lösung hat. Wenn es dann gelingt, zu zeigen, dass der Grashüpfer unter dieser Voraussetzung auch im Fall von $n + 1$ Sprüngen und n Minen sicher ans Ziel kommt, ist die Aufgabe gelöst. Es gilt also, die Aufgabe auf eine gleichartige Aufgabe mit einem Sprung und einer Mine weniger zurückzuführen.

Das klingt alles nicht besonders kompliziert, allerdings steckt der Teufel im Detail. Selbst wenn man für n Sprünge und $n - 1$ Minen eine Lösung hat, können ein weiterer Sprung, über dessen Länge wir nichts wissen, und eine zusätzliche, irgendwo platzierte Mine diese Lösung gehörig durcheinanderwirbeln. Was passiert, wenn die neue Mine genau auf einer bisherigen Landestelle liegt? Und wie geht es weiter, wenn man durch das Vertauschen zweier Sprünge zwar diese neue Mine überspringt, aber stattdessen auf einer anderen landet? Unklar ist außerdem, welche Konsequenzen es

Jedes Land darf ein Team mit bis zu sechs Teilnehmern stellen. Diese dürfen noch nicht 20 Jahre alt sein und noch kein Studium begonnen haben. An zwei aufeinander folgenden Tagen müssen die Teilnehmer jeweils drei Aufgaben lösen. Jede Klausur dauert 4,5 Stunden. Als Hilfsmittel sind nur Stifte, Lineal, Dreieck und Zirkel erlaubt. Taschenrechner, Handys, Computer oder Nachschlagewerke müssen draußen bleiben.

Jeder bekommt die Aufgaben in seiner Landessprache und in einer weiteren Sprache seiner Wahl. Korrigiert werden die Lösungen zunächst von dem eigenen Teamleiter, weil der die Sprache seiner Schüler am besten versteht. Die Entscheidung, wie viele der maximal sieben Punkte pro Aufgabe vergeben werden, treffen die Koordinatoren.

LÄNDERWERTUNG DER IMO 2009				
Land	Punkte	Gold	Silber	Bronze
China	221	6		
Japan	212	5		1
Russland	203	5	1	
Südkorea	188	3	3	
Nordkorea	183	3	2	1
USA	182	2	4	
Thailand	181	1	5	
Türkei	177	2	4	
Deutschland	171	1	4	1
Weißrussland	167	1	4	1

Medaillen werden an die Hälfte der Teilnehmer vergeben. Das Verhältnis von Gold zu Silber zu Bronze ist 1 : 2 : 3.

QUELLE: WWW.IMO-OFFICIAL.ORG/YEAR_COUNTRY_09.ASPX/YEAR=2009&COLUMN=TOTALRANKING-DESC

hat, wenn die Minen über die Strecke von $n + 1$ Sprüngen ganz anders verteilt werden als bei der kürzeren Distanz von n Sprüngen.

Man kann sich leicht verzetteln – und an dieser Stelle hilft wohl nur noch Talent gepaart mit Erfahrung weiter. »Profis haben ein Gefühl dafür, wonach sie suchen müssen«, erklärt Wegert. »Es gibt eine Vielzahl von Techniken, die man trainieren kann, zum Beispiel: Schau nach dem Größten oder nach dem Kleinsten.«

Genau dies, und zwar die genaue Betrachtung des größten der $n + 1$ Sprünge, ist der Schlüssel zur Lösung (Kasten links).

»Für die optimale Lösung braucht man eigentlich nur den Schulstoff der achten Klasse«, meint Wegert. Aber in der Aufgabe seien gleich mehrere Hürden drin. »Erst mal muss man auf die Idee mit dem längsten Sprung kommen.« Das hätten die meisten Profis drauf. »Aber da steckt noch ein bisschen mehr Knochenarbeit drin.«

Die Dresdnerin Lisa Saueremann hatte den Lösungsansatz relativ schnell gefunden: »Sich den größten Sprung genauer anzuschauen und es mit einer Induktion zu versuchen, war nahe liegend«, sagt sie. »Als ich die Aufgabe binnen 60 Minuten gelöst hatte, habe ich mich gewundert. So schnell das schwerste Problem geknackt?« Beim Aufschreiben der

Lösung merkte die Schülerin jedoch, dass sie vergessen hatte, einen Fall zu betrachten – ausgerechnet den schwersten.

Lisa bekam das Problem zum Glück noch in den Griff, wenn auch nicht ganz so elegant. »Meine Lösung ist ein bisschen umständlich, ich habe sechs Blätter vollgeschrieben.« Am Ende landete sie mit 41 von 42 möglichen Punkten auf dem dritten Platz. Vor ihr lagen mit je 42 Punkten der Japaner Makoto Soejima und der Chinese Dongyi Wie.

Die Aufgabe 6 zeigt exemplarisch, worauf es bei einer IMO ankommt. Es gilt, das elementare Handwerkszeug der Mathematik möglichst kreativ anzuwenden und verschiedene Ansätze auszuprobieren. Das ist im Fußball oder im Schach nicht anders. Alle wissen, was ein Doppelpass oder eine Italienische Eröffnung ist. Weltklassepieler bauen in ihr Spiel jedoch zusätzliche Tricks ein – und können so auch einen mit allen Wassern gewaschenen Gegner knacken. Oder eben wie die IMO-Sieger eine Aufgabe, die wie ein Jahrhundertproblem aussieht. ◁



Holger Dambeck ist Redakteur bei »Spiegel online« und schreibt regelmäßig eine Mathematik-Kolumne, die jetzt auch als Buch erschienen ist (»Numeratoren – Mathematik für jeden«).

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/1010141.

Droht ein Mangel an PHOSPHOR?

Phosphor ist Hauptbestandteil von Düngemitteln. Seine Vorkommen reichen zwar noch für Jahrzehnte. Doch wenn wir nicht jetzt beginnen, sie zu schonen, könnte die Landwirtschaft schon in diesem Jahrhundert zusammenbrechen.

Von David A. Vaccari

So komplex die Chemie des Lebens auch sein mag – die Voraussetzungen für üppiges Pflanzenwachstum an einem Standort lassen sich in drei Zahlen ausdrücken: 19-12-5 zum Beispiel. Das sind die prozentualen Anteile von Stickstoff, Phosphor und Kalium, wie sie auf jeder Düngerverpackung stehen. Diese drei Nährstoffe haben im 20. Jahrhundert eine enorme Steigerung der landwirtschaftlichen Produktivität ermöglicht und zu einer Versechsfachung der Weltbevölkerung geführt. Doch woher stammen sie?

Stickstoff gewinnen wir aus der Luft, die zu 78 Prozent daraus besteht; Phosphor und Kalium werden dagegen aus Bergwerken gefördert. Kalium gibt es weltweit noch genug für mehrere Jahrhunderte. Beim Phosphor aber dürften die leicht zugänglichen Vorkommen gerade noch bis Ende dieses Jahrhunderts reichen. Dann wird die Bevölkerungszahl einen Spitzenwert erreicht haben, von dem manche meinen, er läge jenseits der Tragfähigkeit der Erde.

Doch Schwierigkeiten könnte es schon viel früher geben. Wie die Ölpreisschwankungen im vergangenen Jahr gezeigt haben, treten bei Rohstoffen oft schon lange, bevor sie wirklich knapp werden, Marktengpässe auf. Die Phosphorvorräte sind noch ungleichmäßiger über die Erde verteilt als diejenigen von Erdöl, was das Problem einer gesicherten Versorgung verschärft. Mit einem Gesamtanteil von 23 Prozent sind die USA weltgrößter Produzent und Exporteur von Phosphor. Vier Fünftel ihrer Fördermenge stammen aber aus nur einer Quelle: Minen in der Nähe von Tampa (Florida). Diese dürften in ein paar Jahrzehnten erschöpft sein. Heute befinden sich fast 40 Prozent der weltweiten Reserven in einem ein-

ziges Land, Marokko, dem »Saudi-Arabien des Phosphors«. Obwohl es sich um eine dem Westen wohlgesinnte Nation mit stabilen politischen Verhältnissen handelt, macht dieses Ungleichgewicht den Phosphor zu einer tickenden geostrategischen Zeitbombe.

Düngemittel sind aber nicht nur unverzichtbar, sondern haben sich auch zu einem Problem für die Umwelt entwickelt. Als Folge moderner landwirtschaftlicher Methoden wird heute dreimal so viel an Phosphor aus dem Boden ausgewaschen wie natürlicherweise. Der übermäßige Eintrag des Nährstoffs in die Flüsse fördert Algenblüten und destabilisiert aquatische Ökosysteme. Während andere Elemente wie Kohlenstoff oder Stickstoff ins Zentrum der öffentlichen Aufmerksamkeit gerückt sind, hat sich der Phosphor in aller Stille zu einem der gravierendsten Fälle für mangelnde Nachhaltigkeit in unserer Zeit entwickelt.

Störung des natürlichen Kreislaufs

Mein Interesse an Phosphor wurde durch ein Programm der US-Raumfahrtbehörde NASA Mitte der 1990er Jahre geweckt. Dabei ging es um die Entwicklung eines Systems zur Produktion von Lebensmitteln im Weltraum. Das setzt eine sorgsame Analyse der Kreisläufe aller Elemente voraus, aus denen Nahrung besteht; denn diese Elemente müssten innerhalb der geschlossenen Umwelt eines Raumschiffs recycelt werden. Nahrungsmittel im All erzeugen zu können wäre wichtig für eine künftige Reise zum Mars, die fast drei Jahre dauern würde.

Auch unser Planet ist ein Raumschiff, das eine im Wesentlichen feststehende Menge von jedem Element enthält. Im natürlichen Kreislauf gelangt Phosphor durch Verwitterung aus Gesteinen in den Boden. Von Pflanzen aufgenommen, tritt das Mineral in die Nahrungskette ein und nimmt seinen Weg durch alle

In Kürze

- ▶ **Phosphor** wird in großem Stil für **Dünger** abgebaut. Seine Vorräte sind vermutlich in einigen Jahrzehnten erschöpft. Außerdem beschränken sie sich auf nur eine Hand voll Länder.
- ▶ Zu viel Phosphor in Wasserläufen fördert **Algenblüten**. Als Folge davon entstehen »tote Zonen«, in denen die Fische an Sauerstoffmangel sterben.
- ▶ Eine **Verminderung der Bodenerosion** und das **Recycling von Phosphor** aus landwirtschaftlichen und kommunalen Abwässern könnten dazu beitragen, die Nahrungsmittelproduktion nachhaltig zu gestalten und Algenblüten zu verhindern.

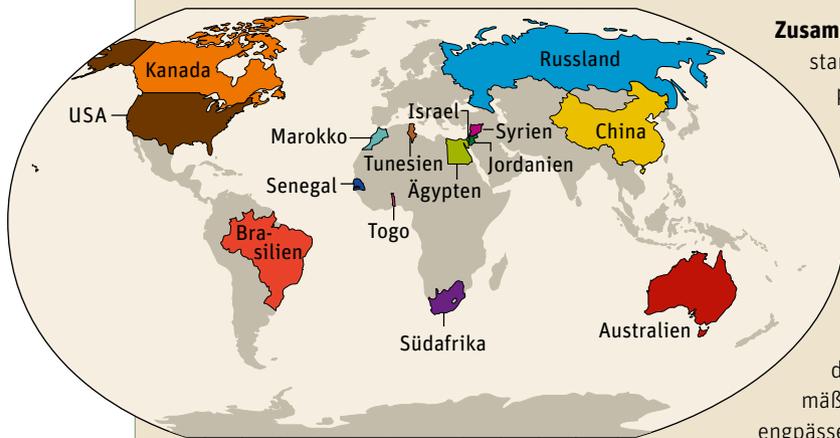


Organismen. Phosphor – gewöhnlich in Form des Phosphations PO_4^{3-} – ist für das Leben essenziell. Es ist wesentlicher Bestandteil des DNA-Rückgrats, der Zellmembranen und des Moleküls Adenosinriphosphat, das als wichtigster Energieträger der Zelle fungiert. Der menschliche Körper enthält im Durchschnitt mehr als 600 Gramm davon, hauptsächlich in den Knochen.

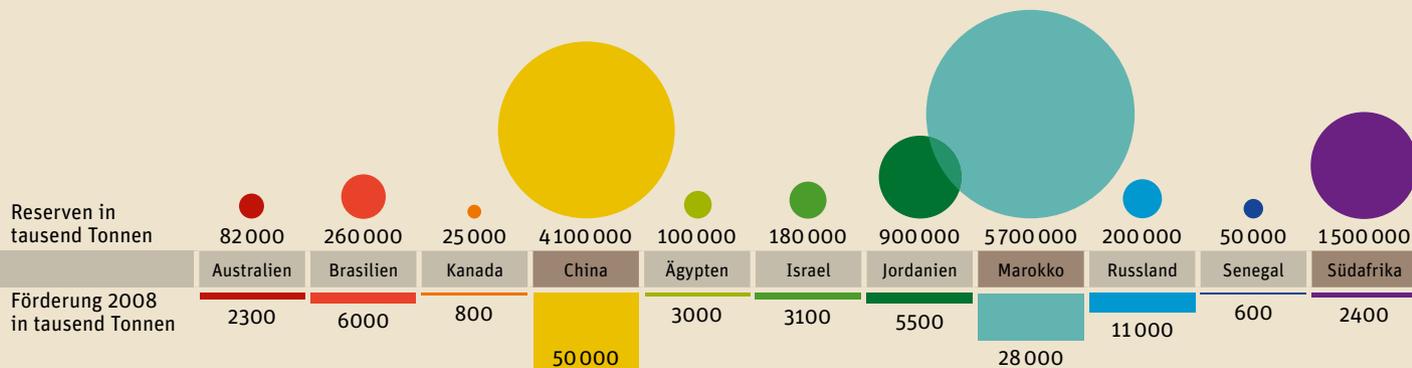
In kontinentalen Ökosystemen wird Phosphor im Mittel 46-mal in lokalen Kreisläufen wiederverwendet, bevor die Flüsse das Element ins Meer spülen. Dort kann es dann noch rund 800-mal in Meeresorganismen recycelt werden, bis es sich am Boden ablagert. Durch tektonische Hebung gelangt es nach Jahrmillionen schließlich auf die Kontinente zurück.

Der Bergbau greift in diesen Kreislauf ein; denn er entzieht dem Festland viel zusätzliches Phosphor. In der vorindustriellen Landwirtschaft, als Fäkalien von Mensch und Tier als Düngemittel dienten, gelangten etwa so viele Nährstoffe zurück in den Boden, wie zuvor entnommen worden waren. Unsere moderne Gesellschaft trennt jedoch die Produktion von Nahrung und ihren Verbrauch. Dies schränkt die Möglichkeiten ein, dem Boden Nährstoffe zurückzugeben. Stattdessen nutzen wir sie einmal und spülen sie dann fort. So gelangen sie wesentlich schneller ins Meer.

Zudem begünstigt die Landwirtschaft die Erosion. Pflügen und Auflockern des Bodens zerstören den Zusammenhalt des Erdreichs und legen tiefere Schichten frei. So verschwindet Phosphor zusätzlich durch Ausschwemmung. Auch Maßnahmen gegen Überflutungen beeinträchtigen den natürlichen Kreislauf des Minerals. Normalerweise würden die Flüsse bei Hochwasser phosphatreiche Sedimente über das angrenzende Flachland verteilen, wo das Element wieder für Landökosysteme zur



Zusammen mit Stickstoff und Kalium ist Phosphor ein wesentlicher Bestandteil von Düngemitteln. Er wird aus Gesteinen in Form von Phosphat gewonnen. 83 Prozent der leicht abbaubaren weltweiten Vorkommen befinden sich in Marokko, China, Südafrika und den USA (Kreise unten). Aus diesen Ländern stammen zwei Drittel des jährlich gewonnenen Phosphors (Balken unten). Bei der momentanen Abbaugeschwindigkeit reichen die weltweiten Reserven schätzungsweise noch etwa 90 Jahre. Sobald der Rohstoff zur Neige geht, müssen Vorkommen erschlossen werden, deren Abbau kostspieliger ist, was zu höheren Preisen und Marktverwerfungen führen dürfte. Schon seit über zehn Jahren ist die Förderung rückläufig (Grafik rechts). Während der Preis zunächst nur mäßig anstieg, hat er sich im vorigen Jahr auf Grund von Versorgungsengpässen und einer wachsenden Nachfrage verdreifacht.



JEN CHRISTENSEN, NACH USGS MINERAL COMMODITY SUMMARIES, JANUAR 2009

Der Bergbau entzieht dem Festland große Mengen an Phosphor und greift so in den natürlichen Kreislauf dieses Rohstoffs ein

Verfügung stünde. Stattdessen setzen sich die Sedimente heutzutage hinter Staudämmen ab oder verbleiben in eingedeichten Flüssen, bis sie ins Meer gespült werden.

So gelangt zu viel Phosphor aus erodierten Böden und aus menschlichen und tierischen Fäkalien in Seen und Ozeane, wo er unkontrollierte Blüten von Cyanobakterien und Algen auslöst. Diese sinken nach dem Absterben zum Grund, wo sie von Mikroorganismen zersetzt werden, die Sauerstoff verbrauchen. Durch den Mangel an dem lebenswichtigen Gas entstehen »tote Zonen«, in denen die Fische und andere Wassertiere sterben (siehe Kasten rechts).

Wie lange reicht der Vorrat?

Die Phosphorströme summieren sich heute auf geschätzte 37 Millionen Tonnen pro Jahr. Etwa 22 davon stammen aus dem Phosphatbergbau. Die Erde enthält große Mengen an phosphorreichen Mineralen. Nach Schätzungen im Rahmen des Internationalen Geologischen Korrelationsprogramms (IGCP) von 1987 betragen die weltweiten Vorkommen an Phosphatgestein ungefähr 163 Milliarden Tonnen, was mehr als 13 Milliarden Tonnen Phosphor entspricht und fast ein Jahrtausend reichen sollte.

Dabei sind jedoch Gesteinstypen mitgerechnet, die in der Praxis nicht verwertbar sind, weil – wie bei karbonatreichen Mine-

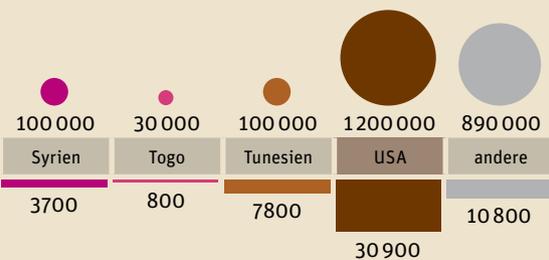
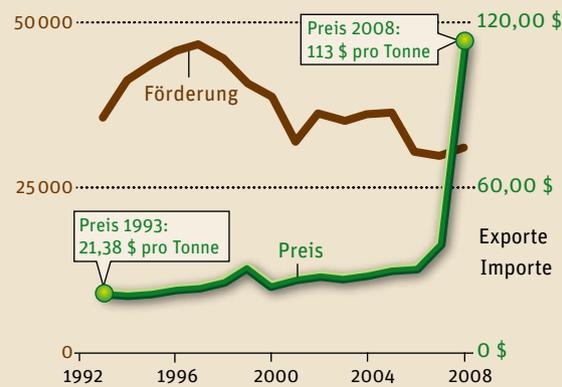
ralen – keine wirtschaftliche Methode zur Gewinnung des enthaltenen Phosphors existiert. Außerdem wurden bei der Schätzung auch Sedimente berücksichtigt, die unzugänglich sind, weil sie zu tief unter der Erde oder am Meeresboden liegen. Andere Vorkommen befinden sich in unerschlossenen oder ökologisch besonders sensiblen Gebieten. Schließlich enthalten Phosphatgesteine teils große Mengen giftiger oder radioaktiver Stoffe wie Kadmium, Chrom, Arsen, Blei oder Uran.

Die geschätzten echten Phosphatreserven, also Lagerstätten, die mit heutiger Technologie wirtschaftlich abbaubar sind, liegen deshalb nur bei 15 Milliarden Tonnen. Das reicht beim derzeitigen Verbrauch noch etwa 90 Jahre. Allerdings wird der Bedarf wohl zunehmen, weil die Weltbevölkerung wächst und die Menschen in den Entwicklungsländern einen höheren Lebensstandard anstreben. Insbesondere der steigende Verzehr von Fleisch könnte den Verbrauch in die Höhe treiben; denn Tiere fressen bei der Aufzucht wesentlich mehr Nahrung, als sie beim Schlachten liefern.

Die Phosphorreserven konzentrieren sich auch geografisch. Vier Staaten – die USA, Marokko, China und Südafrika – verfügen zusammen über 83 Prozent und zeichnen für zwei Drittel der jährlichen Förderung verantwortlich (siehe Kasten oben). Das meiste Phosphat der Vereinigten Staaten stammt aus Minen im Bone Valley in Florida, einer Fos-

US-FÖRDERUNG RÜCKLÄUFIG BEI STEIGENDEN PREISEN

Förderung von Phosphatgestein in Millionen Tonnen



sillagerstätte, die vor zwölf Millionen Jahren entstand, als das Gebiet vom Atlantischen Ozean überflutet war. Nach Angaben des Geologischen Dienstes der USA summieren sich die dortigen Reserven auf 1200 Millionen Tonnen. Davon werden heute etwa 30 Millionen Tonnen pro Jahr abgebaut. Bei gleich bleibender Fördermenge sollten die Vorkommen also nur noch rund 40 Jahre reichen.

Schon jetzt brauchen die US-Produzenten von – großenteils für die Ausfuhr bestimmten – Düngemitteln mehr Phosphor, als die heimischen Bergwerke liefern. Deshalb importieren sie Phosphatgestein. China besitzt hochwertige Reserven, exportiert aber nicht. Die meisten US-Importe kommen aus Marokko. Ähnlich wie beim Erdöl droht den Vereinigten Staaten und einem großen Teil der restlichen Welt die Abhängigkeit von einem einzigen Land, weil nur dieses über einen essenziellen Rohstoff verfügt.

Manche Geologen glauben nicht an einen drohenden Phosphormangel. Sie halten Angaben darüber, wie groß die Vorräte sind und wie lange sie reichen, für relativ. Schließlich verändert sich allein schon die Definition, welche Vorkommen als Reserven anzusehen sind, bei steigenden Preisen: Vorher nicht wirtschaftlich abbaubare Lagerstätten lohnen plötzlich die Ausbeutung. Vorübergehende Engpässe oder Preisschwankungen können zu Einsparungsbemühungen oder zur Entwicklung besserer Gewinnungsmethoden führen.

Für Bergbaugesellschaften besteht nur dann ein Anreiz, nach neuen Vorkommen zu suchen, wenn die bisherigen Quellen eines Rohstoffs zur Neige gehen. Erst die Erschöpfung alter Minen spornt zu verstärkter Explorations-tätigkeit an. Die aber bringt bislang unbekanntes Vorkommen ans Licht. Vor 20 Jahren wies der US-Geologe Richard P. Sheldon (1923–1996) darauf hin, dass über das 20. Jahrhundert hinweg neue Phosphatlagerstätten in stets gleich bleibender Zahl entdeckt wurden. Wie er ferner meinte, seien tropische Regionen mit tiefgründigen Böden nicht ausreichend erkun-

FAKTEN ÜBER PHOSPHOR

- Ein Erwachsener benötigt im Durchschnitt etwa ein Gramm Phosphor am Tag. Für die ausgewogene Ernährung einer Person müssen 22,5 Kilogramm Phosphatgestein pro Jahr gefördert werden.
- Mindestens so viel Phosphor, wie die Kulturpflanzen aufnehmen, geht durch Erosion verloren. Im Becken des Illinois River kommen auf jedes produzierte Kilogramm Mais etwa 1,2 Kilogramm fortgeschwemmter Boden.
- Vor 40 Millionen Jahren löste ein Phosphorüberangebot im Meer ein massenhaftes Wachstum von Wasserpflanzen aus. Die sich rasant vermehrende Vegetation entzog der Atmosphäre so viel von dem Treibhausgas Kohlendioxid, dass es zu einer globalen Abkühlung kam. Der zusätzliche Phosphor wurde im Verlauf der tektonischen Hebung des Himalaja und des Tibet-Plateaus freigesetzt.

DIE DUNKLE SEITE DES PHOSPHORS

Ausschwemmung von Dünger und phosphatbelastete Abwässer fördern die Eutrophierung von Seen und Ozeanen, bei der es zu unkontrollierten Blüten von Cyanobakterien kommt. Die früher blaugrüne Algen genannten Mikroorganismen benötigen Phosphor und Stickstoff als Nährstoffe. Wenn sie abgestorben sind, wird bei ihrer Zersetzung Sauerstoff verbraucht, und das Leben im Wasser erstickt allmählich. Es entstehen »tote Zonen«, die oft solche Ausmaße annehmen, dass sie sogar aus dem Weltall sichtbar sind – wie auf dem nebenstehenden Satellitenbild von 2001. Es zeigt die größte tote Zone in den Gewässern der USA. Sie befindet sich vor dem Delta des Mississippi (ockerfarbener Schlamm des Flusses ist rechts auf dem Foto zu sehen) und erreichte im Juli 2008 eine Rekordfläche von 20 000 Quadratkilometern. Weltweit existieren heute mehr als 400 tote Zonen. Insgesamt bedecken sie eine Fläche von über 245 000 Quadratkilometern. Die Forscher sind sich nicht einig, auf welches Element – Phosphor oder Stickstoff – sich eine kosteneffektive Abwasserreinigung konzentrieren sollte, um einer Eutrophierung vorzubeugen. In Süßwasser lebende Cyanobakterien können Stickstoff aus der Luft gewinnen; deshalb kommt es hier auf den Phosphor an. Das hat eine 2008 veröffentlichte Untersuchung bestätigt. Über 37 Jahre hinweg führten Forscher einem See in Kanada gezielt Nährstoffe zu. »Weltweit ist kein einziger Fall bekannt, in dem jemand zeigen konnte, dass sich die Eutrophierung allein durch die Kontrolle von Stickstoff reduzieren lässt«, sagt der Hauptautor der Publikation, David Schindler von der University of Alberta in Edmonton (Kanada). Wie andere Forscher zu bedenken geben, können Cyanobakterien in Salzwasser keinen atmosphärischen Stickstoff aufnehmen, aber genügend Phosphor aus Sedimenten gewinnen. Das lässt auch die Kontrolle des Stickstoffs dringlich erscheinen.

Davide Castelvechi, Redakteur bei »Scientific American«



LIAM GUMLEY, SPACE SCIENCE AND ENGINEERING CENTER (SSEC), UNIVERSITY OF WISCONSIN-MADISON, UND MODIS SCIENCE TEAM

det; denn sie umfassen 22 Prozent der kontinentalen Erdoberfläche, enthalten aber nur zwei Prozent der bekannten Phosphorreserven. Doch neue Vorkommen kamen seither lediglich in zwei Gebieten ans Licht: in Marokko und in North Carolina. In dem US-Staat können sie aber größtenteils nicht abgebaut werden, weil sie in ökologisch empfindlichen Gebieten liegen. Die bis heute gemachten neuen Funde reichen also nicht aus und sind zu

ko und in North Carolina. In dem US-Staat können sie aber größtenteils nicht abgebaut werden, weil sie in ökologisch empfindlichen Gebieten liegen. Die bis heute gemachten neuen Funde reichen also nicht aus und sind zu

WIE SICH DER PHOSPHORKREISLAUF WIEDER INS GLEICHGEWICHT BRINGEN LÄSST

In der Natur durchläuft Phosphor einen Kreislauf aus Verwitterung, biologischer Nutzung, Sedimentation und – etliche Jahrtausende später – geologischer Hebung (grüne Pfeile). Der große Bedarf der modernen Landwirtschaft an Düngemitteln hat den Verbrauch des Elements auf den Kontinenten verdreifacht (orangefarbene Pfeile) und so den Zyklus aus dem Gleichgewicht gebracht. Diesem Problem lässt sich durch eine Kombination von Maßnahmen (Kästen) begegnen.

INTEGRIERTE LANDWIRTSCHAFT

Tierabfälle (insbesondere Knochen, die viel Phosphor enthalten) und nicht essbare Teile von Pflanzen könnten recycelt werden. Der so gewonnene Phosphor würde in Düngemitteln den aus dem Bergbau teilweise ersetzen.

EROSION VERMINDERN

Sanftere landwirtschaftliche Methoden wie der Verzicht aufs Pflügen verringern die Bodenerosion. Damit bleibt mehr Phosphor im Erdreich. Dünger wäre möglichst so einzusetzen, dass er nur den Pflanzen zugutekommt und nicht ausgeschwemmt wird.

BLEIROHRE ERSETZEN

Alte Leitungsrohre geben Blei und andere giftige Metalle ab. Kommunale Abwässer und Klärschlämme sind daher kontaminiert. Das Recycling des darin enthaltenen Phosphors für Dünger würde durch den Austausch der Bleirohre erleichtert.

NEUE VORKOMMEN SUCHE

Sobald Phosphor rarer wird, dürften Preiserhöhungen die Bergbaugesellschaften dazu veranlassen, vorher nicht wirtschaftlich nutzbare Reserven zu erschließen und effizientere Methoden zur Gewinnung des Rohstoffs zu entwickeln.

ABWÄSSER RECYCELN

Der Phosphor aus unserer Nahrung passiert Kläranlagen und endet gewöhnlich auf Deponien. Durch Recycling aus kommunalen Abwässern könnte er dem Ackerland zurückgegeben werden. Gleiches gilt für Stickstoff, einen weiteren wichtigen Bestandteil von Dünger.



ungleich verteilt, um Bedenken über die künftige Versorgungssituation auszuräumen. Wir sollten daher eine Phosphorkrise als realistische Drohung ansehen und ernsthafte Maßnahmen zur Bewahrung dieses Rohstoffs einleiten.



Die gängigen Methoden zur Schonung von Ressourcen sind auch auf Phosphor anwendbar: Einsparung, Rückführung und Wiederverwendung. Der Düngemittelverbrauch lässt sich durch effizientere landwirtschaftliche Methoden reduzieren. Dazu zählen das Terrassieren und der Verzicht auf das Pflügen, um die Erosion zu vermindern (Spektrum der Wissenschaft 5/2009, S. 78). Bei der Ernte anfallende Pflanzenrückstände wie Halme oder Stiele sollten mitsamt dem enthaltenen Phosphor dem Boden zurückgegeben werden. Dasselbe gilt für tierische Abfälle (vor allem Knochen) aus der Fleisch- und Molkereiwirtschaft, von denen bisher nicht einmal die Hälfte zu Dünger verarbeitet wird.

Schadstoffe im Klärschlamm

Hinzu kommt die Rückgewinnung von Phosphor aus dem Abwasser – zugegebenermaßen eine nicht ganz leichte Aufgabe, weil kommunaler Klärschlamm viele Schadstoffe enthält, insbesondere Schwermetalle wie Blei und Kadmium aus alten Rohrleitungen. Um die Landwirtschaft langfristig nachhaltig zu gestalten, sollten deshalb zunächst sukzessive alle schadstoffhaltigen Rohre ersetzt werden.

Die Hälfte des vom Menschen ausgeschiedenen Phosphors befindet sich im Urin, aus dem er relativ einfach wiederzugewinnen wäre. Die Trennung von festen und flüssigen menschlichen Fäkalien – die in Kläranlagen oder Spezialtoiletten erfolgen kann – hätte einen weiteren Vorteil. Urin enthält auch reichlich Stickstoff. Würde dieser recycelt, könnte er einen Teil des Stickstoffs ersetzen, der heute mit hohem Energieaufwand aus der Atmosphäre gewonnen wird.

Mögliche neue Phosphatfunde dürften das Schwinden der Reserven allenfalls hinauszögern, aber nicht verhindern. In einer wirklich nachhaltigen Landwirtschaft käme es dagegen gar nicht zur Erschöpfung der Vorkommen. Dieses Ziel ließe sich allerdings nur erreichen, wenn die Weltbevölkerung so gering bliebe, dass sich die nötige Nahrung mit natürlichem, weit gehend unbehandeltem Mineraldünger erzeugen ließe, der aus heute nicht genutzten, relativ unergiebigem Phosphorquellen stammt. Genau wie bei anderen Rohstoffen stellt sich hier letztlich die Frage, wie viele Menschen die Erde wirklich verkraftet.

Uns gehen die wenigen Phosphorvorkommen aus, die mit wenig Aufwand und preisgünstig abbaubar sind. Ich kann nicht ausschließen, dass es, wie die Optimisten glauben, relativ einfach ist, neue Quellen zu erschließen und auf diese Weise Engpässe abzuwenden. Doch sollten wir im Zweifelsfall unsere Zukunft lieber nicht dem Zufall überlassen. ◀



David A. Vaccari ist Professor und Direktor der Abteilung für Zivil-, Umwelt- und Ozeantechnik am Stevens Institute of Technology in Hoboken (New Jersey). Er hat sich auf die biologische Abwasserbehandlung sowie die Modellierung der Folgen von Verschmutzungen in Fließgewässern spezialisiert und war an der Entwicklung von Recyclingprozessen für bemannte Marsmissionen der NASA beteiligt.

Horn, J. et al.: Untersuchungen zur Rückgewinnung von Phosphat aus Überschussschlamm von Kläranlagen mit vermehrt biologischer Phosphatelimination. Rhombos, Berlin 2007.

Schindler, D. W. et al.: Eutrophication of Lakes Cannot Be Controlled by Reducing Nitrogen Input: Results of a 37-Year-Whole-Ecosystem Experiment. In: Proceedings of the National Academy of Sciences USA 105, S. 11254 – 11258, 12. August 2008.

Smil, V.: Phosphorus in the Environment: Natural Fows and Human Interferences. In: Annual Review of Energy and the Environment 25, S. 53 – 88, 2000.

Wagner, H. et al.: Stoffmengenflüsse und Energiebedarf bei der Gewinnung ausgewählter mineralischer Rohstoffe. Teilstudie Phosphat. E.Schweizerbart, Stuttgart 1999.

Weissroth, M.: Ökosystemanalyse zur Befruchtung des Oberflächenabflusses mit gelöstem Phosphat aus landwirtschaftlich genutzten Flächen anhand langjähriger Freilandmessungen. Shaker, Aachen 2000.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/1006319.

Von Peter Ward

GAIAS BÖSE SCHWESTER

Die Erde gleicht nicht der mythischen Gaia, der behütenden Mutter allen Lebens, sondern vielmehr der mörderischen Medea.

Die beiden Viking-Raumsonden, die den zahlreichen Möglichkeiten des Scheiterns zum Trotz 1976 nach fast einjähriger Reise heil auf dem Mars landeten, hatten vor allem eine Aufgabe: Anzeichen für Leben zu finden. Die Daten, die sie zur Erde funkten, waren daraufhin für fast alle Beteiligten eine herbe Enttäuschung. Die Oberfläche des Mars erwies sich als äußerst rau und unwirtlich, es gab keinerlei Anzeichen für organisches Leben.

Für zwei NASA-Wissenschaftler jedoch, den Atmosphärenforscher James Lovelock und seine Fachkollegin Dian Hitchcock, war das keine wirkliche Überraschung. Bereits ein Jahrzehnt zuvor hatten sie aus Beobachtungen der Marsatmosphäre den Schluss gezogen, dass es auf dem Planeten kein Leben geben könne.

DEBUTART / SARAH HOWELL



Im Rahmen ihrer Forschungsarbeiten entwickelten sie eine der einflussreichsten und bahnbrechendsten wissenschaftlichen Theorien des 20. Jahrhunderts: die Gaia-Hypothese – benannt nach Gaia, der griechischen Göttin der Erde, die als Nährmutter allen Lebens gilt.

Neue wissenschaftliche Befunde deuten nun darauf hin, dass das Leben auf der Erde von völlig anderer Art ist, als dem romantischen Bild von Gaia entspricht. Wenn man eine mythologische Mutterfigur für die Biosphäre suchen wollte, wäre die treffendere Wahl Medea, die Gattin des Argonauten Jason. Sie war eine Zauberin und Prinzessin – und sie tötete ihre eigenen Kinder.

Die Geschichte der Gaia-Hypothese beginnt in den 1960er Jahren, als Lovelock und Hitchcock der Nachweis gelang, dass die Marsatmosphäre sich in einem chemischen Gleichgewicht befindet. Sie ist ein stabiles Gemisch aus Kohlendioxid (CO_2) mit etwas Stickstoff sowie Spuren von Sauerstoff, Me-

than und Wasserstoff. Unsere eigene Atmosphäre dagegen befindet sich in einem chemischen Ungleichgewicht. Sie ist in ihrer Zusammensetzung zwar auch einigermaßen konstant, aber nicht etwa, weil keine chemischen Reaktionen mehr in ihr stattfinden, sondern weil insbesondere der molekulare Sauerstoff sich zwar mit anderen Elementen, vor allem Kohlenstoff, verbindet, aber ständig nachgeliefert wird. Der wichtigste Lieferant ist das Leben: Die Fotosynthese wandelt CO_2 in Sauerstoff um, während der aerobe Stoffwechsel das Gegenteil bewirkt. Ohne Leben würde das sauerstoffreiche, lebensfördernde Gasgemisch, das wir atmen, auf die Dauer in einen lebensfeindlichen Gleichgewichtszustand übergehen, wie auf dem Mars.

Die Erdatmosphäre ist nicht nur im Fließgleichgewicht, sondern auch förderlich für das Leben, und dies seit Milliarden von Jahren. Auch die Oberflächentemperatur unseres Planeten sowie der Säuregehalt und die che-

Ist es die Selbsterhaltung oder die Selbstzerstörung, die das irdische Leben charakterisiert? Romantiker neigen zur ersten Hypothese; Realisten, so scheint es, haben guten Grund, der zweiten anzuhängen.



DIE VIELEN GESICHTER VON GAIA

ES GIBT MINDESTENS DREI VARIANTEN DER GAIA-HYPOTHESE:

- **Die optimierende Gaia:** Diese frühe Fassung ist nach wie vor eine der »stärksten« Varianten. Demnach kontrolliert das Leben aktiv die Umweltbedingungen, darunter auch rein physikalische Parameter der Biosphäre wie die Temperatur, den Säuregehalt der Ozeane und die Zusammensetzung der Atmosphäre, so dass die Erde optimal bewohnbar bleibt.
- **Die selbstregulierende (oder homöostatische) Gaia:** eine neuere und leicht abgeschwächte Version der Theorie. Das Leben optimiert nicht aktiv die Lebensbedingungen auf dem Planeten, sondern erzeugt negative Rückkopplungssysteme, die lebenswichtige Faktoren wie die Temperatur – und in neuerer Fassung auch den Sauerstoff- und CO₂-Gehalt der Atmosphäre – in bestimmten Grenzen halten.
- **Gaia als Superorganismus:** Die Erde ist nicht einfach nur ein Planet, der Leben trägt, sondern selbst ein Lebewesen. Diese stärkste Auslegung der Theorie wird allgemein als unwissenschaftlich angesehen.

mische Beschaffenheit der Ozeane sind offenbar seit Jahrmilliarden stabil; alle diese Parameter schwankten um Durchschnittswerte, welche die Erde durchgehend bewohnbar machten. Aus diesen Einzelbefunden schuf Lovelock eine neuartige Theorie über das Leben und dessen Wechselwirkungen mit dem Planeten, der es beherbergt. Sein Hauptaugenmerk galt der Erde; aber im Prinzip lässt sich die Theorie auf jeden bewohnbaren Planeten anwenden. Lovelock, der in diesem Sommer 90 Jahre alt geworden ist, widmete den Rest seines Berufslebens der Ausarbeitung seiner Theorie.

Kurz gefasst, besagt die Gaia-Hypothese, dass das Leben in seiner Gesamtheit mit seiner physischen Umgebung wechselwirkt, und zwar so, dass diese nicht nur bewohnbar bleibt, sondern dafür auch immer geeigneter wird. Dazu arbeitet es mit einer Anzahl von Rückkopplungsmechanismen, vergleichbar denen, die im Inneren eines Organismus die Temperatur oder den Salzgehalt des Bluts konstant halten. Die Größen, welche die Bewohnbarkeit unseres Planeten am stärksten

beeinflussen, nämlich die Temperatur, die chemische Zusammensetzung der Ozeane und der Süßwasservorkommen sowie die Beschaffenheit der Atmosphäre, werden vom Leben nicht nur beeinflusst, sondern sogar kontrolliert. Im Lauf der Zeit entwickelte Lovelock seine Ideen in unterschiedliche Richtungen weiter (Kasten links).

Ein Jahrzehnt nach der Erstveröffentlichung war seine Hypothese zu der wissenschaftlich profunderen Gaia-Theorie herangereift, die er Mitte der 1970er Jahre so zusammenfasste: »Die Gaia-Theorie besagt, dass die Temperatur, der Oxidationsgrad, der Säuregehalt und andere Parameter von Gesteinen und Gewässern konstant gehalten werden, und zwar durch aktive Rückkopplungsmechanismen, welche die Lebewesen automatisch und unbewusst betreiben.«

Am Ende betrachtete Lovelock den Planeten selbst als eine Art Superorganismus. »Das ganze Spektrum der Lebewesen ..., von Walen bis zu Viren und von Eichen bis zu Algen, kann als eine einzige lebende Einheit aufgefasst werden. Sie ist in der Lage, die Erdatmosphäre ihren Bedürfnissen anzupassen, und verfügt über Fähigkeiten und Kräfte, die weit über die ihrer Teile hinausgehen«, schrieb er 1979 in seinem Buch »Gaia. A New Look at Life on Earth«. Mit anderen Worten: Die Erde ist nicht nur ein Planet, der Leben beherbergt, sondern selbst lebendig.

Sturz einer romantischen Vorstellung

Die Idee war einfach und elegant. Sie fand rasch eine große Anhängerschaft, unter Wissenschaftlern wie unter Laien. Einige Forscher fanden in der Gaia-Theorie eine neue Interpretation für geologische Stoffkreisläufe. Andere suchten in Lovelocks Gefolge nach wissenschaftlichen Beweisen dafür, dass das Leben die Bedingungen auf unserem Planeten reguliert. Einige, hauptsächlich Laien, begründeten mit der Gaia-Hypothese eine besondere Ehrfurcht gegenüber der Erde und den übrigen Lebewesen. Manche betrachten sie sogar als ein göttliches Prinzip.

Noch immer stoßen die Gaia-Thesen bei Forschern auf Interesse und regen Debatten an. Drei internationale Tagungen waren ausschließlich diesem Thema gewidmet, die letzte fand 2006 statt.

In jüngster Zeit jedoch haben einige neuere Entdeckungen große Zweifel an der Richtigkeit der Gaia-Hypothese geweckt, darunter insbesondere Ergebnisse aus der Untersuchung sehr alter Gesteine einerseits und aus der Modellierung der Zukunft andererseits. Beide widersprechen zentralen Aussagen der Theorie. Die Erde sei keineswegs eine im We-



sentlichen konstant lebensfreundliche Umgebung gewesen; vielmehr hätten im Lauf der Erdgeschichte wiederholt »Medea-Ereignisse« stattgefunden: drastische Einbrüche in Artenvielfalt und Individuenanzahl, die das Leben selbst verursacht hat und auch in Zukunft verursachen wird.

Werfen wir zunächst einen Blick in die Vergangenheit. Eines der stärksten Argumente der Gaia-Forscher ist, dass die Temperatur des Planeten weit gehend unverändert und ausgeglichen blieb – dank Rückkopplungsprozessen, die durch das Leben verursacht oder zumindest begünstigt werden.

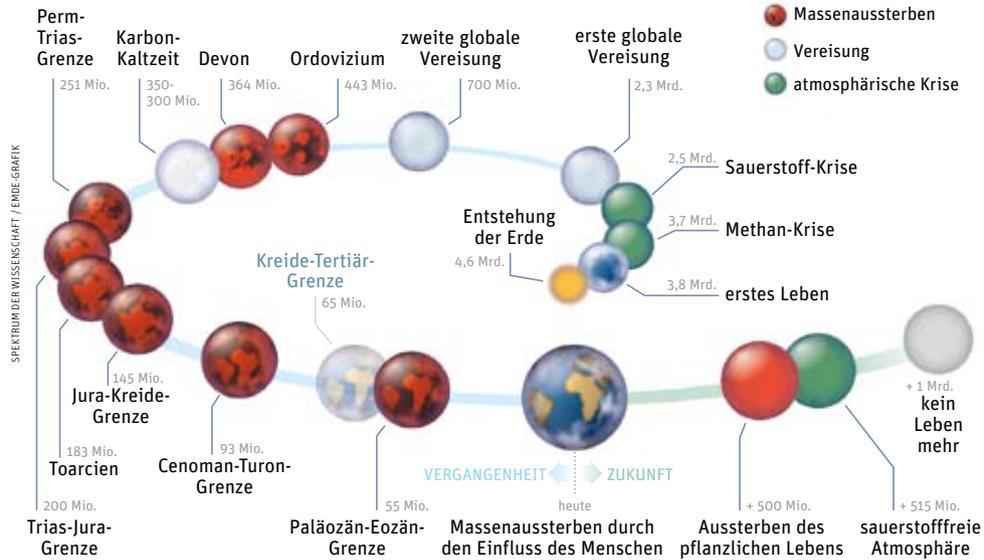
Der wichtigste dieser verschiedenen »Thermostaten« ist der Karbonat-Silikat-Zyklus. Wegen der vulkanischen Aktivität der Erde gelangt ständig, wenn auch in veränderlichen Mengen, Kohlendioxid in die Atmosphäre. CO₂ ist ein potenzielles Treibhausgas. Wenn es nicht auf irgendeine Weise entfernt wird, steigt seine Konzentration so stark an, dass sich die Erde beschleunigt aufheizt. Am Ende würden die Weltmeere verdampfen – ein Schicksal, das vor vier Milliarden Jahren die Venus ereilte.

Der Abbau des Kohlendioxids erfolgt im Wesentlichen durch die chemische Verwitterung silikatreicher Gesteine wie Granit. Bei dieser Reaktion wird das CO₂ aus der Atmosphäre als Kalkstein (Kalziumkarbonat) gebunden. Dieser Prozess wird von Landpflanzen verstärkt, deren Wurzeln Gesteine aufbrechen und das Eindringen von Wasser und CO₂ ermöglichen. Darüber hinaus bauen Pflanzen mittels Fotosynthese direkt Kohlendioxid aus der Atmosphäre ab.

So weit, so Gaia. Wissenschaftlern ist es jedoch gelungen, die Temperaturen aus der Frühzeit der Erde immer präziser abzuschätzen. Die Befunde widersprechen der von der Gaia-Theorie postulierten Konstanz. Tatsächlich war die Erdgeschichte ein wildes Wechselbad von heiß und kalt – hervorgerufen durch die Dynamik des Lebens selbst, und zwar die Evolution neuer Arten.

Vom Schneeball zum Treibhaus und zurück

So gab es vor rund 2,3 Milliarden Jahren eine Periode massiver Gletscherbildung, die etwa 100 Millionen Jahre andauerte. Sie war so intensiv, dass die Ozeane komplett zufroren – die Erde verwandelte sich in eine Art Schneeball. Ursache dafür war das Leben selbst. Ausgerechnet einer der vorgeblichen Rückkopplungsmechanismen war aus dem Ruder gelaufen. Mit der 200 Millionen Jahre zuvor entstandenen Fotosynthese hatten Mikroben der Atmosphäre so viel treibhauswirksames CO₂ entzogen,



dass die Erde in eine wahre Tiefkühltruhe verwandelt wurde.

Nach demselben Muster versetzte noch zweimal eine ungeheuer erfolgreiche evolutionäre Neuerung der Erde einen nahezu tödlichen Kälteschock: die Entstehung der ersten mehrzelligen Pflanzen vor rund 700 Millionen Jahren sowie weit später die Entwicklung der Landpflanzen. Letztere bauten nicht nur mittels Fotosynthese CO₂ ab, sondern bildeten auch tief reichende Wurzeln, die die Verwitterungsrate stark erhöhten. Daraufhin setzte gegen Ende des Devon-Zeitalters (vor 416 bis 360 Millionen Jahren), als die ersten Wälder entstanden, eine 50 Millionen Jahre währende Eiszeit ein. Der warme, grünende Planet kühlte rapide ab, und viele Arten starben aus – keine sehr gaiagerechte Entwicklung.

Seit das Leben existiert, ist es in der Lage, sich selbst zu zerstören. Charles Darwin verglich eine neu entstehende Lebensform mit einem Keil, der in eine enge freie Nische gehämmert wird und diese ganz allmählich erweitert. Das kommt vor. Doch bei anderen Lebensformen ist es an Stelle des kleinen Keils ein Presslufthammer, der ganze Äste vom Baum des Lebens abschlägt.

Das geschieht schon seit der Frühzeit des Lebens. Vor etwa 3,7 Milliarden Jahren fand vermutlich eine »Methan-Krise« statt, die das kaum entstandene irdische Leben um ein Haar wieder ausgelöscht hätte. Methan erzeugende Mikroben füllten die Atmosphäre mit einem dunstigen Nebel, der das Sonnenlicht fast vollständig blockierte.

Das wohl schlimmste Medea-Ereignis wurde durch dieselbe biologische Innovation ausgelöst, die zur ersten Schneeball-Erde führte: die Evolution der Fotosynthese. Bis zu diesem Zeitpunkt vertrugen Lebewesen keinen Sauerstoff; für Mikroben, die bis vor 2,5 Milliarden

Das Leben zerstört sich selbst: Alle großen Aussterbewellen (die für die Paläontologen die Grenze zwischen verschiedenen Erdzeitaltern markieren) sind darauf zurückzuführen, dass eine Lebensform einer anderen das Leben unmöglich macht. Das große Sterben an der Grenze zwischen Kreide und Tertiär, das vermutlich durch einen Meteoriteneinschlag ausgelöst wurde, ist eine bemerkenswerte Ausnahme.

Jahren einzige Lebensform, war er ein tödliches Gift. So entstand als Nebeneffekt der Fotosynthese eine Massenvernichtungswaffe, die alles bisherige Leben zerstörte. Die einzigen Überlebenden waren die fotosynthesefähigen Organismen selbst und die sich rasch entwickelnden sauerstofftoleranten Mikroben.

All das will nicht zu dem anheimelnden Gaia-Bild passen. Aber es kommt noch schlimmer. Seit der Entstehung der Tiere vor 565 Millionen Jahren geriet das Leben mehrfach an den Rand des Abgrunds. Nach neueren Forschungen gab es fünf große und rund zehn kleinere MasseneXTinktionen, katastrophale Ereignisse, bei denen jedes Mal der größte Teil aller Tier- und Pflanzenarten ausstarb (Bild S. 87).

Nach der bahnbrechenden Entdeckung von 1980, dass das Massenaussterben beim Übergang von der Kreidezeit zum Tertiär vor rund 65 Millionen Jahren durch einen Meteoriteneinschlag ausgelöst wurde, bildete sich die Lehrmeinung, dass alle MasseneXTinktionen außerirdische Ursachen hätten: entweder einen Einschlag oder – wie im Ordovizium vor 443 Millionen Jahren – einen Gammastrahlungsausbruch. Derartige Vorgänge werden als »gaianeutral« bezeichnet, weil sie die Gaia-Hypothese weder stützen noch entkräften. Auch unter den Annahmen der Hypothese hätte das Leben nicht die geringste Chance gehabt, sich auf eine derartige Katastrophe einzustellen.

Wärmetod der Erde

Als bald machten Forscher Einschlagkrater auffindig, die zu gewissen MasseneXTinktionen zu passen schienen, etwa zu der großen Sterbewelle beim Übergang vom Perm zur Trias vor 251 Millionen Jahren und derjenigen zwischen Trias und Jura vor 200 Millionen Jahren. Doch die These, dass diese Einschläge Ursachen der MasseneXTinktionen waren, hielt genaueren Untersuchungen nicht stand. Heute gelten die meisten als durch Mikroben verursacht – durch riesige Mengen von Bakterien, die giftiges Schwefelwasserstoffgas freisetzen (siehe Spektrum der Wissenschaft 3/2007, S. 26). Diese »Blüten« gedeihen in den unbewegten, sauerstofffreien Ozeanen, die in Phasen intensiver globaler Erwärmung entstehen, etwa am Ende des Perms, als über längere Zeit aktive Vulkane große Mengen CO₂ in die Atmosphäre bliesen. Der Gaia-Theorie zufolge hätte das Leben diese Prozesse abfedern sollen. Das war jedoch nicht der Fall – ein weiteres starkes Indiz für die Medea-These.

Viele weitere Vorgänge der Erdgeschichte sprechen weniger dafür, dass das Leben sich

selbst erhält, als vielmehr dafür, dass es sich selbst zerstört. Dazu zählt insbesondere das gegenwärtige, vom Menschen verursachte Massenaussterben.

Was bringt die Zukunft? Auch für kommende Zeiten können wir die Gaia-Hypothese zurückweisen, und das ist die vielleicht interessanteste – und schockierendste – Offenbarung: Das Leben scheint aktiv seinen eigenen Untergang anzustreben, wobei sich die Erde unausweichlich dem Tag nähert, an dem sie wieder – wie am Anfang – steril sein wird.

Wie das? Es beginnt damit, dass die Sonne immer heißer wird. In den letzten 4,5 Milliarden Jahren hat sich ihre Energieeinstrahlung um 30 Prozent erhöht, und dies wird in Zukunft so weitergehen. Dennoch erwärmt sich die Erde, woraufhin das Silikatgestein schneller verwittert, da die Verwitterungsrate mit der Temperatur steigt. Entsprechend rascher wird der Atmosphäre das CO₂ entzogen. Die Fotosynthese und die Aktivität der Pflanzenwurzeln verschärfen diesen Effekt.

Zunächst wird dadurch, in Übereinstimmung mit der Gaia-Hypothese, der Temperaturanstieg infolge stärkerer Sonnenstrahlung abgemildert. Doch die Zeit wird kommen – womöglich schon in 500 Millionen Jahren –, zu der die Atmosphäre nicht mehr genügend CO₂ für die Aufrechterhaltung der Fotosynthese enthält.

Mit jenem schicksalhaften Tag beginnt das Ende der Welt, wie wir sie kennen. Die Pflanzen verwelken und sterben. Damit entfällt die Hauptquelle für den Luftsauerstoff und die Produktion von Biomasse. Die Tiere werden ihnen bald nachsterben. Sowie die letzten Pflanzen verschwunden sind, wird der CO₂-Gehalt der Atmosphäre wieder ansteigen, was einen verschärften Treibhauseffekt zur Folge hat. Wenn dann die Erdoberfläche heißer ist als kochendes Wasser, werden die letzten Mikroben verenden.

Dieses Szenario steht in klarem Widerspruch zur Gaia-Hypothese, der zufolge die Existenz von Leben auf einem Planeten dessen Bewohnbarkeit verlängert. Tatsächlich trifft das Gegenteil zu.

Wenn die Modelle korrekt sind, befindet sich das Leben auf der Erde schon in seiner Spätphase. Gaia hat vielleicht noch eine weitere Milliarde Jahre zu leben. Der langfristige – und finale – Rückgang an atmosphärischem CO₂ hat bereits begonnen. Der gegenwärtige Anstieg durch das Verheizen fossiler Brennstoffe ist ein bedeutungsloser Zacken in einer Kurve, die gnadenlos abwärts verläuft.

Gaia liegt im Sterben. Lang lebe Medea. Vorläufig. <



Peter Ward ist Professor für Paläontologie an der University of Washington in Seattle.

© New Scientist
www.newscientist.com

Lovelock, J.: Das Gaia-Prinzip: die Biographie unseres Planeten. Artemis & Winkler, Zürich/München 1991.

Lovelock, J.: Gaias Rache. Warum die Erde sich wehrt. List, Berlin 2007.

Ward, P.: Precambrian Strikes Back. In: New Scientist, S. 40–43, 9. Februar 2008.

Ward, P.: The Medea Hypothesis: Is Life on Earth Ultimately Self-Destructive? Princeton University Press, Princeton 2009.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/1006323.

1959

Atombomben für die Petrochemie

»In Kanada werden Möglichkeiten zur Ölförderung durch Atomexplosionen geprüft. Im Norden der Provinz Alberta befinden sich die Athabaska-Teersande, deren Öl nur zum Teil gewonnen werden könnte, denn es wird von den Sandschichten festgehalten. So will man nun versuchen, durch eine Tiefenexplosion die Schichten so zu erschüttern, daß das Erdöl nach der Detonation im Krater zusammenläuft und nach einer Abkühlungszeit von 2 Jahren gefördert werden kann.« *Naturwissenschaftliche Rundschau*, 12. Jg., Heft 11, November 1959, S. 440

Rätselhaftes Fischsterben

»Im Golf von Mexiko beobachtete man ein geheimnisvolles Fischsterben, das immer durch eine Rotfärbung des Meerwassers eingeleitet wurde. Als Ursache wurden Geißeltierchen festgestellt, die normalerweise in wenigen Exemplaren je Liter Meerwasser vorkommen, sich hier aber auf etwa 60 Millionen Exemplare je Liter vermehrt hatten. Zuchtversuche ergaben, daß diese Geißeltierchen zur raschen Vermehrung eine hohe Konzentration an Phosphaten und Vitamin B12 benötigen, die gelegentlich durch Flüsse ins Meer gespült werden. Die Einzeller scheiden ein starkes Nervengift aus, das Fische schlagartig lähmt und tötet. Kupfersulfat wirkt auf die Einzeller als starkes Gift.« *Die Umschau*, 59. Jg., Nr. 21, 1. November 1959, S. 664



Das Elektrokardiogramm untersucht den Einfluss des Schrittmachers auf die Herzfähigkeit.

Mobiler Schrittmacher

»Herman Nisonoff ist heute wohl der einzige Mensch, dessen Herz dauernd an eine Batterie angeschlossen ist und der dabei gleichzeitig die Möglichkeit hat, sich frei zu bewegen. Schon seit Jahren benutzen Krankenhäuser eine Apparatur, die das Herz im kritischen Augenblick stimuliert. Dr. Furman kam zu dem Schluß, daß im Fall Nisonoff nur noch Hoffnung bestand, wenn das Herz ununterbrochen an eine Stromquelle angeschlossen sein würde. Ein solches Gerät gab es noch nicht; jetzt aber wurde es von Dr. Samuel Bellet geschaffen. Der tragbare Pacemaker wiegt nur etwa 1½ Pfund.« *Hobby: Das Magazin der Technik*, 7. Jg., Nr. 11, November 1959, S. 148ff.

Wo Licht ist ...

»Aus englischen Fachblättern entnimmt man warnende Mahnrufe für Käufer en gros sowie détail von Glühlampen. Es soll vielfach geglückt sein, Inhabern von Ladengeschäften Metallfadenlampen aufzuschwatzen mit günstigstem Nutzeffekt, die sich aber als simple Kohlenfadenlampen entpuppten. Der Schwindel besteht darin, daß z. B. 150 Volt-Lampen geliefert werden für 200 Volt Netzspannung, daher anfangs der glänzende Lichteffekt aber eine äußerst kurze Lebensdauer der Lampe. Um Kenner zu täuschen, sind die Birnen mattiert. Man sieht also nichts von Länge und Dicke des vermeintlichen Metallfadens.« *Die Umschau*, 13. Jg., Nr. 46, 13. November 1909, S. 960

Endlose Gasquelle

»Durch Erhitzen von Stahl im Vakuum schied Verf. (G. Belloc, Académie des sciences; *die Red.*) eine bestimmte Gasmenge ab, worauf der Stahl einige Tage im evakuierten Raum blieb; erneutes Erhitzen auf gleiche Temperatur ergab abermals Gasentwicklung. Diese Versuche konnten oftmals wiederholt werden, wenn

1909

auch die Gasmengen jedesmal geringer waren. Verf. sieht die Metalle dementsprechend als unerschöpfliche »Gasbehälter.« *Chemiker-Zeitung*, 33. Jg., Nr. 134, 9. November 1909, S. 1188



Schränke und Truhen haben angesichts »moderner« Einbruchswerkzeuge ausgedient.

Frust für Panzerknacker

»Die immer mehr fortschreitende Vervollkommnung der Diebeswerkzeuge machte ein rasches Fortschreiten in der Konstruktion der Geldschränke zu einer Notwendigkeit. ... dass die notwendigen Sauerstoffquantitäten und der dazu erforderliche Zeitaufwand so bedeutende sind, dass auch Einbrecher, welche mit dem Schneidebrenner ausgerüstet sind, nicht die Möglichkeit haben, denselben mit Erfolg zu verwenden. Der Verbrauch an Gas ist so bedeutend, weil die einzelnen Platten durch Stahlbolzen miteinander in Verbindung stehen, und weil deshalb die Hitze auf vier weitere Platten übertragen wird. Die Ausstrahlungsfläche ist so gross, dass der Brenner zum Einschmelzen der Kurve in die Aussenplatte ungefähr die zehnfache Zeit braucht.« *Die Welt der Technik*, 71. Jg., Nr. 21, 1. November 1909, S. 401f.

Bits auf der # ÜBERHOLSPUR

Winzige magnetische Bereiche, die auf Nanodrähten hin- und herrasen, haben das Potenzial, fast alle Arten bisheriger Datenspeicher zu ersetzen.

Von Stuart S. P. Parkin

Heutzutage genügen schon zehn Jahre, um unseren Alltag grundlegend zu verändern. Wer hätte Ende der 1990er Jahre erwartet, eine solche Fülle an Informationen via World Wide Web recherchieren zu können, dass Verlagshäuser neue Geschäftsmodelle entwickeln müssen. Wer hätte gedacht, dass eine so große Zahl von Menschen heutzutage neue Kontakte über internetbasierte soziale Netzwerke knüpft, dass ganze Onlinebibliotheken für Musik, Filme, Bücher und Fotografien verfügbar sind. All das verdanken wir der rasanten Entwicklung der Hochgeschwindigkeitskommunikation, der Verarbeitung von Daten und – was meist unterschätzt wird – auch deren digitaler Speicherung.

Das Massenmedium dafür sind überwiegend magnetische Festplatten (Hard Disk Drives, HDDs): mit bis zu 7200 Umdrehungen pro Minute rotierende Glasscheiben mit einer magnetischen Beschichtung, über die Schreib-Lese-Köpfe im beeindruckenden Abstand von nur ein bis zehn Nanometern hinwegfliegen. Doch diese Speicher, die moderne Physik und höchste Ingenieurskunst in einem preiswerten Serienprodukt vereinen, bergen ein Risiko: Beim *head crash* – einer Kollision von Schreib-Lese-Kopf und Platte – können Daten verloren gehen. Sicherungskopien und auf die jeweiligen Nutzer zugeschnittene Backup-Strategien sind deshalb erforderlich.

Aber das ist nicht das einzige Problem, das die mechanisch bewegten Komponenten einer Festplatte bereiten: Es dauert bis zu zehn Millisekunden, bis ein Lesekopf die richtige Position angefahren und das erste Bit eines Datensatzes gelesen hat. Für einen modernen Computer bedeutet das schon eine Ewigkeit – moderne Prozessoren führen in dieser Zeit 20 Millionen Operationen aus. Deshalb ver-

wenden Computer zusätzlich Festkörperspeicher, die ohne Mechanik auskommen und daher Daten schneller schreiben und lesen. Zu dieser Kategorie gehören statische und dynamische Speicher mit wahlfreiem Zugriff (SRAM beziehungsweise DRAM); sie repräsentieren Informationen nicht in Form magnetisierter Felder einer Beschichtung, sondern als elektronische Zustände von Transistoren und Kondensatoren. Allerdings gehen die in solchen Chips gespeicherten Bits verloren, sobald der Computer ausgeschaltet wird oder auf Grund eines Systemfehlers abstürzt.

Inzwischen gibt es zwar auch nichtflüchtige Chips, die keine externe Stromversorgung benötigen, um Informationen über einen längeren Zeitraum zu bewahren, doch auch diese eignen sich derzeit noch nicht als vollwertiger Ersatz der HDDs. Eine Variante davon, die Flash-Speicher, verrichten allerdings bereits in Smartphones, MP3-Playern, USB-Sticks und anderen elektronischen Kleingeräten ihren Dienst (Spektrum der Wissenschaft 7/2009, S. 94). Bei jedem Schreibvorgang wird eine solche Speicherzelle – sie entspricht einem Bit – durch die notwendige hohe elektrische Spannung aber strukturell verändert und hält daher nur etwa 10 000 Zyklen. Wegen ihrer geringen Kosten avancierten Flash-Speicher dementsprechend zu einer der heute wichtigsten Speichertechnologien, doch nur bei Anwendungen, in denen die Daten nicht sehr oft geändert werden.

Alles in allem wartet die Informationstechnologie also auf den optimalen Speicher: einen Chip mit hoher Datendichte und geringem Stromverbrauch, der billig, schnell, zuverlässig und nichtflüchtig ist. Forschergruppen in der ganzen Welt untersuchen dazu verschiedene Konzepte, um diesen Anforderungen gerecht zu werden. Darunter befinden sich auch Memristoren genannte Komponenten (siehe Kasten auf S. 95) sowie spintroni-

In Kürze

- ▶ Bei den so genannten **Rennstreckenspeichern** (*racetrack memories*, RMs) bewegen sich magnetisch gespeicherte Bits entlang von Nanodrähten.
- ▶ RMs sind nichtflüchtig – sie bewahren die Daten auch, wenn der Strom abgeschaltet wird – und benötigen **keine mechanischen Komponenten** wie die Festplattenspeicher.
- ▶ Bereits Speicher mit horizontal angelegten »Rennstrecken« könnten heutigen nichtflüchtigen Flash-Speichern überlegen sein. Anordnungen mit vertikalen Nanodrähten hingegen dürften **die Speicherdichte von Festplatten deutlich übertreffen**.

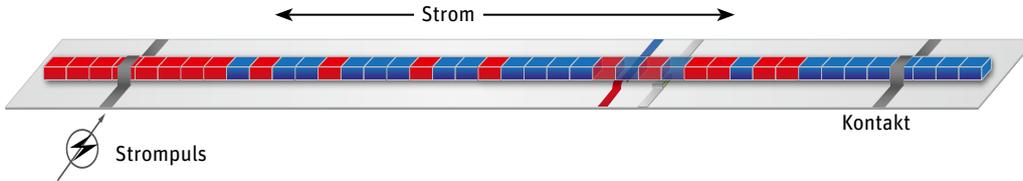
TECHNIK & COMPUTER

Jegliche Information, vom simplen Buchstaben bis zu simulierten Daten künftigen Klimas, wird in der Digitaltechnik durch Bitfolgen mit Null oder Eins repräsentiert. Sie schnell abrufen und verlässlich speichern zu können, ist eine technische Herausforderung.

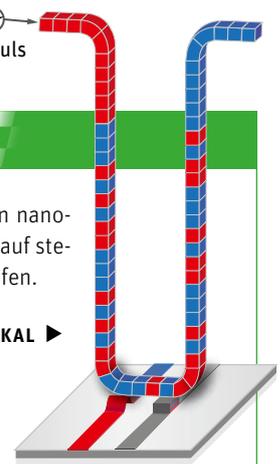
[DESIGN] RENNSTRECKEN FÜR DATEN

Rennstrecken speichern Daten als magnetisierte Bereiche, die so genannten Domänen (rot und blau) in nanoskaligen Drähten. Diese Nanodrähte können horizontal angeordnet sein (links) oder als vertikale Säulen darauf stehen (rechts). Strompulse verschieben die Domänen entlang der Nanodrähte zu ortsfesten Schreib-Lese-Köpfen.

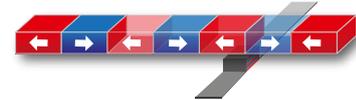
HORIZONTAL ▼



VERTIKAL ▶



Lesen



Ein Tunnelkontakt-Sensor (grau) registriert Änderungen der Magnetisierungsrichtung der Domänen, die über ihn hinwegwandern.

Schreiben



Ein separater Nanodraht mit zwei entgegengesetzt magnetisierten Bereichen verwendet das Streufeld der Domänenwand, um Bits auf die Rennstrecke zu schreiben. Die Wand wird durch Strompulse unter der Rennstrecke hin- und herbewegt.

LUCY READING-IKKANDA

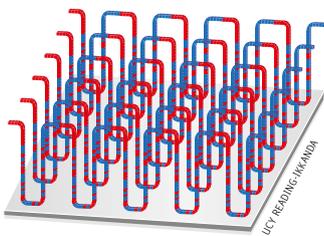
sche Bauelemente, in denen das magnetische Moment eines Elektrons, der so genannte Spin, zum Informationsträger wird (Spektrum der Wissenschaft 8/2002, S. 28).

Eine viel versprechende Variante spintronischer Speicher habe ich 2002 erstmals vorgeschlagen: *racetrack memories* (RMs), zu Deutsch »Rennstreckenspeicher«. Sie prägen Bits nichtflüchtig als magnetisierte Bereiche, so genannte Domänen, in Nanodrähte ein; ein beliebig oft wiederholbarer Vorgang. Auf diesen ferromagnetischen Elementen flitzen die Informationen hin und her (daher der Name) und passieren unterwegs einen ortsfesten Lesekopf. Jegliche Mechanik entfällt also. Zu Säulen angeordnet erschließen diese Rennstrecken zudem die dritte Dimension und ermöglichen deshalb wesentlich höhere Datendichten bei vergleichbaren Abmessungen als eine HDD oder andere zweidimensionale Speicher.

Nun ist Spintronik keineswegs eine Neuerung in der Datentechnik, sondern bereits seit den späten 1980er Jahren integraler Bestandteil aller Festplattenlaufwerke. Bei ihrer Einführung in den 1950er Jahren hatten Festplatten die Ausmaße von Kühlschränken, und die Kosten pro Bit waren entsprechend hoch. Die wichtigste Kenngröße, die Flächendichte, also die Anzahl von Datenbits pro Flächeneinheit, wuchs jährlich nur um 25 Prozent. Denn ein Bit konnte nur so weit verkleinert werden, dass der magnetische Fluss durch eine Spule, die im Lesekopf über das Bit flog, ausreichte, um in der Wicklung eine Spannung zu induzieren. Erst die Entwicklung spintronischer

Leseköpfe, wie sie erstmals von IBM verbaut wurden, brachte den Durchbruch, und innerhalb von fünf Jahren wuchsen die Speicherkapazitäten um das Tausendfache. Würde man heute alle Laufwerke, die in einem Monat hergestellt werden, zu einem einzigen Datenpool zusammenschließen, ließen sich über 200 Exabytes – das sind $2 \cdot 10^{20}$ Bytes – darauf ablegen: genug, um alles, was weltweit auf Papier, Film oder Videobändern aufbewahrt wird, in digitaler Form zu archivieren.

Die spintronischen Leseköpfe, so genannte Spin-Ventil-Strukturen, basieren auf dem Riesenmagnetowiderstand (*Giant Magnetoresistance*, GMR), den die Gruppen um Albert Fert an der Université Paris-Sud und Peter Grünberg am Forschungszentrum Jülich 1988 unabhängig voneinander entdeckt haben und die dafür 2007 mit dem Physik-Nobelpreis ausgezeichnet wurden. Sie fanden heraus, dass eine Sandwichstruktur aus nur wenige Nanometer dicken Lagen von magnetischen und nichtmagnetischen Materialien einen elektrischen Widerstand besitzt, der über Magnetfelder gesteuert werden kann. Es hat einige Jahre Forschungsarbeit gekostet, bis ich mit meinen Kollegen bei IBM diese Entdeckung in einem serienreifen Produkt anwendbar machen konnte. Unsere Spin-Ventil-beziehungsweise magneto-resistive Sensoren waren zu dieser Zeit die empfindlichsten Detektoren für schwache Magnetfelder bei Raumtemperatur, und das bedeutete: Die Bits durften immer weiter schrumpfen, denn nicht mehr der magnetische Fluss, eine flächenabhängige Größe, war von Bedeutung, um ihre magne-



Ein dreidimensionaler Speicherchip aus vertikal angeordneten Rennstrecken würde Speicherdichten enthalten, die jene von Festplatten bei Weitem übersteigen und darüber hinaus ohne bewegliche Teile auskommen würden.

tische Ausrichtung und damit ihre gespeicherte Information – Null oder Eins – zu detektieren, sondern die Feldstärke.

Und das alles verdanken wir dem Spin, einer grundlegenden quantenphysikalischen Eigenschaft von Elektronen. Vereinfacht ausgedrückt entspricht er einem magnetischen Moment, das entsteht, weil diese Elementarteilchen um ihre eigene Achse rotieren und jegliche Bewegung elektrischer Ladung ein solches Moment hervorbringt (man denke dabei nur an das Magnetfeld, das eine stromdurchflossene Spule erzeugt). Der Spin besitzt eine Richtung, und die wird zunächst von der Drehachse des Elektrons vorgegeben. Gerät dieses in ein Magnetfeld, muss er sich entweder parallel oder antiparallel dazu ausrichten (Spin-up beziehungsweise Spin-down). Und damit kommen wir allmählich zum Funktionsprinzip der Spin-Ventil-Sensoren.

In einem elektrischen Strom, der durch einen nichtmagnetischen Kupferleiter fließt, sind beide Spinorientierungen gleichermaßen vertreten. In magnetischen Metallen wie der Nickel-Eisen-Legierung Permalloy hingegen gibt es mehr Spin-up- als Spin-down-Quantenzustände. Um dort hindurchzuwandern, sind die Elektronen gezwungen, sich anzupassen: Sie werden polarisiert. Beispielsweise bewirkt Permalloy, dass bis zu 90 Prozent der eintretenden Elektronen mit Spin-up herauskommen. Dazu müssen die Ladungsträger allerdings Energie aufwenden, was als höherer elektrischer Widerstand messbar ist.

Kleinere Bits dank Spinpolarisation

Dieses Phänomen ist nun die Grundlage des Spin-Ventil-Sensors, der aus zwei dünnen Schichten aus magnetischem Metall besteht. Eine wenige Nanometer dicke Lage nichtmagnetischen Materials dazwischen entkoppelt beide voneinander. Die Magnetisierung der ersten Schicht ist festgelegt, die Ausrichtung der zweiten hingegen entspricht immer der des gerade überflogenen Speicherbereichs der Festplatte. Sind nun die Magnetisierungen parallel zueinander ausgerichtet, finden die in der ersten Schicht spinpolarisierten Elektronen in der zweiten passende Zustände und können leicht hindurchfließen: Bei antiparalleler Orientierung hingegen erfahren sie einen deutlich höheren Widerstand. Dieser Effekt ermöglichte es, Feldstärken sehr empfindlich zu messen, und das bedeutet, Bits in deutlich kleinere Domänen zu packen.

Die Entwicklung schritt rasch voran, und schon nach einer Dekade übernahm eine neue Spintronik-Technologie das Regiment bei Schreib-Lese-Köpfen: Magnetische Tunnelkontakte (*magnetic tunnel junctions*, MTJs) er-

reichen eine noch höhere Sensitivität, indem die magnetischen Schichten durch eine dünne Lage eines Isolators getrennt werden. Die spinpolarisierten Elektronen müssen in diesem Fall durch den Isolator hindurchtunneln, ein quantenmechanischer Effekt, der keine Entsprechung zur normalen Stromleitung hat. Im Endeffekt reagieren die Tunnelströme noch empfindlicher auf die relative Ausrichtung der Magnetisierungen als im GMR-Sensor, was den Unterschied zwischen den beiden Zuständen des Widerstands noch einmal vergrößert und damit die Empfindlichkeit des Sensors erhöht.

Alles in allem haben spintronische Leseköpfe die Speicherkapazität der Festplatten immens gesteigert und die Kosten auf etwa sieben Cent pro Gigabyte gesenkt. Insgesamt also eine Erfolgsgeschichte, bliebe nicht das grundlegende Problem der auf beweglichen Teilen basierenden Bauweise bestehen. Es droht der *head crash*. Ohnehin ist viel Energie nötig, um solch eine Platte mit 7200 Umdrehungen pro Minute rotieren zu lassen, egal wie klein die zu schreibende oder zu lesende Datenmenge auch sein mag. Und schließlich dauert es selbst bei diesem hohen Rotationstempo millionenmal länger, den Lesekopf an die Stelle mit den auszulesenden Daten zu fahren, als diese aus einem Halbleiterspeicher zu holen.

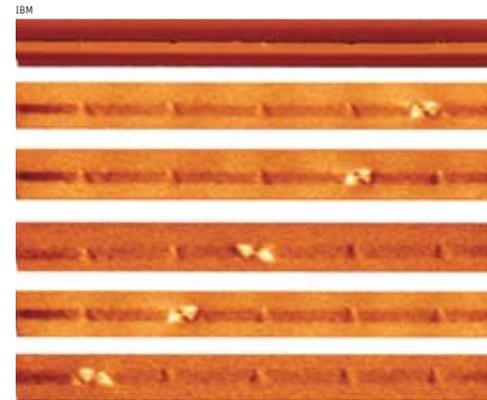
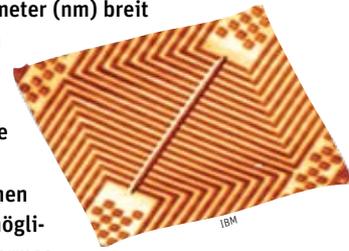
Viele alternative Konzepte basieren auf einem Bauteil, dessen Widerstand auf die eine oder andere Weise geändert wird. Sie alle benötigen mindestens einen Transistor, der mit jedem Element des Speichers in Reihe geschaltet sein muss, um den Widerstand auszulesen beziehungsweise zu schreiben. Typischerweise wird für beide Vorgänge jeweils ein Transistor verwendet; dessen Größe und Leistungsfähigkeit bestimmt weitgehend die Kosten des Speichers. Ungeachtet enormer Fortschritte ist der billigste davon, der Flash-Speicher, pro Bit noch immer 20- bis 100-mal so teuer wie eine HDD.

Meine Kollegen bei IBM und ich schlugen 1995 einen nichtflüchtigen Spintronik-Speicher vor, der Informationen nicht durch magnetische Tunnelkontakte ausliest, sondern diese vielmehr direkt in Form der zwei möglichen Zuständen des Tunnelkontakts ablegt. Solche magnetischen RAMs oder MRAMs werden seit 2006 von Freescale Semiconductor, einem Ableger von Motorola, verkauft.

Ein völlig neues Prinzip verwenden wir nun für unsere Rennstrecken, nur wenige Nanometer dicke Drähte aus Permalloy oder anderen magnetischen Metallen. Bits werden dort zu Domänen mit jeweils einer von zwei möglichen Magnetisierungsrichtungen. Genau wie

In dieser Testvariante eines Rennstreckenspeichers wird ein Nanodraht aus der hochmagnetischen Nickel-Eisen-Legierung Permalloy verwendet, der 300 Nanometer (nm) breit und 40 nm

dick ist. Weitere Nanodrähte unterhalb des einzelnen Drahts ermöglichen die Vermessung der magnetischen Domänenwände. Dies ist eine von Hunderten verschiedener Rennstreckenstrukturen auf dem IBM-Forschungsschip »Aqueduct«.



Eine Domänenwand (heller Fleck in Gestalt einer Fliege) bewegt sich in kontrollierten Etappen längs einer 300 nm breiten Rennstrecke. Die Aufnahme eines Rasterkraftmikroskops (oberer Streifen) zeigt Einbuchtungen am Rand des Nanodrahts, in denen die Domänenwände einrasten können, wenn kein Strom fließt. Die Folge von Aufnahmen darunter zeigt die magnetische Feldstärke, die über der Wand am größten ist. Bisher ist es gelungen, bis zu sechs Bereichsgrenzen gleichzeitig zu kontrollieren.

bei einer HDD bewahren sie ihren Zustand unabhängig von einer externen Stromversorgung. Anders als bei einer Festplatte aber muss sich das Speichermedium nicht bewegen, um beschrieben oder ausgelesen zu werden. Stattdessen rasen die Bits selbst auf so einem Nanodraht hin und her und passieren dabei einen ortsfesten Schreib-Lese-Kopf. Anders als bei einem Festkörperspeicher heutiger Bauart wird deshalb auch nicht ein Transistor pro Bit benötigt, sondern es genügen wenige Transistoren für Hunderte von Bits.

Die Idee, magnetisch gespeicherte Daten wandern zu lassen, anstatt das Speichermedium selbst zu bewegen, ist nicht neu. In so genannten Magnetblasenspeichern (*bubble memories*), die vor allem in den 1970er Jahren populär waren, bewegten sich ebenfalls kleine, blasenförmige, magnetische Domänen zu einer Lesestation. Das Konzept, das komplexe Magnetfelder erforderte, wurde allerdings von den kleiner und schneller werdenden Platten- und Festkörperspeichern aus dem Feld geschlagen.

Um gegen deren Konkurrenz zu bestehen, muss der Lese- beziehungsweise Schreibvorgang einfach, zuverlässig und schnell zu be-

werkstelligen sein. Den Schlüssel, Bits entlang der Rennstrecke zu bewegen, stellen die Domänenwände dar, die sich überall dort ausbilden, wo zwei Bereiche mit entgegengesetzter Ausrichtung – Null und Eins – aufeinandertreffen. Zunächst denkt man vielleicht daran, die Magnetisierungsrichtung eines Bereichs in unmittelbarer Nähe zu einer solchen Wand durch ein äußeres Feld umzuklappen und die Wand auf diese Weise um ein winziges Stück zu verschieben. Bedauerlicherweise befördert dieser einfache Mechanismus Datenbits nicht weiter, sondern löscht sie: Wirkt ein in Eins-Richtung orientiertes Magnetfeld auf eine Null-Domäne zwischen zwei Eins-Bereichen, wandern ihre beiden Grenzen aufeinander zu: Der Eins- wächst auf Kosten des Null-Bereichs.

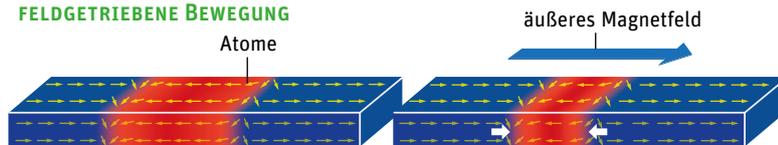
Doch wir haben einen Trick gefunden, um dieses Problem zu lösen: Wir schicken einen elektrischen Strom durch den Draht und nutzen das Phänomen der Spinpolarisierung. Betrachten wir wieder eine Eins-Null-Eins-Anordnung. Der erste Bereich polarisiert den Spin eines Elektrons, so dass es mit einer Magnetisierung in Eins-Richtung auf die Wand zur Null-Domäne trifft. Dort orientiert sich der Spin neu, um weiterzukommen. Nun ist der Spin ein Drehimpuls, und damit gilt ein Erhaltungssatz: Der Gesamtdrehimpuls in einem System bleibt konstant. Damit also das Elektron von Spin Eins auf Spin Null umklappen kann, muss an anderer Stelle das Gegenteil passieren. Tatsächlich kompensieren die wandnahen Atome auf der Null-Seite die Veränderung, indem sie ihr eigenes magnetisches Moment neu ausrichten. Mit anderen Worten: Sobald spinpolarisierte Elektronen eine Domänenwand durchqueren, schieben sie diese entlang der Stromrichtung durch den Draht, Atom für Atom. Erreicht ein Elektron nun die Wand zwischen Null und Eins, ändert es erneut seine Orientierung, und wieder muss ein Atom seinen eigenen Drehimpuls anpassen. Auch diese Wand verschiebt sich demnach also in Stromrichtung (siehe Grafik links). Letztlich wandert das Null-Bit durch den Draht, und zwar ohne Längenänderung. Bisher konnte meine Arbeitsgruppe im Labor zeigen, dass Nanosekunden-Pulse eines Stroms bis zu sechs Domänenwände im Gleichtakt verschieben können, mit einer Geschwindigkeit von gut 150 Nanometer pro Nanosekunde. Zugriffszeiten im Nanosekundenbereich werden so möglich, millionenfach schneller als in HDDs und in der Größenordnung von flüchtigen Festkörperspeichern.

Allerdings können die Wände ihre Lage auch unkontrolliert verändern, etwa als Folge kleiner Leckströme oder magnetischer Streufelder, oder weil die Steuerpulse die erforder-

[PHYSIK] SPIN BEWEGT BITS

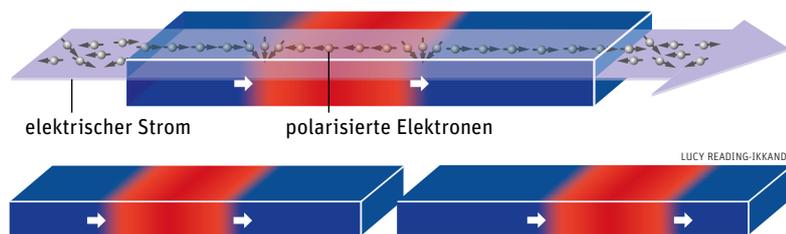
Magnetische Domänen mit Hilfe eines elektrischen Stroms längs eines Nanodrahts zu bewegen, ist für die Rennstreckenspeicherung essenziell (unten). Ältere Ansätze, die Magnetfelder nutzen, sind komplizierter (oben).

FELDGETRIEBENE BEWEGUNG



Domänen, die Nullen oder Einsen repräsentieren, enthalten Atome, deren Magnetisierungen (gelbe Pfeile) ausgerichtet sind. Diese Orientierung ändert sich in der Nähe der Domänenwand. Legt man ein äußeres Magnetfeld an, beispielsweise in Eins-Richtung (blauer Pfeil), richten sich die Atome neu aus: Die Wand wandert. Weil die Grenzen aber aufeinander zulaufen, schrumpft die Null-Domäne und verschwindet.

STROMGETRIEBENE BEWEGUNG



Elektronen (grau) eines Stroms werden spinpolarisiert – ihr Spin und der damit verbundene Magnetismus richten sich im Nanodraht aus. Wandern sie nun von einem Eins- in einen Null-Bereich, kehrt sich ihre Orientierung um. Weil der Spin aber eine Form des Drehimpulses ist und damit eine Erhaltungsgröße, muss ein Atom zum Ausgleich sein magnetisches Moment umkehren. Auf diese Weise bewegen sich alle Domänenwände in derselben Richtung, und die Bits wandern den Draht entlang.

Forscher arbeiten zurzeit an verschiedenen neuartigen Technologien zur Datenspeicherung, deren Ansatz verglichen mit Rennstrecken aber eher traditionell ist – die Bits befinden sich in einer zweidimensionalen Anordnung auf einem Siliziumträger. Um Kapazitäten zu erreichen, die mit vertikalen RMs oder Festplatten vergleichbar sind, müssten diese gestapelt werden.

Resistive Random Access Memory (RRAM) verwendet Materialien, deren elektrischer Widerstand zwischen zwei oder mehreren wohl definierten Größen geschaltet werden kann, etwa Nanoschichten aus Metalloxiden, so genannte memristive Materialien. Dieser Effekt wird üblicherweise durch die Ausbildung von gut leitenden Filamenten im Oxid erklärt. Hewlett-Packard plant, einen auf memristiven Materialien basierenden Prototyp zu realisieren, in denen diffundierende Sauerstoffatome den Widerstand ändern.

Phase-Change Memory (PRAM) basiert auf Chalkogenid-Gläsern, derselben Materialklasse, die auch für wiederbeschreibbare CDs und DVDs verwendet wird. Diese Materialien haben

einen kristallinen Zustand mit geringem elektrischem Widerstand und einen amorphen (glasartigen) Zustand mit hohem Widerstand. Ein Strompuls heizt das Chalkogenid auf, und je nachdem, ob es schnell oder langsam abkühlt, geht es in den einen oder anderen Zustand über. Im Jahr 2006 hat die Firma BAE Systems einen PRAM mit 512 Kilobyte vorgestellt, der strahlungsfest ist und sich somit für den Einsatz im All eignet. Numonyx, ein gemeinsamer Ableger von Intel und STMicroelectronics, begann Ende 2008, seinen 16-MB-Chip »Alverstone« kommerziell zu vermarkten.

Spin Transfer Torque MRAM (STT-MRAM) ist eine neue Art von magnetischem RAM. MRAMs speichern Daten in Form von Magnetisierungsrichtungen. Das Schreiben erfolgt normalerweise über Magnetfelder, während ein STT-MRAM dafür spinpolarisierte Ströme verwendet. Das ermöglicht kleinere Bits und geringeren Energieverbrauch. STT-MRAMs entwickeln unter anderem die Firmen Everspin, Grandis, Hynix, IBM-TDK, Samsung und Toshiba.

liche Stärke und Dauer nicht präzise genug einhalten. Dem lässt sich konstruktiv begegnen: durch seitliche Einbuchtungen des Leiters im Abstand der gewünschten Bitgröße. Die Domänengrenzen rasten dort ein, weil sie an diesen Engstellen die kleinste Fläche und damit die geringste Energie erreichen; Steuerpulse können sie aber weiterhin verschieben.

Eroberung der Vertikalen

Die Grenzen zwischen den Domänen können viele verschiedene Formen annehmen. Interessant sind vor allem magnetische »Vortices«, deren Magnetisierung ein kompliziertes, strudelartiges Muster mit einem Auge im Zentrum aufweist. Solche Wände sollten sogar mit geringeren Strömen zu befördern sein, da es genügt, nur das Auge zu verschieben. Noch vielversprechender sind Domänen, die nicht in Richtung des Drahts, sondern senkrecht dazu aufgebaut werden. Die Nanodrähte können dann noch schmaler sein, und zur Verschiebung der Bereichswände sollten schwächere Ströme ausreichen.

Schließlich lassen sich, wie schon erwähnt, die Nanodrähte auch als Säulen vertikal auf einer Siliziumscheibe anordnen. Mit der dritten Dimension sollte die Dichte der Datenspeicherung noch einmal sprunghaft ansteigen. Der Festplatte und den siliziumbasierten Festkörperspeichern hingegen, die nur in zwei Dimensionen funktionieren, sagen viele Analysten voraus, dass ihre Miniaturisierung schon in den nächsten zehn Jahren an physikalische Grenzen stoßen wird. Allerdings könnte sich die wirtschaftliche Fertigung robuster vertikaler Rennstrecken auf Siliziumchips als große Herausforderung erweisen. Die Mehrzahl der

Experimente meiner Gruppe finden daher noch an horizontal auf dem Wafer angeordneten Nanodrähten statt. Deren Speicherkapazität wäre zwar lediglich mit der von Flash-Speichern vergleichbar, dafür aber sind sie deutlich schneller, energiesparender und langlebiger. Vertikale Nanodrähte haben wir im Labor gebaut, bisher konnten wir leider noch keine Vorrichtungen zum Schreiben oder Lesen der Domänenwände integrieren.

Apropos: Wie kommen die Daten überhaupt auf die Rennstrecke, und wie werden sie gelesen? Letzteres erfolgt mit bewährter Technik: den Tunnelkontakten. Problematisch ist hingegen noch das Schreiben. Dazu verwenden wir derzeit unterschiedliche Ansätze, zum Beispiel einen elektrischen Leiter, der unter dem RM entlangläuft und der – stromdurchflossen – ein Magnetfeld erzeugt, das im Nanodraht eine Domäne ausrichtet. Das Fernziel lautet, für diesen Vorgang ebenfalls einen Nanodraht zu nutzen, genauer gesagt eine durch Strompulse verschiebbare Domänenwand. Ihr magnetisches Streufeld könnte die Atome der Rennstrecke ausrichten. Freilich muss man dafür ein magnetisches Material wählen, das von dem geschriebenen Bit nicht seinerseits beeinflusst wird.

Zugegeben, die Entwicklung der RM-Speicher steht in harter Konkurrenz zu den intensiven Bemühungen, die Speichertechnologie unter Verwendung eher traditioneller Technologien weiterzuentwickeln. Forschungsgruppen weltweit wetteifern darum, ihren jeweiligen technologischen Ansatz in ein kommerzielles Produkt umzusetzen. Es wird spannend zu sehen sein, welche Technologie als Erste die Ziellinie überquert. ◀



Stuart S. P. Parkin ist IBM Fellow, Manager der Magnetoelektronikgruppe am IBM Almaden Research Center und an der Stanford University in San José, Kalifornien, sowie Consulting Professor am Department for Applied Physics der Stanford University; außerdem ist er Direktor des IBM-Stanford Spintronic Science and Applications Center. Die Redaktion dankt Andreas Ney, einem ehemaligen Mitarbeiter Parkins und jetzt an der Universität Duisburg-Essen mit der Erforschung spintronischer Materialien befasst, für seine Unterstützung.

Parkin, S. P. et al.: Magnetic Domain-Wall Racetrack Memory. In: Science 320, S. 190–194, 11. April 2008.

Parkin, S. P.: Spin-Polarized Current in Spin Valves and Magnetic Tunnel Junctions. In: MRS Bulletin 31, S. 389–394, Mai 2006.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/1006324.

SEE- UND FLUSSDEICHE

Ein Wall gegen das Wasser

An den Küsten schützen Deiche seit Jahrhunderten vor Sturmfluten, an Flüssen vor Hochwasser.

Die Baustoffe kommen auch heute noch meist aus der Natur.

Von Jochen Steiner

Mit 130 Kilometer pro Stunde raste der Orkan Vincinette in der Nacht des 16. Februar 1962 über Norddeutschland hinweg, peitschte die See auf und trieb Welle auf Welle in die Elbe. Gegen 22 Uhr brach in Cuxhaven der erste Deich, wenige Stunden später hielten auch Hamburgs Dämme die Wassermassen nicht mehr auf. Viele Bewohner wurden im Schlaf überrascht, mehr als 300 Menschen starben. In schrecklicher Erinnerung haben viele auch noch das Hochwasser der Oder im Sommer 1997. Infolge starker Niederschläge in den tschechischen und polnischen Gebirgsregionen wurden dort weite Landesteile überflutet, mehr als 100 Todesopfer waren zu beklagen. Im Bereich des so genannten Oderbruchs in Brandenburg mussten tausende Menschen evakuiert werden. Der Sachschaden belief sich in Deutschland auf 250 Millionen Euro, in Polen und Tschechien waren es gar 2,8 Milliarden Euro.

Der Kampf gegen Sturmfluten oder Hochwasser ist so alt wie die Versuche, in überschwemmungsgefährdeten Gebieten zu siedeln. Schon um das Jahr 1000 n. Chr. umgaben Ringdeiche wertvolle Ackerflächen in Norddeutschland. Bereits Anfang des 13. Jahrhunderts war die gesamte deutsche Nordseeküste durch eine geschlossene Deichlinie gesichert, ihre Nutzung und Instandhaltung wurde gesetzlich geregelt. Seine Erfahrungen als Deichrichter fasste der friesische Landwirt Albert Brahm (1692–1758) in »Anfangsgründe der Deich- und Wasser-Baukunst« zusammen; das Werk markierte den Beginn des Küsteningenieurwesens.

Hohe Wellen können vor allem dann große Schäden anrichten, wenn sie mit voller Wucht an den Bauwerken aufprallen. Deshalb besitzt die dem Meer zugewandte Böschungsseite ein Gefälle von nur 16 Prozent. Wie an einem lang auslaufenden Strand auch zerlaufen selbst große Brecher darauf zu kleinen, ungefährlichen Wellen. Allerdings beansprucht diese Bauweise viel Platz, was die beachtliche Breite wichtiger Seedeiche erklärt: In Niedersachsen und Bremen sind heutige Hauptdeiche bis zu 9,5 Meter hoch und bis zu 100 Meter breit. Die vom Meer abgewandte Seite verläuft mit 33

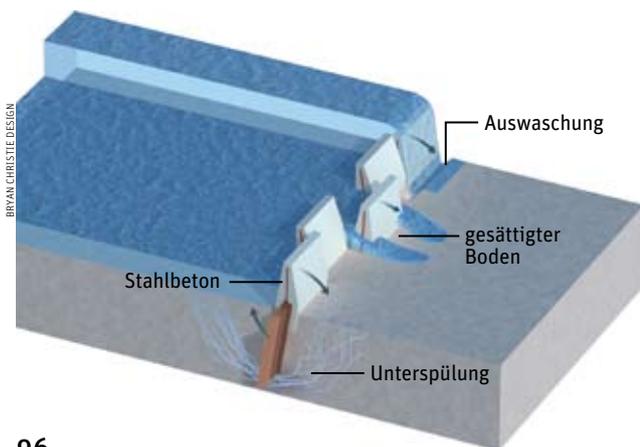
Prozent so steil, wie es bei Flussdeichen üblich ist. In die Auslegung solcher Wasserbauwerke gehen Berechnungen und Statistiken über die maximal zu erwartenden Pegelstände bei Sturmflut oder Hochwasser ein, zudem wird für den Schutz der Küsten ein möglicher, durch Klimawandel bedingter Anstieg des Meeresspiegels in den nächsten 100 Jahren berücksichtigt.

Der wichtigste Baustoff an den deutschen Küsten ist heute wie zu Brahm's Zeiten der Klei, eine Mischung aus Ton, Schluff und Sand mit organischen Anteilen, der im Schwemmland anzutreffen ist. Noch vor ein paar Jahrzehnten bestanden die Deiche zum großen Teil daraus, inzwischen überzieht man damit einen Kernbereich aus Sand, auf der Seeseite mit rund 1,5 Metern, auf der Landseite genügt etwa ein Meter. Eine beidseitige Klei-Isolierung des Kerns ist sinnvoll, denn bei Sturmflut können hohe Wellen über die Deichkrone schwappen. Entlang von Flüssen ist diese Gefahr geringer, dort wird nur die dem Strom zugewandte Seite mit einer Lehm-schicht geschützt.

Doch kein Deich ist vollständig wasserdicht. Deshalb führen Drainagerohre Sickerwasser und Niederschläge vom Kern in Längsgräben auf der Landseite ab. Eine effektive Entwässerung ist vor allem im Binnenland wichtig, denn bei Hochwasser müssen Flussdeiche tage- oder gar wochenlang dem Druck der Wassermassen standhalten, ohne aufzuweichen. Eine intakte Grasnarbe hilft durch ihr Wurzelwerk, Böschungen zu stabilisieren.

Wo der Platz für 100 Meter breite Deiche nicht ausreicht, werden heute stählerne Spundwände eingesetzt, jede sechs bis zehn Millimeter dick. Spezialmaschinen rammen die bis zu zwölf Meter lange Wandteile zwei bis drei Meter tief in den Boden und verstärken so die Deiche oder ersetzen sie ganz, wie etwa in Hamburg oder Cuxhaven. Billiger sind Betonwände, doch diese lassen sich nur in Bereichen nutzen, die keinem hohen Druck ausgesetzt sind.

JOCHEN STEINER ist freier Wissenschaftsjournalist in Mainz.

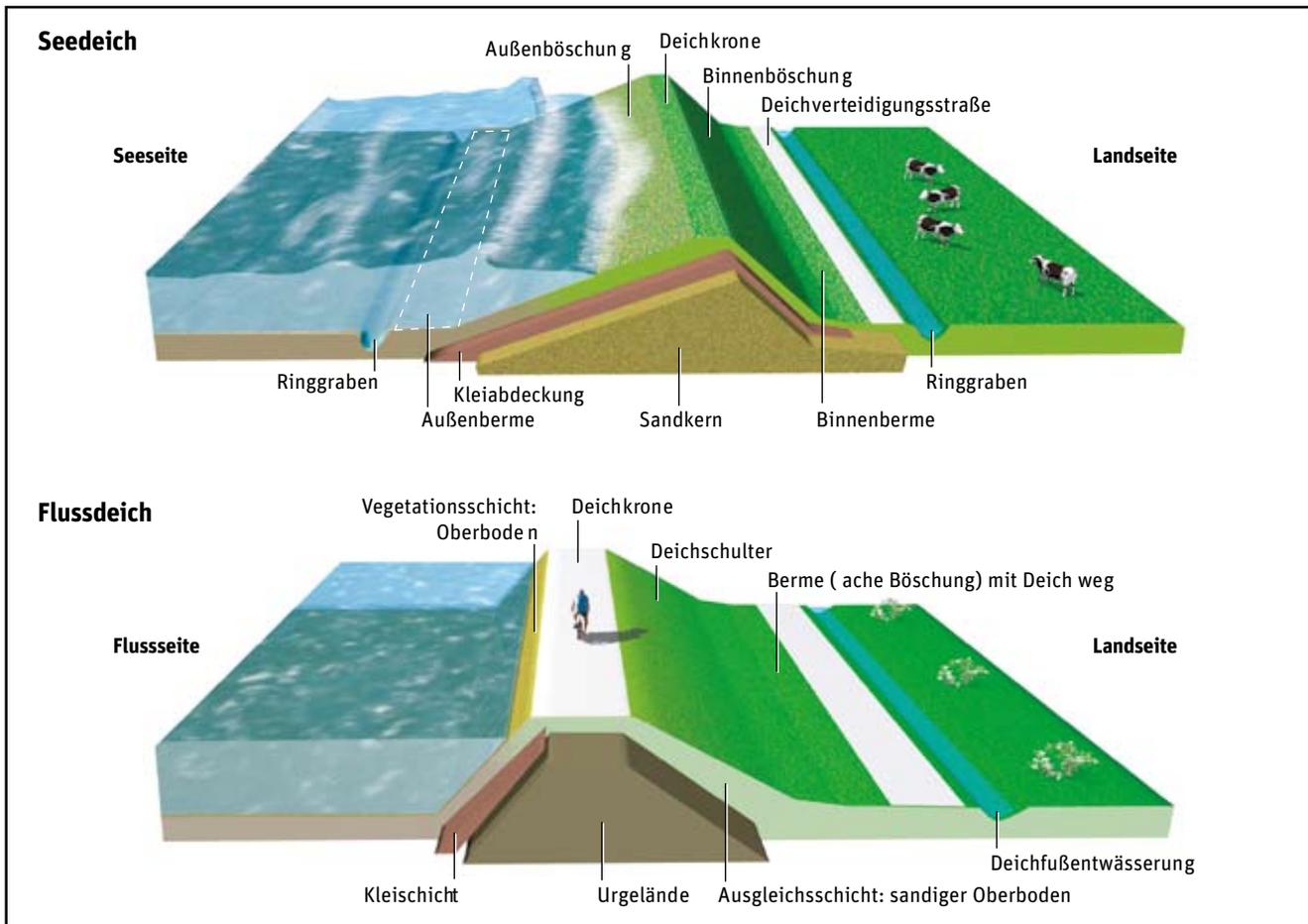


See- und Flussdeiche (rechts) folgten jahrhundertlang bewährten Bauprinzipien. So verläuft eine meerzugewandte Böschung flacher, um anbrandenden Wellen die Kraft zu nehmen. Entlang von Kanälen lassen sich auch Spundwände und Stahlbetonplatten einsetzen (links). Bricht ein Deich, hat möglicherweise überlaufendes Wasser Böschung und Boden aufgeweicht, das Fundament geschwächt und eventuell auch Druckwasser den Deich unterspült. Gefährlich ist zudem eine übermäßige Durchfeuchtung: Kann der Deichkern das Wasser nicht mehr aufnehmen, wird Material ausgewaschen.

WUSSTEN SIE SCHON?

- ▶ **Bereits im Mittelalter gab es Gesetze** zum Schutz der Deiche. Verstöße wurden hart bestraft. Das Stedinger Deichrecht von 1424 beispielsweise sah vor, denjenigen lebendig im Deich zu begraben, der durch nachlässige Pflege einen Dambruch verursacht hatte. Wer mutwillig einen Deich beschädigte, sollte verbrannt werden.
- ▶ **Der Erhalt der Deiche** entlang der Küste vom Rheiderland an der niederländischen Grenze bis zur Staustufe Geesthacht an der Elbe liegt heute in den Händen so genannter Deichverbände, in denen die Eigentümer aller im Schutz der Bauwerke liegenden Grundstücke organisiert sind.
- ▶ **Gäbe es in den Niederlanden keine Deiche**, würde bei jedem normalen Tidehochwasser rund ein Drittel des Landes bis zu sechs Meter tief unter Wasser stehen. 60 Prozent der niederländischen Bevölkerung müssten sich dann eine neue Heimat suchen.
- ▶ **Das Forschungszentrum Küste in Hannover** testet die Widerstandsfähigkeit von Deichen in Modellversuchen. In einem langen Wellenkanal können die Wissenschaftler Wellen auf un-

- terschiedliche Bautypen auflaufen lassen. Solche Modellversuche sind notwendig, denn reine Computerberechnungen können nur begrenzt brauchbare Daten liefern.
- ▶ **Rund 7500 Kilometer** der etwa 400 000 Kilometer Fließgewässer in Deutschland werden von Deichen oder Schutzmauern begrenzt. Einen Rekord weist China auf: Der 6300 Kilometer lange Jangtse ist zu mehr als der Hälfte (3385 Kilometer) eingedeicht.
- ▶ **Die Bewohner Venedigs** haben des Öfteren mit Hochwasser zu kämpfen. Um die Fluten der Adria von der Stadt fernzuhalten, entwickelten Experten das Projekt »Modulo Sperimentale Elettromeccanico« (MOSE). An den drei Eingängen zur Lagune sollen fünf Meter dicke, 20 Meter breite und bis zu 30 Meter hohe Stahlkästen, die in Betonfundamenten verankert werden, die Wassermassen zurückhalten. Bei normalen Wasserständen liegen die Stahlkolosse am Meeresgrund. Doch sobald der Wasserspiegel auf 1,10 Meter über Normalnull steigt, wird die künstliche Mauer mittels Druckluft aufgerichtet und Venedig vom offenen Meer abgeriegelt. 2011 sollen die Bauarbeiten abgeschlossen sein.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / MEGANIM

Der mobile KERNSPIN-SCANNER

Durch raffinierte Tricks schrumpft der zimmergroße Kernspintomograf auf handliche Größe. Die tragbare Version der mächtigen Maschine kann die chemische Zusammensetzung und innere Struktur unterschiedlichster Objekte analysieren – von Mumien über Autoreifen bis zu Kunstwerken.

In Kürze

- ▶ Seit Jahrzehnten nutzen Wissenschaftler die Kernspintomografie, um die chemische Zusammensetzung von Materialien zerstörungsfrei zu untersuchen. Mediziner erlaubt die **Kernspintomografie** Einblick ins Innere des menschlichen Körpers.
- ▶ Solche Maschinen sind groß und tonnenschwer, doch nun haben Forscher tragbare Versionen entwickelt. Die NMR-MOUSE erlaubt mobile Fertigungskontrolle, zerstörungsfreie Materialprüfung, archäologische Untersuchungen und **Analyse von Kunstwerken**.
- ▶ Weitere Forschungen könnten beispielsweise einen helmartigen Gehirnschanner liefern, der **schnelle Diagnosen** im Krankenwagen ermöglicht.

Von Bernhard Blümich

Vielleicht wurden Sie selbst oder ein Bekannter schon einmal in einen Kernspintomografen geschoben. Das ist ein ziemlich unangenehmes Erlebnis. Der Patient liegt in der engen Röhre eines zimmergroßen Geräts, das mit gewaltigem Getöse starke Magnetfelder erzeugt. Doch der diagnostische Wert der Hochkontrastaufnahmen, welche die Maschine von den Geweben im Körperinneren herstellt, rechtfertigt die Unbequemlichkeit. Das zu Grunde liegende Prinzip, die Kernspintomografie oder fachsprachlich NMR (für *nuclear magnetic resonance*), erlaubt eine Fülle weiterer Anwendungen. Forscher können damit die chemische Zusammensetzung von Materialien und die Struktur wichtiger Biomoleküle ermitteln, ohne die untersuchten Objekte zu beschädigen.

Seit Langem wünschen sich Ärzte und Wissenschaftler handliche, mobile NMR-Geräte. Beispielsweise käme Sanitätern ein helmartiger Kernspintomograf sehr gelegen, der bereits im Rettungswagen Blutgerinnsel im Gehirn eines Schlaganfallpatienten aufzuspüren vermag. Mit einem kompakten NMR-Spektroskop könnten Kunstexperten die Farben von Gemälden analysieren und dadurch alte Meisterwerke von modernen Fälschungen unterscheiden.

Zwar sind die Forscher noch weit davon entfernt, den handgroßen Tricorder aus der

Fernsehserie »Raumschiff Enterprise« zu bauen, der alles sofort scannt und analysiert. Doch 1993 legten mein früherer Doktorand Peter Blümli und ich am Max-Planck-Institut für Polymerforschung in Mainz die Grundlage für ein tragbares NMR-Gerät. Schließlich fabrizierten wir einen kleinen Apparat zur Materialerprobung, der an Ort und Stelle nützliche Befunde liefern kann. Seither haben auch andere Forscher zahlreiche Anwendungen der mobilen Kernresonanz für chemische Analysen und bildgebende Verfahren entwickelt.

Eine geradezu lächerliche Idee

Vor 15 Jahren spekulierten Blümli und ich halb im Scherz über die einfachste Vorrichtung, die ein brauchbares NMR-Signal bietet. Damals mutete diese Idee geradezu lächerlich an, denn die meisten Forscher gingen in die entgegengesetzte Richtung: Sie entwickelten immer komplexere NMR-Apparate, um möglichst feine Strukturdetails nachzuweisen. Doch wie wir aus unseren früheren Arbeiten an NMR-Techniken für Polymermaterialien wussten, sind teure und große Magnete – und die von ihnen erzeugten homogenen Felder – nicht unbedingt nötig, um gute Bilder zu erhalten.

Wir erkannten: Auch mit den schwächeren und inhomogenen Feldern billiger Dauer- magneten – die freilich 20- bis 50-mal stärker sind als die Haftmagnete an Kühlschrankschürten – lassen sich unterschiedlich zusammengesetzte Gebiete in weichen Materialproben deutlich



FOTO: GRANT DELIN; GEMÄLDE: »NEW DOMESTIC DREAMING« VON KENNETH BROWNE, 2007

Mit einer handlichen NMR-MOUSE analysiert die Chemikerin Eleonora Del Federico am Pratt Institute in New York an einem Gemälde die unterschiedlichen Schichten von Firnis, Farben, Grundierung und Leinwand.

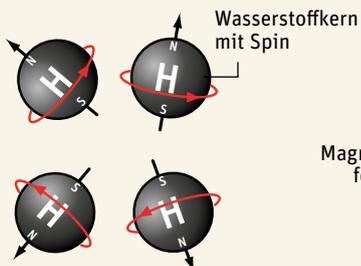
WIE DIE KERNSPINRESONANZ FUNKTIONIERT

Beim NMR-Verfahren (für *nuclear magnetic resonance*) wird die Probe einem Magnetfeld und Radiofrequenzimpulsen ausgesetzt. Die Antwort des Materials gibt Auskunft über die molekulare Zu-

sammensetzung sowie über Materialeigenschaften wie Festigkeit oder Härte. Für medizinische Zwecke werden riesige Kernspintomografen eingesetzt (rechts).

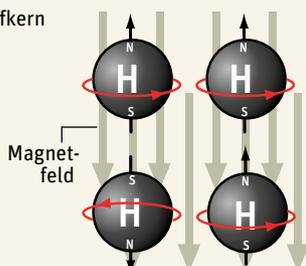
DIE WIRKUNG DES ÄUSSEREN MAGNETFELDS

1 zufällige Orientierung



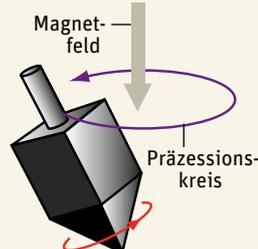
Ohne äußeres Feld rotieren Wasserstoffkerne – Protonen – um beliebige Drehachsen. Ihr Spin bewirkt, dass sie sich wie winzige Stabmagnete verhalten.

3 Spins richten sich aus ...



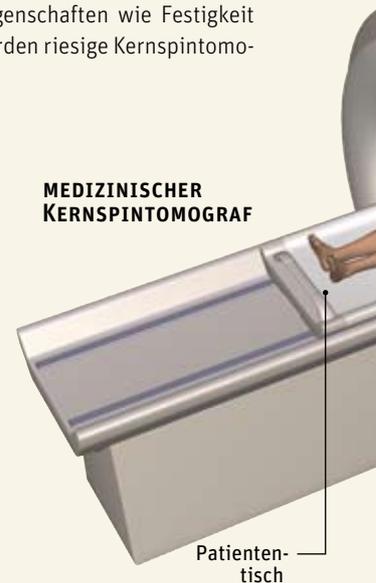
Im Magnetfeld orientieren sich die Spins längs der Feldlinien.

3 ... und taumeln wie Kreisel



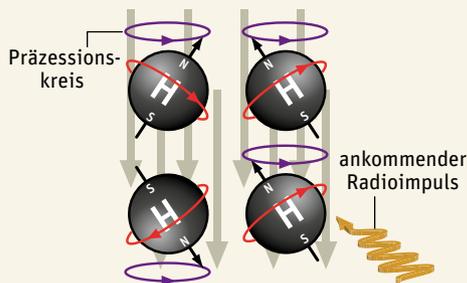
Da die Ausrichtung nicht ganz exakt ist, entsteht Präzession: Die Drehachsen rotieren um die Feldlinien mit einer für den Kerntyp charakteristischen Frequenz.

MEDIZINISCHER KERNSPINTOMOGRAF



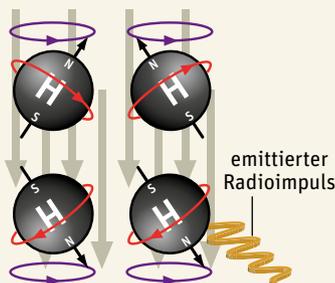
DIE WIRKUNG DER RADIOIMPULSE

1 Spingruppe im Magnetfeld



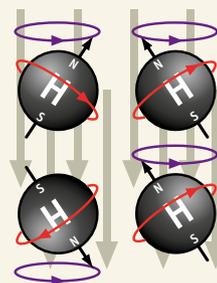
Im äußeren Feld haben die Spins zufällig orientierte Präzession. Wenn ein Radiofrequenzimpuls die Spingruppe erreicht, vermag nur ein zur Impulsfrequenz passender Spin die Impulsenergie zu absorbieren.

2 Spin absorbiert Impulsenergie



Durch die Absorption kippt der Spin um 180 Grad. Alle Kerne, die mit dem Impuls gleichartig wechselwirken, absorbieren dessen Energie und kippen entsprechend. Die Radiospule fängt das dadurch ausgelöste Signal auf und leitet es zu einem Computer.

3 Spins geben Impulsenergie ab



In zufälligen Intervallen geben die gekippten Spins die absorbierte Radioimpulsenergie wieder ab und kehren zu ihrer vorigen Orientierung zurück.

ERGEBNISSE

Der Computer registriert die Zeit, die jeder Spintyp braucht, um die absorbierte Impulsenergie abzugeben (T_1 -Kurve). Außerdem verfolgt er, in welchem Tempo die präzessionierenden Spins zufällig außer Takt geraten (T_2 -Kurve). Zugleich zeichnet er die Präzessionsfrequenz der Spins für verschiedene chemische Gruppen auf und ermittelt daraus die so genannte chemische Verschiebung. Dieser Wert dient als Grundlage für NMR-Spektren, welche die chemischen Gruppen identifizieren – beispielsweise im Kohlenwasserstoffmolekül Toluol (Diagramm »chemische Analyse«). Kernspintomografen kombinieren all diese NMR-Daten zu Innenansichten des menschlichen Körpers (oben rechts).

SPIN-UND DIAGRAMME: LUCY READING/UKANDA; NACH: MORIEL NESSADDER, «ALL YOU REALLY NEED TO KNOW ABOUT MRI PHYSICS», KAP. 2, WWW.SIMPLYPHYSICS.COM

unterscheiden. Blümler entwarf ein Gerät, das die Information liefert, die in einem einzelnen Pixel eines herkömmlichen NMR-Bilds steckt. Wir taufte es NMR-MOUSE (für *nuclear magnetic resonance mobile universal surface explorer*), da wir es wie eine Computermaus verschieben wollten, um größere Objekte abzutasten.

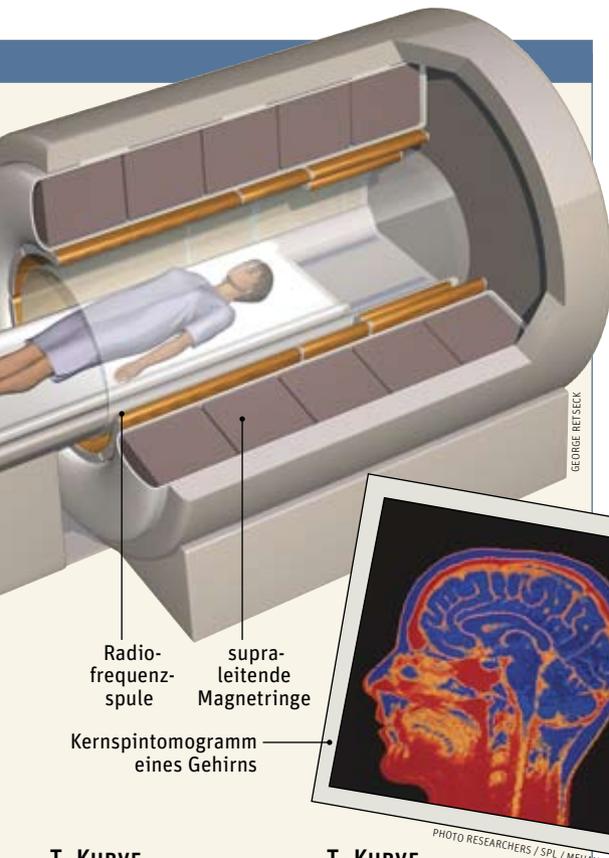
Am faszinierendsten an unserer Erfindung war, dass die Maschine im Prinzip so klein wie eine Kaffeetasse sein kann. Und im Gegensatz zur konventionellen NMR, bei der alle Proben nicht sperriger sein dürfen als der Innendurchmesser der Magnetspulen, konnte man unser Gerät auf der Oberfläche eines beliebig

großen Objekts platzieren, um einen Blick ins Innere zu werfen.

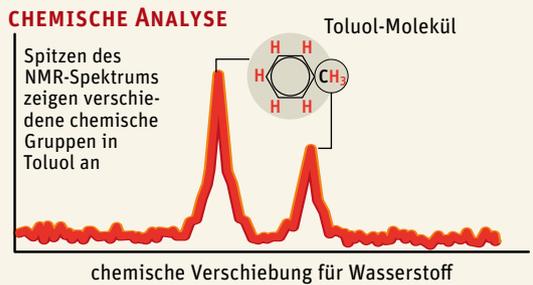
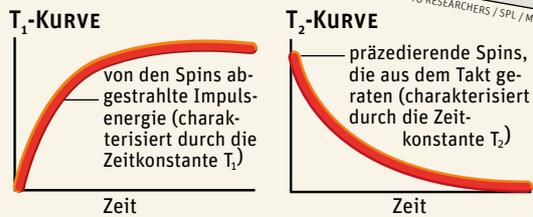
Allerdings gab es ein Problem: das stark inhomogene Magnetfeld der NMR-MOUSE. Nach damaligem Lehrbuchwissen konnte man damit unmöglich chemische Materialanalysen anstellen.

Torkelnde Atomkerne

Dieses Hindernis umgingen wir mit Hilfe eines speziellen Messverfahrens, das im Prinzip wie die übliche NMR auf der so genannten T_2 -Zeitkonstante beruht. Um die klassische hochauflösende NMR-Spektroskopie durchzuführen, steckt man die Materialprobe in ei-



GEORGE REISECK



nen riesigen stationären Magneten, der ein starkes homogenes Feld erzeugt. Diese Technik nutzt die Tatsache, dass die Atomkerne – Bündel positiv geladener Protonen und elektrisch neutraler Neutronen – bei bestimmten Atomsorten wie kleine Kreisel rotieren. Durch diesen Kernspin verhalten sie sich wie winzige Stabmagnete mit Nord- und Südpol (siehe Kasten oben). In einem starken Magnetfeld versuchen sich die rotierenden Stabmagnete an den Feldlinien auszurichten. Diese Orientierung ist aber nicht exakt. Deshalb torkeln die Kerne um die Feldlinien; sie zeigen eine Präzession, ähnlich wie ein Kreisel, auf den eine seitliche Kraft wirkt.

Wenn diese Atomkerne nun ein Energieimpuls im Radiofrequenzbereich trifft, absorbieren sie je nach ihrer individuellen Rotation Energie bei spezifischen Frequenzen und emittieren sie wieder. Diese Frequenzen erzeugen ein NMR-Spektrum, das aus einzelnen Spitzen unterschiedlicher Höhe besteht und wie ein Fingerabdruck Auskunft über die chemischen Bestandteile der Probe gibt. Die Daten lassen sich auch zu einem Bild aufbereiten, das die unterschiedlichen Materialien optisch darstellt.

Genauer gesagt beruht die NMR-Spektroskopie auf der Messung der Präzessionsfrequenzen der Kernspins, wenn diese auf das äußere Magnetfeld und zusätzlich auf die Radiofrequenzimpulse reagieren. Wird eine nichtmagnetische Probe einem Magnetfeld ausgesetzt, richten sich die Spins grob längs der Feldlinien aus. Nachdem ein kurzer Impuls aus einer Radiofrequenzspule die Probe erreicht hat, präzedieren die Kernspins zunächst sehr stark synchron, geraten aber allmählich aus dem Takt und kehren schließlich in ihren ursprünglichen Zustand zurück. Ihre Rückkehr zum Gleichgewicht braucht eine charakteristische Zeit T_1 , während der sie die dem Radioimpuls entnommene Energie wieder abgeben. Diese Relaxationszeit oder Zeitkonstante ähnelt der Halbwertszeit beim radioaktiven Zerfall, die angibt, wie lange es dauert, bis die Strahlung der Probe auf die Hälfte gefallen ist.

Hilfreiche Echos

Die synchrone Präzession der Magnetspins induziert ihrerseits in der Radiospule eine oszillierende Spannung, die mit einer für jeden Spintyp charakteristischen Zeitkonstante T_2 abklingt, während der die Spins aus dem Takt geraten. Um NMR-Spektren zu erzeugen, welche die chemische Zusammensetzung der Probe anzeigen und Bilder liefern, werden die T_1 - und T_2 -Kurven sowie die Präzessionsdaten mathematisch ausgewertet. Daraus ergibt sich beispielsweise die Dichte der Spins in einem bestimmten Volumen der Probe und daraus wiederum der Bildkontrast.

Den Durchbruch zu unserem Gerät brachte die Erkenntnis, dass T_2 auch in inhomogenen Magnetfeldern gemessen werden kann. Schon 1949 hatte der Festkörperphysiker Erwin L. Hahn an der University of Illinois gezeigt, dass sich selbst mit inhomogenen Feldern Messsignale als Antwort auf gepulste NMR-Anregung nachweisen lassen, weil dabei so genannte Echos entstehen. Zwar fällt in solchen Feldern die durch Radioimpuls-Anre-

PIONIERE DER MOBILEN KERNRESONANZ

Forscher in aller Welt haben zu den Fortschritten der mobilen NMR-Technik beigetragen. Zu den führenden Köpfen gehören:

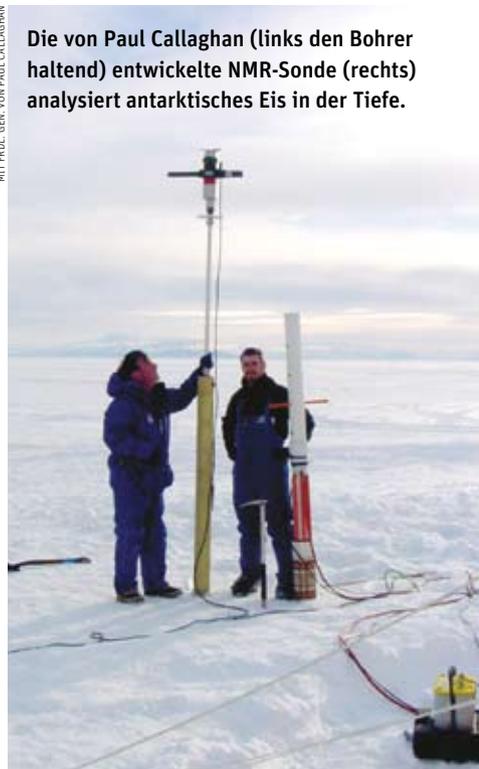
➤ **Paul Callaghan** (Victoria University, Wellington, Neuseeland) förderte die Weiterentwicklung der Kernresonanz-Mikroskopie durch NMR-Methoden für die molekulare Untersuchung von weichen und porösen Materialien, erfand neue tragbare NMR-Spektrometer (siehe Fotografie unten).

➤ **Eiichi Fukushima** (New Mexico Resonance, Albuquerque, New Mexico, USA) erfand NMR-Methoden zur Analyse technischer Prozesse und entwickelte neue mobile NMR-Techniken.

➤ **Alexander Pines** (University of California, Berkeley, USA) erzielte vielfältige Fortschritte, unter anderem in der Festkörper-NMR und für die Signalverstärkung, unter anderem durch so genannte Hyperpolarisation.

Die von Paul Callaghan (links den Bohrer haltend) entwickelte NMR-Sonde (rechts) analysiert antarktisches Eis in der Tiefe.

MIT FÖHL. GEN. VON PAUL CALLAGHAN



gung erzeugte Spulenspannung rapide auf null ab, doch sie kann kurz darauf durch einen zweiten Impuls wiederhergestellt werden. Weitere Impulse erzeugen eine Serie von Echos, die einen so genannten Echozug bilden (siehe Kasten unten). Die Amplituden der Echos in einem Zug fallen mit der Relaxationszeit T_2 ab.

Der Wert T_2 hängt vom Material ab, denn er spiegelt die Mobilität der untersuchten Moleküle wider: Bei weichem Material, in dem sich die Moleküle leicht bewegen können, ist T_2 lang, bei hartem Material kurz. Sobald eine chemische Reaktion oder ein Phasenübergang eintritt, ändert sich auch die molekulare Mobilität der Bestandteile. Die unterschiedlichen T_2 -Werte liefern nicht nur Informationen über Physik und Chemie der Probe, sondern auch Kontrastdaten für bildgebende Verfahren.

1994 wechselten Blümler und ich zur Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen und begannen, eine erste Version der NMR-MOUSE zu konstruieren. Zwei Jahre später beobachteten wir das

erste Signal und staunten, dass unsere Erfindung Reaktionen auf fast jedes protonenhaltige Material zu erzeugen vermochte – von Holz über Gummi bis zu Schokolade. Bei einigen Materialien waren die Echozüge lang, bei anderen kurz. Wir untersuchten nun systematisch, wie die T_2 -Werte mit den unterschiedlichen Eigenschaften der Proben zusammenhängen.

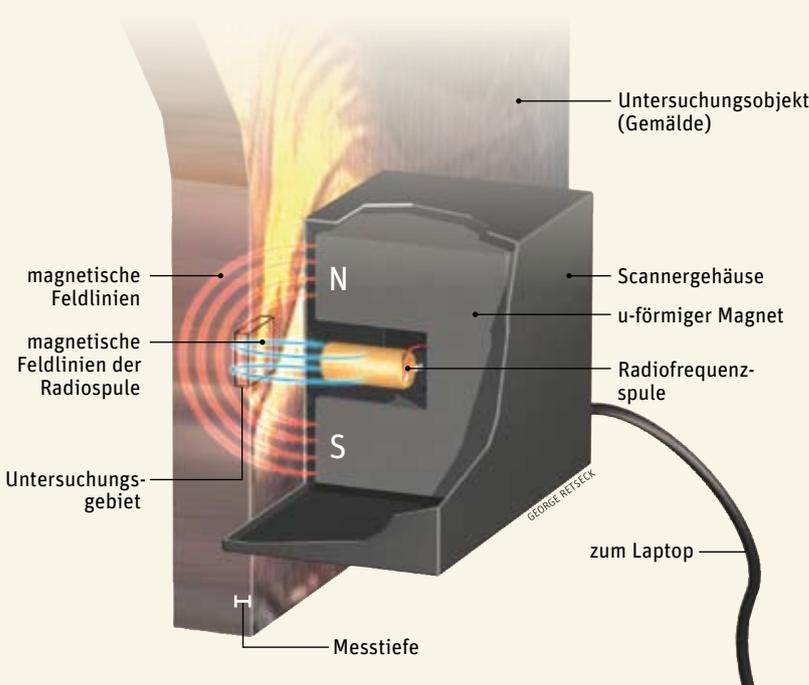
Klares Tiefenprofil vpn »Ötzi«

Mehrere Jahre lang verbesserten wir das Gerät mit Hilfe unserer Mitarbeiter Federico Casanova und Juan Perlo, bis wir schließlich bei der handtaschengroßen NMR-MOUSE anlangten, die wir derzeit benutzen. Sie ist so gebaut, dass das Magnetfeld auf einer Seite ein Stück weit ins Freie hinausreicht, und verbraucht nicht mehr Energie als eine Glühlampe. Inzwischen sind weltweit etwa 40 bis 50 derartige Geräte im Einsatz.

Eine der ersten Substanzen, die wir untersuchten, war Gummi, denn dieses Material ist in Autoreifen und vielen anderen kommerziellen Produkten enthalten; außerdem ist es ähn-

DIE ERSTE MINIATURISIERTE NMR-MASCHINE

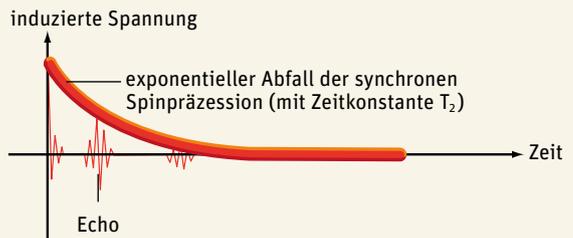
Die NMR-MOUSE, ein mobiles Gerät zur Materialanalyse (Querschnittsbild unten) besteht aus einem u-förmigen Permanentmagneten mit eingebauter Radiofrequenzspule. Das Gerät spürt die Zusammensetzung der Materie dort auf, wo sich die Feldlinien des Magneten und der Spule überschneiden. Es wird in unterschiedlichen Abständen von der Oberfläche platziert, um die Probe Schicht für Schicht zu analysieren.



HERKÖMMLICHES NMR-GERÄT: homogenes Magnetfeld



NMR-MAUS: inhomogenes Magnetfeld



DER TRICK DER MOBILEN NMR

Ein herkömmliches NMR-Gerät erzeugt ein homogenes Magnetfeld und vermag darum mit einem einzigen Radioimpuls ein T_2 -Signal zu gewinnen. Doch die NMR-MOUSE verwendet ein inhomogenes Feld. Dennoch kann sie ein T_2 -Signal erzeugen, indem wiederholte Radioimpulse einen so genannten Echozug hervorrufen. Die Amplituden der Echos lassen sich dann zu einem brauchbaren T_2 -Signal zusammensetzen.

lich weich wie Körpergewebe, bei dem die herkömmliche Kernspintomografie bestens funktioniert. Gummi besteht aus langen, spaghetti-ähnlichen Polymermolekülen, die durch zufällige Querverbindungen zu einem dreidimensionalen Netz verknüpft sind. Meist entscheidet die Dichte der Querverbindungen über die Festigkeit des Materials. Ein Reifen besteht aus vielen Gummischichten unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung und Vernetzungsdichte, und seine Betriebseigenschaften hängen vom Zusammenspiel all dieser Komponenten ab. Normalerweise muss ein neuer Reifentyp in aufwändigen Fahrtests erprobt werden. Doch die NMR-MOUSE vermag die Vernetzungsdichte in den einzelnen Schichten des fertigen Produkts zu bestimmen, ohne dass der Reifen zerstört werden muss. So lässt sich manche Testfahrt einsparen.

Die NMR-MOUSE kann mehrere Zentimeter tief in eine Probe schauen. Da das Magnetfeld nur in einer bestimmten Entfernung vom Gerät ein NMR-Signal erzeugt, schiebt man diese empfindliche Region durch die unterschiedlichen Schichten eines Reifens, um die jeweiligen T_2 -Werte und damit die Vernetzungsdichten zu erhalten. Auf gleiche Weise wird der umweltbedingte Verschleiß von Gummi, Polyethylen und anderen Polymeren analysiert – oder das Altern von Farbbindemitteln in den Gemälden alter Meister.

Bei einer anderen wichtigen Anwendung geht es um das interne Profil von Materialien, beispielsweise die Schichten der menschlichen Haut oder die Lagen von Schmutz, Firnis und Übermalungen auf alten Gemälden. Vor ein paar Jahren haben wir unsere Methode auf »Ötzi« angewendet, die gut erhaltene Mumie aus der Jungsteinzeit; sie war 1991 von Bergsteigern entdeckt worden, als die Gletscher im Grenzgebiet zwischen Österreich und Italien den Körper frei gaben. Unser Gerät lieferte ein klares Tiefenprofil, das unter einer dünnen Eisschicht Ötzis gefriergetrocknete Haut und das Unterhautgewebe zeigt sowie noch tiefer eine Schicht aus dichtem, porösem Material, offenbar Knochensubstanz. Die zerstörungsfreie Darstellung von Knochen könnte von großem Wert für Archäologen sein, die nach intakten, aber verborgenen Spuren von prähistorischer DNA suchen.

Seit die Prinzipien unserer Methode immer bekannter werden, mehren sich die Anwendungen für handliche NMR-Maschinen. Ein gutes Beispiel bietet die Firma Magritek in Wellington (Neuseeland), die Paul Callaghan, ein Pionier der NMR-Forschung, mit-

VOM REIFEN BIS ZUR MUMIE

Reifenhersteller nutzen die NMR-MOUSE, um die Zusammensetzung der vielen unterschiedlichen Gummischichten zu untersuchen, aus denen ein moderner Autoreifen besteht – gelegentlich auch das Produkt eines Konkurrenten. Ein herkömmlicher Kernspintomograf eignet sich dafür nicht, weil sein starkes Magnetfeld den Stahlgürtel im Reifeninneren anzieht; außerdem würde das Metall die Ergebnisse verfälschen. Mit der NMR-MOUSE lässt sich auch die Schädigung von Kunststoffen – etwa Polyethylen – durch Umwelteinflüsse feststellen. Wissenschaftler haben die NMR-MOUSE sogar benutzt, um »Ötzi« zu untersuchen, die 1991 in den Alpen aufgefundene Mumie aus der Jungsteinzeit. 2006 gelang es am Archäologischen Museum in Bozen, Schnittbilder der gut erhaltenen Haut, des Unterhautgewebes und des Schädelknochens zu gewinnen.



GETTY IMAGES / BRIDGEMAN ART LIBRARY



GETTY IMAGES / RYAN MCVAY

gegründet hat. Magritek produziert mobile NMR-Geräte, mit denen untersucht wird, wie sich die mechanischen Eigenschaften von Eisbohrkernen aus der Antarktis unter dem Einfluss der globalen Erwärmung verändert haben.

Magnetresonanz für jedermann

Casanova und Perlo haben unlängst die Auflösung des Geräts erhöht, indem sie die Homogenität des von den Dauermagneten erzeugten Felds verbesserten. Die NMR-MOUSE kann nun auch die chemische Zusammensetzung einer Lösung über das NMR-Spektrum bestimmen, die einfach in einem Becherglas auf das Gerät gestellt wird. Damit vermögen Chemiker die NMR-MOUSE für molekulare Analysen zu nutzen. Derzeit untersuchen Forscher unterschiedliche Anordnungen von Magneten, um ein NMR-System für chemische Analysen zu bauen, das nicht größer ist als eine Kaffeetasse.

Da die Hardware im Wesentlichen einem Handy mit einem kleinen Magneten ähnelt, dürften die Kosten des Geräts mit wachsender Nachfrage fallen. Künftig werden tragbare NMR-Apparate für den persönlichen Gebrauch vielleicht sogar im Kaufhaus erhältlich sein. Eines Tages könnte zum Beispiel jemand, der an einer Hautkrankheit leidet, seinen Zustand mit einem privaten NMR-Gerät ähnlich wie mit einem Fieberthermometer überwachen und die Hautpflege entsprechend anpassen. Vielleicht ist der Tricorder aus »Raumschiff Enterprise« doch mehr als pure Sciencefiction. ◀



Bernhard Blümich ist Professor für makromolekulare Chemie an der RWTH Aachen. Seinen Dokortitel erhielt er 1981 an der Technischen Universität Berlin. Blümich erforscht Theorie und Praxis der NMR-Spektroskopie und -Bildgebung in den Materialwissenschaften und der chemischen Verfahrenstechnik.

Blümich, B.: Essential NMR. Springer, Heidelberg 2005.

Blümich, B. et al.: Mobile Single-Sided NMR. In: Progress in Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy 52(4), S. 197–269, 2008.

Blümich, B. et al.: NMR at Low Magnetic Fields. In: Chemical Physics Letters 477, S. 231–240, 2009.

Coates, G. R. et al.: NMR Logging Principles and Applications. Halliburton Energy Services, 1999.

Eidmann, G. et al.: The NMR-MOUSE, a Mobile Universal Surface Explorer. In: Journal of Magnetic Resonance, Series A 122(1), S. 104–109, 1996.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/100911.



ALLE ABBILDUNGEN DES ARTIKELS: MAGFORCE NANOTECHNOLOGIES AG

»Es wird nur dort heiß, wo unsere Nanoteilchen sind«

Winzige Eisenoxidteilchen heizen bösartigen Tumoren ein und vernichten sie dadurch. Nach Jahren der Forschung erproben Berliner Wissenschaftler die Nanokrebstherapie nun an Patienten. Dr. Andreas Jordan, Vorstand der MagForce Nanotechnologies AG, ist seit fast einem Vierteljahrhundert bei der Entwicklung dieser Krebstherapie dabei.

Andreas Jordan wurde 1959 in Berlin geboren und studierte an der Freien Universität Berlin Biologie und Biochemie. Ende der 1980er Jahre stieß Jordan zu einer Arbeitsgruppe am Berliner Virchow-Klinikum, die sich damit beschäftigte, Tumoren durch Überhitzung zu bekämpfen. Doch die von außen zugeführte Wärme reichte nicht, um die bösartigen Zellen zu vernichten. 1997 gründete Jordan sein erstes Start-up-Unternehmen, um die von ihm erfundene Wärmekrebstherapie voranzutreiben. Drei Jahre später folgte eine zweite Firma, um die für diese Therapie notwendigen Nanopartikel zu entwickeln. 2004 legte man beide Unternehmen zusammen; im Herbst 2005 wurde daraus die MagForce Nanotechnologies AG. Seit Ende 2007 ist MagForce am Entry Standard der Frankfurter Wertpapierbörse gelistet. 2003 wurde der erste Patient erfolgreich mit der Nanokrebstherapie behandelt. Für 2010 rechnet das Unternehmen mit einer europaweiten Zulassung der Therapie bei Glioblastomen, aggressiven Hirntumoren.

Spektrum der Wissenschaft: Sie wollen Krebs mit Wärme bekämpfen. Wie soll das gehen?

Dr. Andreas Jordan: Wir spritzen Billionen winziger Nanopartikel in den Tumor. Sie verteilen sich und dringen in die malignen Zellen ein. Mit einer speziellen Apparatur ähnlich einem Kernspintomografen bauen wir dann ein elektromagnetisches Feld auf. Die Partikel – Eisenoxid einer speziellen Kristallstruktur – beginnen zu schwingen und erzeugen dadurch Wärme. Oberhalb von 42 Grad Celsius sterben die Tumorzellen ab.

Spektrum: Gibt es nicht schon seit Jahrzehnten Versuche, meist erfolglos, die Hyperthermie zu nutzen?

Jordan: Sie scheiterten immer wieder an den gleichen Fragen: Wie verteilt man die Energie gleichmäßig im gesamten Tumor? Wie lässt sich garantieren, dass Krebsgewebe heiß genug wird, ohne angrenzendes gesundes zu vernichten? Wie soll man verhindern, dass der Blutfluss die Wärme aus dem Tumor transportiert?

Spektrum: Wie lösen Sie die Probleme?

Jordan: Zunächst einmal wird es nur da heiß, wo unsere Nanoteilchen sind – im Tumor. Denn das dichte Gefüge gesunder Zellen lässt es gar nicht erst zu, dass

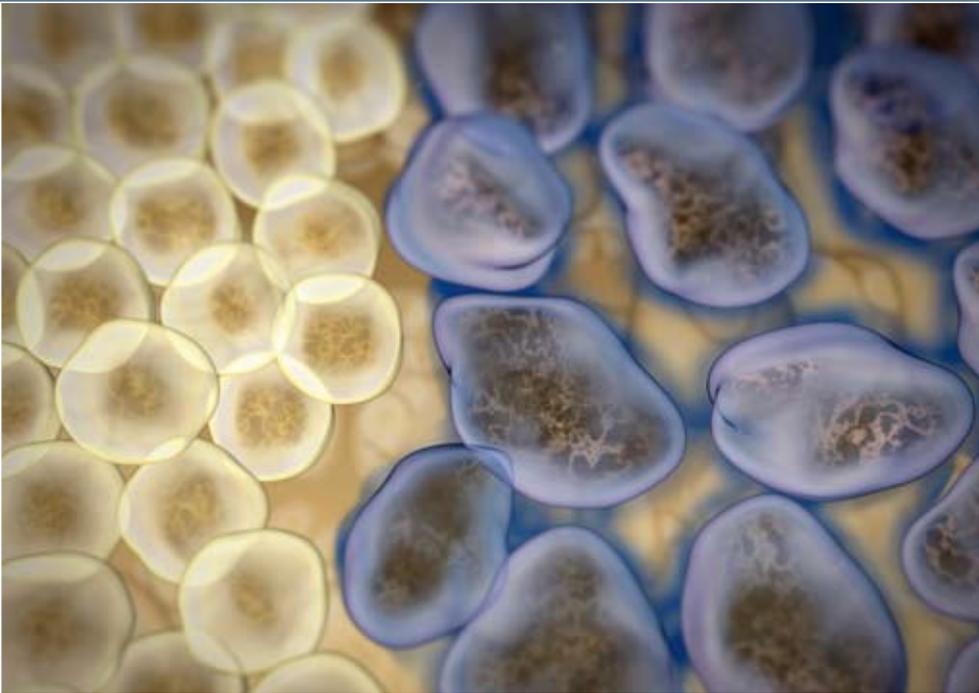
sich die Partikel dort verteilen. Das Problem des Blutflusses lösen wir durch eine Ummantelung aus Aminosilan. Dieses biochemische Material verklebt die Teilchen mit dem Krebsgewebe, so dass sie nicht ausgewaschen werden.

Spektrum: Wann können Patienten nach dieser Wärmetherapie verlangen?

Jordan: Derzeit testen wir sie an Patienten mit einem Glioblastom-Rezidiv, also einem wieder aufflammenden Hirntumor. Normalerweise führt diese Erkrankung innerhalb eines halben Jahres zum Tod. Studienziel ist es, die verbleibende Lebensspanne um mindestens drei Monate zu verlängern. Patienten zu finden, war allerdings schwieriger als erwartet. Ergebnisse, auf deren Basis wir den Zulassungsantrag stellen können, erwarten wir Ende dieses Jahres, die Zulassung dann für 2010.

Spektrum: Auch an Hochschulen wird zur Hyperthermie geforscht. Was unterscheidet Sie von Forschern dort?

Jordan: Wir wollen Studienergebnisse so schnell wie möglich nutzbar machen. An den Universitäten reicht es oft, wenn Publikationen in einem renommierten Fachmagazin erscheinen und genug Geld für weitere Forschung genehmigt wird.



Krebszellen bilden einen eher lockeren Verband (rechts), während gesundes Gewebe homogen und dicht wirkt (links), wie hier illustriert. Dieser Umstand unterstützt die Hyperthermie-Behandlung des Unternehmens MagForce: Im Gefüge eines Tumors können sich eisenhaltige Nanopartikel gut verteilen. Sie werden auch von den Zellen aufgenommen (braune Teilchen) und dann durch elektromagnetische Felder zur Schwingung angeregt. Durch diese Oszillation heizt sich das Gewebe auf; ab 42 Grad Celsius sterben die Krebszellen ab.

Spektrum: Haben Sie es nie bedauert, auf einen Professorentitel verzichtet zu haben?

Jordan: Richtig, ich bin nicht habilitiert. Aber wenn die von uns entwickelte Therapie am Markt ist und MagForce rentabel arbeitet – wer weiß, ob ich nicht wieder an eine Universität zurückkehren? Als Leiter des »Centrums für biomedizinische Nanotechnologie« der Charité kümmere ich mich auch jetzt noch um Grundlagenforschung, und wir veröffentlichen unsere Ergebnisse in wissenschaftlichen Journalen. Länger in Amerika zu forschen hätte mich schon gereizt. Mittlerweile engagiere ich mich dafür, erfolgreiche deutsche Wissenschaftler aus den USA für MagForce anzuwerben.

Spektrum: Wie begann Ihre Karriere als Manager?

Jordan: Im Labor an der Charité. Ein Fondsmanager, der Geld zu vergeben hatte, fragte mich, ob ich nicht Unternehmer werden wolle. Nach schlaflosen Nächten habe ich Ja gesagt; ich wollte die Wärmetherapie marktfähig machen.

Spektrum: Das klingt so einfach. Gab es auch ernsthafte Probleme?

Jordan: Die gab es 2003 und 2004. Da konnte uns der Geldgeber von einem

auf den anderen Tag nicht mehr weiter finanzieren. Die Suche nach neuen Geldquellen war mühselig. Nach der Krise von Internet und Biotech-Industrie wollte keiner mehr zu fairen Konditionen bei einem Nanotechnologie-Unternehmen einsteigen. Ich bin monatelang durch die Gegend getingelt; schließlich fand die Nanostart AG unsere Arbeit so gut, dass wieder Geld floss.

Spektrum: Und was würden Sie als den größten Erfolg bezeichnen?

Jordan: Als wir endlich den ersten Patienten behandelt haben. Das war 2003, ein junger Patient mit einem Weichteiltumor im Bereich des Schlüsselbeins, in gefährlicher Nähe zu wichtigen Nerven. Der Tumor ist nach der Behandlung dort nicht wieder gewachsen. Nach Jahren mit Zell- und Mäuseexperimenten schließlich einen Menschen erfolgreich zu therapieren, das war schon etwas.

Spektrum: Was unterscheidet eigentlich den Unternehmer vom Wissenschaftler?

Jordan: Ich muss mit dem mir anvertrauten Geld umgehen können, die Sprache der Finanzwelt verstehen. Ein Wissenschaftler kann neben der Hauptidee viele Nebenwege verfolgen. Als Unternehmer gehe ich nur den einen Erfolg

versprechenden Weg. Selbstüberschätzung ist schlecht für Unternehmer, ich muss meine eigenen Grenzen erkennen.

Spektrum: Problem Grenzen: Wie rentabel kann ein Produkt sein, das sich bei ein paar Patienten mit einem seltenen Tumor anwenden lässt?

Jordan: In einer zweiten Studie therapieren wir bereits Patienten mit Prostatakrebs; außerdem führen wir Studien mit Patienten durch, die Speiseröhren-, Leber- und Bauchspeicheldrüsenkrebs haben. Demnächst starten Versuche zum Brustkrebs. Unser Ziel ist eine generelle Zulassung für solide Tumoren. Das könnte schon zwei, drei Jahre nach der Erstzulassung so weit sein. Wärme ist ja universell wirksam, für die Anwendungsgebiete gibt es kaum Grenzen.

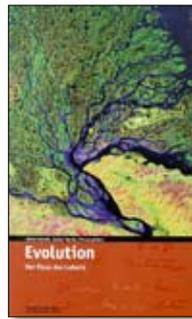
Spektrum: Haben Sie Pläne, auch Tochtergeschwülste und noch nicht sichtbare Tumoren zu therapieren?

Jordan: Ja, wir versuchen Nanopartikel mit medizinischen Wirkstoffen zu koppeln, die durch eine Wärmereaktion frei werden. Damit ließen sich auch vereinzelte bösartige Zellen erwischen. ◀

Das Gespräch führte die Hamburger Medizinjournalistin **Constanze Löffler**.

150 Jahre Evolutionstheorie

Das Begleitbuch zur Ausstellung »Der Fluss des Lebens« ist ein eigenständiges Werk über Charles Darwin und seine epochale Theorie.



Vor 200 Jahren, am 12. Februar 1809, wurde Charles Darwin geboren. Ein halbes Jahrhundert später, am 24. November 1859, erschien sein epochales Werk »Über die Entstehung der Arten«. Diesem Doppeljubiläum ist im Staatlichen Museum für Naturkunde Stuttgart eine Sonderausstellung gewidmet, die vom 1. Oktober 2009 bis zum 24. Mai 2010 zu sehen ist. Im Mittelpunkt der Ausstellung – mit fast 700 Quadratmetern die größte dieser Art in Deutschland – steht ein Modell des britischen Vermessungsschiffs »Beagle« in Originalgröße. Das Begleitbuch von Ulrich Schmid und Günter Bechly ist indes weniger ein Ausstellungskatalog als vielmehr ein eigenständiger Beitrag zum Darwinjahr.

Beide Herausgeber sind Mitarbeiter des Stuttgarter Naturkundemuseums – Schmid als Entomologe und Herausgeber der Zeitschrift »Volucella« für Beiträge zur Biologie der Schwebfliegen (*Syrphidae*) und Paläontologe Bechly als Kurator für Bernstein und fossile Insekten. Die redaktionelle Federführung für diesen Band lag bei Schmid, die Projektleitung der Ausstellung bei Bechly, während Julia Gritzka als Grafikerin des Museums für das ausgesprochen gelungene Layout sorgte.

Gemeinsam mit 14 weiteren Autoren liefern Schmid und Bechly einen kurzweilig geschriebenen, inhaltlich gut vernetzten und reichhaltig bebilderten Überblick zum aktuellen Stand der Evolutionsforschung. Die Darstellung beginnt mit einer »Darwini-ana« – drei Kapiteln, in denen Ulrich Schmid Darwins Evolutionstheorien vorstellt, Ulrich Kull das historische Umfeld von Idee und Person skizziert und Matthias Glaubrecht die Erlebnisse während der fünfjährigen Weltumsegelung mit der »Beagle« beschreibt, die Darwins Leben und Werk prägen.

Bei Friederike Woog werden die prominenten Darwinfinken – von Darwin selbst einst kaum beachtet – einmal mehr zu Kronzeugen, wenn es darum geht, natürliche und sexuelle Selektion als die treibenden Kräfte evolutionärer Veränderung zu beschreiben. Wie neuere Studien belegen, passt sich etwa die Schnabelform der Darwinfinken auch heute noch binnen weniger Generationen veränderten Umweltbedingungen an. Über die hierbei beobachtbaren Zusammenhänge von Evolution und individueller Entwicklung berichten Martin Blum und Philipp Vick: So werden etwa Länge, Breite und Höhe des Schnabels vor allem durch die unterschiedliche Aktivität zweier Gene während der Embryogenese artspezifisch gesteuert.

Die komplexen Zusammenhänge von »Artbegriff und Artentstehung« werden am Beispiel der Evolution von Fischen erklärt: Während Rainer Schoch zeigt, wie Fische Schritt für Schritt zu Landbewohnern wurden, erläutert Ronald Fricke, wie die unterschiedlichen Theorien der Artbildung den Forschern als Werkzeuge der Wahrnehmung dienen. Das evolutionäre Artkonzept, das eine Art vor allem als Teil einer gemeinsamen historischen Abstammungslinie begreift, das biologische, das sie als aktuelle Fortpflanzungsgemeinschaft versteht, das genetische oder das phylogenetische – alle sind sie lediglich unterschiedliche Betrachtungsweisen ein und derselben Sache.

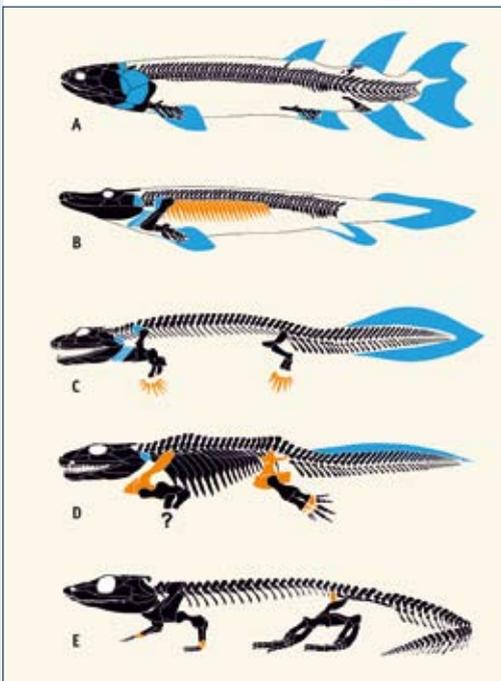
Die Beine der ersten Landwirbeltiere (unten das Uramphibium *Dendropeton*) entwickelten sich aus den muskulösen Brust- und Beckenflossen der Fleischflosser.

Entgegen der missverständlichen Formel vom »Kampf ums Dasein« spielen Kooperationen in biologischen Systemen oftmals eine entscheidende Rolle. Dies belegt nicht nur Johannes Steidles Beitrag zur »Coevolution«, sondern auch Hans-Dieter Görtz' Beschreibung des komplexen Verhältnisses von »Eigennutz und Altruismus«. Und während Martin Nebel daran erinnert, dass es ohne »Symbiose« keine Lebewesen mit einer komplexeren Organisation als Bakterien gäbe, erläutert Lars Krogmann, warum soziale Insekten für Darwins Theorie zunächst ein Dilemma bedeuteten. Denn falls die natürliche Selektion tatsächlich Individuen mit möglichst vielen Nachkommen bevorzugt, wie konnten dann Insektenstaaten entstehen, in denen die Mehrheit der Mitglieder steril ist und keinen eigenen Nachwuchs produziert?

Einige »alte Bekannte« wie Schachtelhalm und Ginkgo sowie Quastenflosser, Lungenfisch, Brückenechse und Schnabeltier stellt Isabel Koch vor. Obwohl der von Darwin geprägte Begriff »lebende Fossilien« einen Widerspruch in sich trägt, eröffnen jene Tier- und Pflanzenarten, die in gleicher oder ähnlicher Form schon seit Urzeiten existieren, stets ganz besondere Einblicke in den »Fluss des Lebens«.

Welche bedeutenden Impulse die Evolutionsforschung der Molekularbiologie verdankt, vermittelt Reinhard Zieglers und Günter Bechlys Beitrag zum »Ursprung des Menschen«: Mittels einer »molekularen Uhr«, die sowohl über den Grad der Veränderung als auch über die dafür benötigte Zeit informiert, lässt sich zum Beispiel errechnen, dass sich die gemeinsame Stammlinie von Mensch und Schimpanse/Bonobo vor fünf bis sieben Millionen Jahren gegabelt hat oder dass das mitochondriale Erbgut der Menschheit (nicht das des Zellkerns!) auf eine Frau zurückführbar ist, die vor 175 000 ± 50 000 Jahren in Afrika lebte.

Bechly berichtet zudem, wie die molekulargenetische Analyse – im Verbund mit Morphologie, Anatomie und Ontogenie – unser Bild vom »Baum des Lebens« revidiert. So stammen Insekten nicht von landlebenden, tausendfüßerartigen Vorfahren ab, sondern sind abgewandelte Krebstiere; Pilze sind in Wahrheit näher mit den Tieren als mit den Pflanzen verwandt; die Wale gehören zur näheren Verwandtschaft der Flusspferde innerhalb der Ordnung der Paarhufer. Und was die Basis der Wirbeltiere und somit unsere eigene Abstammungslinie betrifft, so stehen uns die Manteltiere näher als das berühmte Lanzettfischchen.





Amborella trichopoda, eine urtümliche Blütenpflanze aus Neukaledonien

Die »Zwischenbilanz« nach 150 Jahren Evolutionstheorie lautet also: Die Evolutionsforschung ermöglicht, gestützt auf eine überwältigende Fülle wissenschaftlicher Befunde, plausible Aussagen über den Ursprung und Wandel der Arten sowie über die gemeinsamen Wurzeln von Tier und Mensch. Da erscheint der abschließende Beitrag von Hansjörg Hemminger über »Kreationismus und Intelligent Design« auf den ersten Blick gänzlich entbehrlich – wären da nicht jene bemerkenswert erfolgreichen Versuche bibelfundamentalistischer Kreise in den USA, die Evolutionstheorie mittels pseudowissenschaftlicher Argumente als gottloses Lügengespinnt zu diffamieren.

Den Stuttgarter Ausstellungsmachern ist eine im besten Sinn populärwissenschaftli-

che Beschreibung der Evolutionstheorie gelungen. Fachlich fundiert, sprachlich verständlich sowie grafisch überaus ansprechend gestaltet, ist dieses Buch denn auch bestens geeignet, gegen das mittlerweile auch nach Europa eingeschleppte »Intelligent Design« nachhaltig zu immunisieren.

Reinhard Lassek

Der Rezensent ist promovierter Biologe und arbeitet als freier Journalist in Celle.

Ulrich Schmid und Günter Bechly (Hg.)

Evolution. Der Fluss des Lebens

Stuttgarter Beiträge zur Naturkunde, Serie C – Wissen für alle, Band 66/67

Staatliches Museum für Naturkunde, Stuttgart 2009. 320 Seiten, € 14,95

VOLKSWIRTSCHAFT

Das Tier im Wirtschaftssubjekt

Käufer und Verkäufer handeln rational? Preise spiegeln die wirtschaftlichen Realitäten wider? Bei Toilettenpapier vielleicht. Aber zur Bewältigung der Finanzkrise helfen derart vereinfachende Theorien nicht weiter.

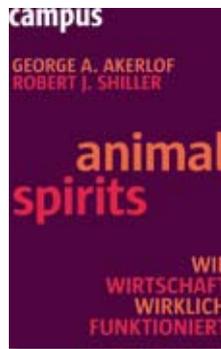
Hier kommt die Erklärung aller wirtschaftlichen Abläufe und wirtschaftshistorischen Fehler – und noch viel mehr, einschließlich einer Analyse der aktuellen Wirtschaftskrise mitsamt einer Anleitung, was dagegen zu tun sei. Starke Worte; aber immerhin ist George A. Akerlof Professor für Wirtschaftswissenschaft an der University of California in Berkeley und Nobelpreisträger von 2001 (Spektrum der Wissenschaft 12/2001, S. 24); Robert J. Shiller von der Yale University ist ebenfalls einer der prominentesten Ökonomen unserer Zeit. Und die Autoren lösen den hohen Anspruch ein: Sie erklären verschiedene wirtschaftliche Phänomene ohne den neoklassischen Schlachtruf »Der Markt regelt alles!« und sind damit interessanter und überzeugender als der Großteil der gängigen volkswirtschaftlichen Literatur.

Sympathischerweise klären die Autoren bereits in der Einleitung ihr Verhältnis zu diversen Standardkonzepten der Volkswirtschaftslehre (die sie zunächst wunderbar knapp und verständlich darstellen): Für den Großteil der wirtschaftlichen Vorgänge in ruhigen Zeiten kann man sie gut gebrauchen. Um den Preis von Toilettenpapier oder

das Auf und Ab am Devisenmarkt zu erklären, sind Angebot und Nachfrage gute Konzepte. Sogar für die Frage, warum und nach welchen Regeln Menschen in ein Arbeitsverhältnis treten und einen Lohn dafür bekommen, sind die gängigen Theorien in der Mehrzahl der Fälle sinnvoll anzuwenden – aber eben nicht immer. Und bei den wirklich schwierigen Fragen, etwa, warum es hartnäckige Arbeitslosigkeit oder Finanzkrisen gibt, helfen sie gar nicht weiter. Denn in diesen Fällen ist die Folgerung aus der klassischen Theorie (»Es stellt sich ein Preis ein, der den Markt räumt«) schlicht falsch.

Da müssen neue Ideen her, und die Autoren greifen dafür auf ein Konzept zurück, das der alte John Maynard Keynes (1883–1946) in den 1930er Jahren geprägt hat: die *animal spirits*, eine Art Bauchgefühl, das bei Entscheidungen häufig den kühlen Verstand ersetzt. Zu den *animal spirits* zählen Fairnessempfinden, die Unmöglichkeit, in die Zukunft zu blicken, und der hoffnungsvolle Glaube an allzu optimistische »Geschichten«.

Im Supermarkt kann man von einigermaßen klar kalkulierenden Käufern und Verkäufern ausgehen. Aber es wäre übertrie-



ben zu glauben, dass jemand, der eine Hypothek über 20 Jahre aufnimmt, tatsächlich seine Einkommens- und Ausgabenströme dieser Zeit vorhersieht und entsprechend planen kann. Eher gibt bei solchen Entscheidungen das Gefühl »Das wird schon irgendwie klappen« den Ausschlag. Dieses Vertrauen wird von so schwammigen Einflüssen wie etwa der Stimmung in der Gesellschaft geprägt. Die kann zu einem echten Konjunkturfaktor werden, etwa im Internetboom vom Ende der 1990er Jahre, bei dem das Geld auf der Straße zu liegen schien; schade nur, dass die große Blase Anfang 2000 in sich zusammenfiel.

Wenn aber das Verhalten des Einzelnen in vielen Fällen nicht rational erklärbar ist, hat jeder, der auf der Basis der üblichen Theorien die Ökonomie zu erklären oder gar zu prognostizieren versucht, ein ziemliches Problem – und wenn er noch so ausgefeilte statistische Methoden verwendet! Da muss laut Akerlof und Shiller auch der Versuch scheitern, aus Marktpreisen (etwa Aktienkursen) etwas über den tatsächlichen Wert des gehandelten Guts (des betreffenden Unternehmens) abzuleiten. Von der Vorstellung, Preise spiegeln die ökonomischen Grunddaten wider, müsse man sich einfach lösen. An anderer Stelle meinen sie, die Frage, warum die Investitionsausgaben schwanken, sei etwa so wie die Frage, warum der Bierkonsum von einer Pokerparty zur anderen schwankt: Wer weiß das schon? Und wen interessiert es überhaupt? Das ist ein bisschen revolutionär, aber mir hat sich diese Frage auch schon bei vielen, vielen Beiträgen volkswirtschaftlicher Kongresse aufgedrängt.

Nachdem also die theoretischen Grundlagen wackeln, kann auch die Wirtschaftspolitik sich nicht mehr auf die alten Weisheiten berufen; hier geben die Autoren für einzelne Fragen neue Antworten. In wohlthuendem Kontrast zu den üblichen Lehrbüchern überspringen sie die mittlerweile sehr langweilig gewordene Diskussion über die Aufgaben des Staats im Allgemeinen und sagen, die Wirtschaftspolitik müsse sein wie gute Eltern: Freiheiten lassen, um Selbstständigkeit nicht zu ersticken, aber Grenzen setzen, um Exzesse zu unterbinden. Und im Krisenfall beherzt eingreifen, weil die Erfahrung lehrt, dass nicht immer alles von allein wieder gut wird.

Entsprechend empfehlen die Autoren zur Bekämpfung der gegenwärtigen Krise umfangreiche staatliche Maßnahmen. Mit der »Great Depression« der 1930er Jahre im Hinterkopf plädieren sie für die Unterstützung der Banken, die sie als Dreh- und Angelpunkt für den Wirtschaftsablauf ausmachen und damit für die Entstehung des *animal spirit* namens Vertrauen. Oberstes

Gebot der Stunde sei es, eine »Kreditklemme« zu verhindern, also einen Stopp der Kreditvergabe durch die Banken, die wegen der verschlechterten wirtschaftlichen Perspektiven lieber ihr Geld horten, als es zu verleihen. Diese Stützungsmaßnahmen kosten Geld, viel Geld – und wurden in sehr vielen Ländern rund um den Globus in etwa so praktiziert, wie die Autoren beschreiben.

Natürlich kann man mit den *animal spirits* weder die Welt noch die gesamte Wirtschaft erklären. Das Buch bietet acht Fragen an, die mit Hilfe des Konzepts einigermaßen überzeugend beantwortet werden können. Eine davon ist die aktuelle Finanzkrise; die übrigen Themen sind so überraschend breit gestreut – Finanzmärkte, Armut bei gesellschaftlichen Minderheiten, Arbeitslosigkeit, Einfluss der Zentralbanken und mehr –, dass das Konzept am Ende ein wenig nebulös bleibt.

Wirklich neu ist der Ansatz nicht, was die Autoren auch gar nicht behaupten. Manchmal kommen einem die Gedanken recht bekannt vor: die Bedeutung von Ver-

trauen, *self-fulfilling prophecies*, Schweinezyklen ... das hat man irgendwie schon mal gehört. Aber eigentlich geht es in dem Buch nur vordergründig um diese Inhalte. In Wirklichkeit handelt es sich um ein wunderbares Plädoyer für eine Volkswirtschaftslehre, die das große Ganze im Blick behält, sich dabei aber der Komplexität der Welt nicht verschließt – und gegen ein pseudoexaktes Klein-Klein, das auf viel zu simplen Annahmen beruht.

Hiltrud Nehls

Die Rezensentin ist promovierte Volkswirtin. Nach Aufgaben in der Konjunkturforschung und im Bereich Finanzstabilität arbeitet sie nun in der Risikokontrolle der WestLB in Düsseldorf.

George A. Akerlof und Robert J. Shiller

Animal spirits

Wie Wirtschaft wirklich funktioniert

Aus dem Englischen von Ute Gräber-Seißinger, Ingrid Proß-Gill und Doris Gerstner. Campus, Frankfurt am Main 2009. 300 Seiten, € 24,90



URGESCHICHTE

Hüftbein KNM-ER 3228

Inzwischen gibt es eine Fülle von fossilen Überresten unserer frühen Vorfahren. Das Wissen über sie ist zu einem eindrucksvollen Gesamtwerk verarbeitet worden.

Man nehme einen Anatomen, einen Bildhauer, einen Paläoanthropologen, einen Make-up-Spezialisten, einen Gerichtsanthropologen, einen Maler und einen technischen Zeichner und fasse sie alle in einer Person zusammen. Dann statte man diese Person mit einer lebhaften Fantasie aus und füge noch eine glühende Leidenschaft für die Schaffung genauer Abbilder menschlicher Gesichter aus der Vergangenheit hinzu. Nun nehme man mehrere solcher Personen, dann hat man das Autorenteam aus Künstlern und Wissenschaftlern des American Museum of Natural History in New York, so die Selbstdarstellung der Autoren Gary J. Sawyer und Viktor Deak. Dazu kommt der Textautor Esteban Sarmiento, der »unseren ausgestorbenen Verwandten neues Leben eingehaucht hat, indem er dramatische,

***Paranthropus boisei* mit dem stark ausgebildeten Unterkiefer lebte vor 2,1 bis 1,4 Millionen Jahren.**

aber wissenschaftlich untermauerte und mit Informationen vollgepackte Geschichten erzählt«, so der Paläoanthropologe Ian Tattersall vom dortigen Museum im Vorwort.

Nach diesen Einschätzungen könnte man den Eindruck gewinnen, das Buch sei eine fantastische Reise durch die Menschheitsgeschichte, und man möchte es am liebsten an einem Abend durchlesen. Dem ist zum Glück nicht so. Vielmehr sind die Geschichten und die perfekten Lebensbilder nur eine Seite des Bands. Die andere sind die fossilen Zeugnisse unserer Ahnen selbst und das, was sie uns über die Entwicklung zum Menschen während der letzten sieben Millionen Jahre sagen.

Nach Lektüre dieses Buchs hat man nicht nur ein fundiertes Bild vom Aussehen unserer Vorfahren, sondern kennt auch die wesentlichen anatomischen Kennzeichen ihres Schädels und ihrer Zähne, weiß um ihre Ernährung, hat genauere Vorstellungen von wichtigen Regionen des Skeletts und dem, was man daraus für ihre Funktion er-



YOUR SCIENCE CAREER: WHAT NEXT?

Explore your options at the Berlin conference for science careers

- CONFERENCE AND WORKSHOPS
- FREE CAREER FAIR
- UNRIVALLED NETWORKING

MORE INFO?

Visit the source-event.com for:

- FREE podcasts featuring past speakers
- Programme and conference details
- Exhibitors and sponsors
- Registration and venue information

EMPLOYERS

For exhibitor and sponsorship opportunities please contact:

Hildi Rowland
E: h.rowland@nature.com
T: +44 (0)20 7014 4084

“THE SOURCE EVENT WAS ONE OF THE MOST INFORMATIVE AND OVERALL USEFUL CAREER EVENTS I HAVE EVER ATTENDED.”



POSTDOC

Register: www.source-event.com

“I GAINED AN INSIGHT INTO THE WAY BUSINESSES ARE RUN, WHAT EMPLOYERS LOOK FOR, AND HOW TO APPLY WHAT I’VE DONE AS A RESEARCH STUDENT IN THE ‘REAL WORLD’ OF WORK”



PHD STUDENT

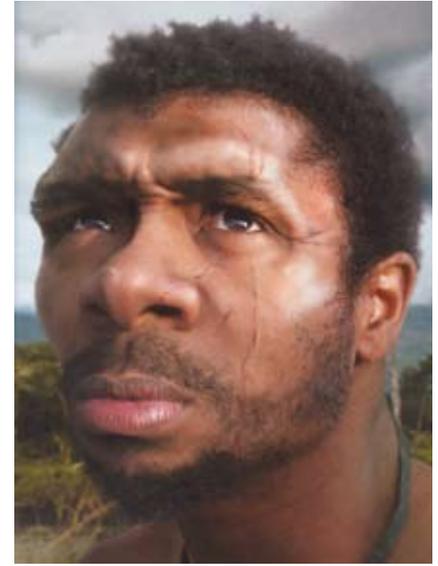
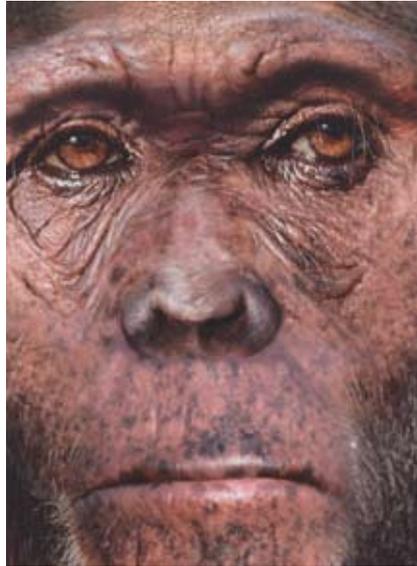


Partners:

DIE ZEIT

Spektrum
DER WISSENSCHAFT





schließen kann. War der aufrechte Gang der Vormenschen schon so wie der unsere, oder bestanden noch wesentliche Unterschiede? Man lernt die Fundstätten der Arten und ihr Verbreitungsgebiet kennen und wird mit einer großen Zahl von Fundnummern der einzelnen Fossilien behelligt. Wer kannte vorher schon das etwa 1,95 Millionen Jahre alte Hüftbein KNM-ER 3228 vom Turkanasee in Kenia oder das vollständige Gebiss OH65 und den Unterschenkelknochen OH35 aus der tansanischen Olduvai-Schlucht?

Natürlich muss man sich die vielen Nummern nicht alle merken; aber sie machen deutlich, über welche Fülle von Material aus der menschlichen Entwicklungslinie wir heute verfügen. Nur ein winziger Bruchteil, die wichtigsten Stücke, wird im Buch genannt. Die immer noch weit verbreitete Annahme, es gebe nur wenige fossile Zeugnisse der Menschwerdung, hat nichts mit der Realität zu tun. Vielmehr haben langjährige Feldforschungen in vielen Regionen der Welt – besonders während der letzten 40 Jahre – so viel Material zu Tage gefördert, dass selbst ein Spezialist es in seinem Leben kaum vollständig in Augenschein nehmen könnte. Die spannend erzählten Geschichten und die realistischen Rekonstruktionen des Buchs beruhen auf einer sehr breiten Fossilbasis (siehe auch meinen Beitrag in Spektrum der Wissenschaft Spezial 2/2007 »Raumschiff Erde«, S. 44).

Der Stammbaum des Menschen ist so immer fundierter, aber auch immer differenzierter geworden. Jeder neue Fund muss vor dem Hintergrund dieses komplexen Gerüsts gesehen und eingeordnet werden. Viele der bekannten Arten sind durch Hunderte von Funden seit Langem etabliert. Bei anderen, die erst in den 1990er Jahren oder

noch später entdeckt wurden, fahndet man mit großem Einsatz nach weiteren Überresten. Das gilt besonders für die Formen, die im Kapitel über »Die ältesten afrikanischen Hominiden« dargestellt werden und deren genaue Beziehungen zu den zeitlich nachfolgenden Vormenschenarten, den Australopithecinen, noch weiterer Klärung bedürfen.

Die Identifikation und Abgrenzung von Arten anhand fossiler Überreste ist schwierig, da man oft nicht sicher sein kann, ob bestimmte anatomische Unterschiede die innerartliche Variabilität widerspiegeln oder aber als Kennzeichen verschiedener Arten zu werten sind. Häufig steht kein Mittel zur Verfügung, diese Frage zu entscheiden, so dass Raum für einander widersprechende Auffassungen bleibt.

Ein gutes Beispiel ist die Art *Homo erectus*. Hier sehen viele Forscher keine taxonomisch relevanten Unterschiede zwischen den afrikanischen und den asiatischen Vertretern und betrachten sie daher als zu einer Art gehörig. Andere sehen gewisse anatomische Unterschiede und halten eine Trennung in zwei Arten, einen afrikanischen *Homo ergaster* und einen asiatischen *Homo erectus*, für sinnvoll. Wieder andere, zu denen offensichtlich auch die Autoren zählen, teilen noch stärker und unterscheiden gleich drei Arten innerhalb des indonesischen *Homo erectus*.

Neue Ansätze und Untersuchungen können zu einem klareren Bild führen. So finden sich in den letzten Jahren, gestützt auch durch neue Funde, vermehrt Indizien dafür, dass *Homo ergaster* doch besser als frühe Form des *Homo erectus* angesehen werden sollte. Die Autoren widmen dem Problem der Klassifikation jeweils einen eigenen Ab-

»Lucys Kind« (links), ein dreijähriges *Australopithecus-afarensis*-Mädchen, lebte vor 3,4 Millionen Jahren, *Homo rudolfensis* (Mitte) vor 1,88 Millionen Jahren; der junge Mann (rechts), der vor 150 000 Jahren lebte, wird bereits als *Homo sapiens* klassifiziert.

schnitt, in dem sie natürlich auch ihre eigene – nicht immer mehrheitsfähige – Interpretation vortragen.

Insgesamt ist das Buch eine gelungene und in dieser Form wohl einmalige Mischung aus spannenden Einblicken in das Leben unserer Ahnen und einem verständlich aufbereiteten Überblick über die Faktenlage der menschlichen Evolution. Es dürfte für jeden von Gewinn sein, der wissen will, welche Schlüsse aus den heute vorhandenen Fossilfunden gezogen werden können. Da sich im Text allerdings kaum Quellenangaben finden und offensichtlich nur sehr wenige Abbildungen von Fossilfunden zur Struktur des Bands passten, wird derjenige, der es genau wissen will, weiter recherchieren müssen.

Günter Bräuer

Der Rezensent ist Professor an der Abteilung für Humanbiologie der Universität Hamburg; er forscht seit mehr als 30 Jahren paläoanthropologisch in Afrika. Im Jahr 2005 erhielt er den Werner und Inge Grüter-Preis für gelungene Wissenschaftsvermittlung.

Gary J. Sawyer und Viktor Deak

Der lange Weg zum Menschen

Lebensbilder aus 7 Millionen Jahren Evolution

Aus dem Englischen von Sebastian Vogel.

Spektrum Akademischer Verlag,
Heidelberg 2008. 216 Seiten, € 39,95

Dem Genie auf den Fersen

Stefan Klein geht es weniger um den Künstler als um den Naturwissenschaftler Leonardo da Vinci, wenn er auf dessen Spuren die halbe Welt bereist.

Mit Leonardo da Vinci (1452–1519) verbinde ich vor allem großen Erfindergeist, natürlich Mona Lisa und vielleicht noch einen alten, bärtigen Mann. Aber war er tatsächlich so genial, wie man es sich erzählt? Hat Mona Lisa nun gelächelt oder nicht? Und was trieb ihr Urheber, bis er zu dem wurde, den wir von Bildern her kennen?

Stefan Klein hat sich auf die Suche nach Antworten gemacht – nicht in Legenden und Anekdoten, sondern in Leonardos Aufzeichnungen. Immerhin sind noch 21 Gemälde sowie rund 100 000 Zeichnungen und Skizzen von ihm erhalten. Heute sind seine Werke in Bibliotheken, Privatarchive und Museen auf der gesamten Welt verstreut.

»Es will keine Künstlerbiografie sein, die von außen einen Blick auf das Leben des Meisters zu werfen versucht«, schreibt der promovierte Biophysiker im Vorwort. »Vielmehr geht es darum, einen der ungewöhnlichsten Menschen, den es je gab, gleichsam

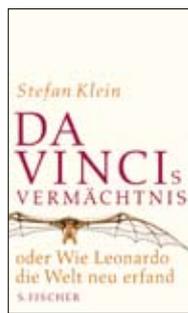
von innen her kennen zu lernen – und die Welt durch seine Augen zu sehen.« Erste Station seiner Recherche ist das berühmteste Gemälde der Welt. Hunderte andere sind an diesem Tag mit demselben Ziel in den Louvre geströmt, wie Klein amüsant zu schildern weiß. Etwa indem er von den in breitem Fränkisch murmelnden Besuchern hinter ihm erzählt, die das Museum für »sehr gut organisiert« halten.

Was macht dieses Gemälde »einer durchschnittlich attraktiven Florentiner Hausfrau« so berühmt? Leonardos Manuskripte verraten, dass er sich ausgiebig mit der Wirkung von Gesichtern auf den Betrachter befasste. Auf unzähligen Skizzen probte er die unterschiedlichsten Mimiken, auf anderen untersuchte er, wie die Helligkeit vom Beleuchtungswinkel abhängt; eine Glasschüssel diente ihm anscheinend als Modell des menschlichen Auges. »In manchen Augenblicken kam es mir so vor, als könnte ich mit ihrem Schöpfer Zwiesprache halten«, berichtet Klein über seine Stippvisite in der privaten Bibliothek der englischen Königin auf Schloss Windsor, wo ein großer Teil der Skizzen lagert.

Um zu verstehen, wie ein Gesichtsausdruck zu Stande kommt, seziierte Leonardo wie auch andere Maler seiner Zeit dutzende Leichen. Anders als sie wollte er jedoch nicht nur Knochengestützte und Muskulatur inspizieren, um plastischer zu zeichnen – Leonardo schaute tiefer. Er wollte wissen, wie der Körper funktioniert – wodurch statt der Kunst die Medizin in den Vordergrund rückte. Stefan Klein schaut ihm bei seinen Arbeiten über die Schulter.

Über die Geschlechtsorgane und ihren Gebrauch bemerkte Leonardo übrigens: »Der Vorgang der Zeugung und die Glieder, die dabei gebraucht werden, sind so abstoßend hässlich, dass die Natur die menschliche Spezies verlieren würde, wenn nicht die Gesichter, der Schmuck der Akteure und ihr fiebriger Geist etwas Schönes an sich hätten.«

Ungleich größeren ästhetischen Reiz muss für ihn das Wasser gehabt haben,



denn in vielen seiner Zeichnungen setzte sich Leonardo mit dessen Eigenschaften auseinander. Er erkannte die Wirkungen der Oberflächenspannung und des Drucks und übte sich in seiner eigenen Strömungslehre. Seine Erkenntnisse hielt er nicht in Worten oder Formeln fest, sondern stets in Bildern. Tatsächlich hatte er nie eine höhere Schule besucht und scheiterte an den einfachsten Rechenaufgaben.

Klein ist fasziniert von Leonardos unglaublich genauer Beobachtungsgabe. Zahlreiche Grafiken und Farbtafeln lassen den Leser diese Faszination teilen.

Ebenso eindrucksvoll hielt Leonardo auch Gedanken fest, die uns heute schauern lassen. Auf hunderten Seiten entwarf er grausige Kriegsmaschinen: riesige Armbrüste, Schnellfeuerwaffen oder etwa einen Sichelwagen, der »ein Feld von abgeschnittenen Beinen und zerstückelten Leibern« zurücklässt. Gleichwohl bezeichnete er den Krieg selbst einmal als »bestialischen Irrsinn« und scheint auch sonst jedes Leben wertgeschätzt zu haben. Wenn man bedenkt, dass er in einer der blutigsten Epochen Italiens lebte, seien Leonardos ethische Bedenken das eigentlich Überraschende, kommentiert Klein.

In Florenz, der Heimatstadt des Künstlers, fahndete der Autor nach dem »Traum vom Fliegen«, dem Leonardo viele Jahrzehnte lang anhing. Er studierte den Flug von Raubvögeln und Fliegen, suchte nach aerodynamischen Profilen und konstruierte schließlich Flugmaschinen. Ob er sie je gebaut oder gar geflogen hat, geht aus seinen Aufzeichnungen leider nicht eindeutig hervor. Nachbauten jedenfalls legen den Schluss nahe, dass die Entwürfe untauglich waren und ihr Schöpfer das Prinzip des Fliegens nie ganz verstand.

Erfolgreicher baute Leonardo Maschinen. Selbstständig bearbeiteten diese zum Beispiel Wollstoffe oder hämmerten an Feilen. Sogar die erste Digitaluhr wird dem Ingenieur aus dem Dorf Vinci bei Florenz zugeschrieben, darüber hinaus allerlei andere technische Errungenschaften, vom Hubschrauber bis zum Bratenwender. Stefan Klein beleuchtet diesen Geniekult kritisch, denn ob und wie viel Leonardo von anderen kopiert hat, bleibt unklar. Ein geregelter Publikationswesen gab es in der Renaissance noch nicht. Und während wir Leonardos Manuskripte kennen, sind die seiner Vorgänger vielleicht in Vergessenheit geraten. »So pries man in Leonardo den Erfindergeist eines ganzen Jahrhunderts«, meint der Autor.



Selbstbildnis des alten Leonardo von 1512

Zweifelsohne war er jedoch der Erste, der die Ingenieurskunst wissenschaftlich betrieb. Leider fehlte es in Leonardos Forschungen oft an Systematik, keiner seiner Gedanken füllte mehr als eine Seite. Entsprechend gehen seine Arbeiten selten über eine lose Sammlung von Manuskripten hinaus. Er selbst schob das auf Zeitmangel – ständig lockte ein neues Terrain, das untersucht werden wollte. Aber gerade diese sprunghafte Arbeitsweise machte vermutlich Leonardos Erfolg aus.

Dem ehemaligen »Spiegel«-Redakteur und erfolgreichen Sachbuchautor Stefan

Klein ist eine erfrischend unkonventionelle Leonardo-Biografie gelungen. Das Buch ist durchweg leicht verständlich und liest sich wie ein spannender Roman. Man hört ihm einfach gerne zu, wenn er voller Faszination auf den Spuren des Meisters wandelt. Die Fakten rund um Leonardos Schaffen, Denken und Epoche wirken gut recherchiert; Zitate von Historikern, Zeitgenossen und nicht zuletzt vom Protagonisten selbst runden dieses Bild ab. Im Anhang erwarten den Leser eine detaillierte Zeittafel sowie Anmerkungen, Literatur- und Abbildungsverzeichnis auf mehr als 60 Seiten.

Die letzte bekannte Aufzeichnung von Leonardo endet mit den Worten »Denn die Suppe wird kalt«. Ob Geheimbotschaft oder profane Realität, wird ein Rätsel bleiben.

Maike Pollmann

Die Rezensentin ist Diplomphysikerin und freie Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg.

Stefan Klein

Da Vincis Vermächtnis

oder Wie Leonardo die Welt neu erfand

S. Fischer, Frankfurt am Main 2008.
336 Seiten, € 18,90

MEDIZIN

Wider den Fitnesswahn

»Sport ist sinnlos, ungesund und nervt.«
Nehmen Sie die Sprüche von Midas Dekkers mit Humor.



Der niederländische Biologe, Schriftsteller und Journalist Midas Dekkers ist vor allem durch Rundfunk- und Fernsehsendungen bekannt geworden. International erfolgreich wurde er durch seine populärwissenschaftlichen Werke, in denen er auf unterhaltsame Weise gesellschaftliche Fragen untersucht und dabei häufig ungewöhnliche Standpunkte vertritt. In Deutschland wurde sein Buch »Geliebtes Tier« mehrfach aufgelegt.

»Sport bringt nichts. Er führt zu erhöhter Verletzungsgefahr und verkürzt das Leben. Er macht weder schön noch dünn noch gesund.« Der Autor übt nicht nur heftige Kritik am Sport, sondern vor allem an der Gesellschaft, die sich von Sport- und Fitnesszwang, von zweifelhaften Schönheits- und Gesundheitsidealen zu sehr beeinflussen lässt. Dekkers fühlt sich belästigt von der permanenten Sportberichterstattung in Print- und Funkmedien. Er fühlt sich bei besinnlichen Spaziergängen in der Natur gestört von röchelnden, grell gekleideten Joggern, die urplötzlich neben ihm auftauchen und schnaufend wieder verschwinden.

Sport sei allenfalls etwas für junge Menschen, die ihre körperlichen Fähigkeiten

über Bewegungsspiele überhaupt erst entwickeln. Allerdings nicht in Form von Schulsport! Kinder, die lieber ihren Geist schulen wollen, als sich körperlich zu verausgaben, solle man doch bitte nicht mit etwas derart Banalem wie Sport belästigen. Die staatlichen Subventionen für den Volkssport wären viel besser in die Bildung investiert.

Wieso kam der Mensch überhaupt auf die Idee, Sport zu treiben? Schließlich kommt die Natur schon Tausende von Jahren ohne Sport aus. Kein Tier käme auf die Idee, seine kostbar angefressene Energie für ein sinnloses Wettrennen zu vergeuden. Wie in der Biologie üblich, sucht Dekkers nach einem evolutionären Vorteil sportlicher Betätigung. Demnach würde der Mensch sich im Fitnessstudio quälen, um seine Attraktivität als Sexualpartner zu erhöhen. Das kann sogar sein; aber »Fitness« heißt bei den Biologen nur »Fortpflanzungserfolg«, und den erziele im Zweifelsfall auch derjenige mit mehr Köpfchen und nicht, wer mehr Kraft und Ausdauer aufgebaut hat.

Dekkers' Ausführungen zur Rolle des Sports im Wandel der Geschichte sind äußerst interessant. Seine idealistischen Wurzeln habe der Sport in der Annahme, der Geist ließe sich über den Körper formen. Ziel der Körperübungen sei der körperlich optimierte Mensch mit einem reinen Geist. Wie weit man seine körperliche Leistung durch Training überhaupt steigern könne, ist laut Dekkers genetisch vorgegeben. Der

mühsam erworbene Trainingseffekt lasse sich aber nicht weitervererben. Um den Menschen langfristig zu verbessern, bliebe also nur die Zucht, die Selektion auf sportliche Körpermerkmale. Allein der Gedanke daran ist aber politisch absolut unkorrekt, obwohl er die logische Konsequenz wäre. Diese Ideen griffen vor allem totalitäre Regime mit Begeisterung auf. Hitler misbrauchte die gesamte Evolutionstheorie nicht nur für den Einsatz zur Menschenzucht, sondern rechtfertigte damit auch die Elimination unerwünschten genetischen Materials.

Grundsätzlich stimmt Dekkers mit den Ergebnissen der aktuellen Forschung überein: Körperliche Bewegung tut unserer Gesundheit gut. Unser Körper ist nicht dafür gemacht, den ganzen Tag im Auto, am Schreibtisch, am Esstisch oder auf der Couch zu verbringen. Gingen wir öfter mal zu Fuß, auf dem Weg zur Arbeit, im Haus, bei der Verrichtung der alltäglichen Aufgaben, dann reiche das schon, um die meisten gesundheitlichen Probleme der heutigen Gesellschaft zu verringern. Eine halbe bis ganze Stunde Spaziergehen täglich, oder mit dem Rad zur Arbeit fahren – das wäre Gold wert für die Gesundheit. Aber Sport? Nein danke!

Dass der Leistungssport, für den nur Wettkampf und Sieg zählen, nicht unbedingt gesundheitsfördernd ist, weiß sogar der wenig informierte Zeitgenosse. Auch ein Mensch, der sich auf Grund fragwürdiger Schönheitsideale oder nur, um seine Muskeln zu trainieren, über den Joggingparcours quält, tut seiner Gesundheit nicht wirklich etwas Gutes. Sport im Sinn einer Freizeitbeschäftigung sollte wohl Spaß machen. Diese Form der Motivation zieht der Autor aber erst auf den letzten beiden Seiten seines Buchs in Betracht. Und plötzlich

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

fallen ihm sogar ein paar Beispiele von Tieren ein, die sich offensichtlich doch aus reinem Spaß an der Freude bewegen.

Liest man den Text flüchtig, könnte man sich als Sportler ständig persönlich angegriffen fühlen. Es bleibt primär der Eindruck, dass sich hier lediglich ein furchtbar unsportlicher Mensch auf etwas unsachliche Art und Weise über den Sport an sich mokiert.

Die wissenschaftlichen Argumente, mit denen Dekkers seine Thesen zu belegen versucht, hat er sehr willkürlich aus der Literatur herausgegriffen, wie es ihm gerade

passt. Das mag man ihm verzeihen, will er doch damit nur seine ganz subjektive Meinung unterstreichen. Für bare Münze nehmen darf man das nicht.

Mit ein wenig Humor betrachtet wird das Bild differenzierter, und man entdeckt auch versöhnliche Aspekte. Dekkers' Stil ist witzig und überrascht immer wieder durch einfallsreiche Metaphern. Vom Aufbau her ist das Buch eher unstrukturiert und hat gegen Ende echte Längen.

Insgesamt aber ist es eine durchaus amüsante Lektüre. Sporthasser werden an diesem Werk ihre helle Freude haben, ge-

nau wie diejenigen, die es sich mal wieder mit gutem Gewissen auf der Couch gemütlich machen wollen.

Tanja Neuvians

Die Rezensentin hat in Medizin und Tiermedizin promoviert und arbeitet als freie Medizinerin in Ladenburg.

Midas Dekkers

Der Gesundheitswahn

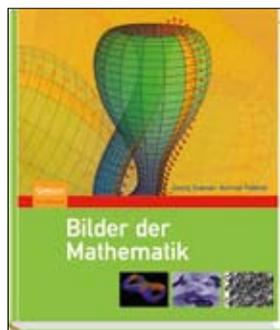
Vom Glück des Unsportlichseins

Aus dem Niederländischen von Ira Wilhelm. Blessing, München 2008. 416 Seiten, € 19,95

MATHEMATIK

Das Abstrakte vor Augen führen

Zwei Meister der visuellen Darstellung haben Altes und Neues aus der Mathematik zu einem eindrucksvollen, bunten Kaleidoskop verarbeitet.



Der rasante Fortschritt der Computertechnik hat den Mathematikern ein neues, mächtiges Werkzeug beschert: Die räumlichen Gegenstände, die sie früher im Wesentlichen im Kopf hatten und nur mit größter Mühe zu Papier oder – ausnahms-

weise – in die Gestalt eines dreidimensionalen Modells bringen konnten, zaubert ihnen heute Grafiksoftware auf den Bildschirm, komplett mit Licht- und Schatteneffekten, die dem Betrachter auf den ersten Blick den richtigen Eindruck vermitteln. Nicht dass

das Programmieren der Bilder mühelos vortritt; aber von einer Variante zur nächsten oder zu einer Folge bewegter Bilder, die einem das Produkt der abstrakten Fantasie von allen Seiten zeigt, ist es dann nicht mehr weit.

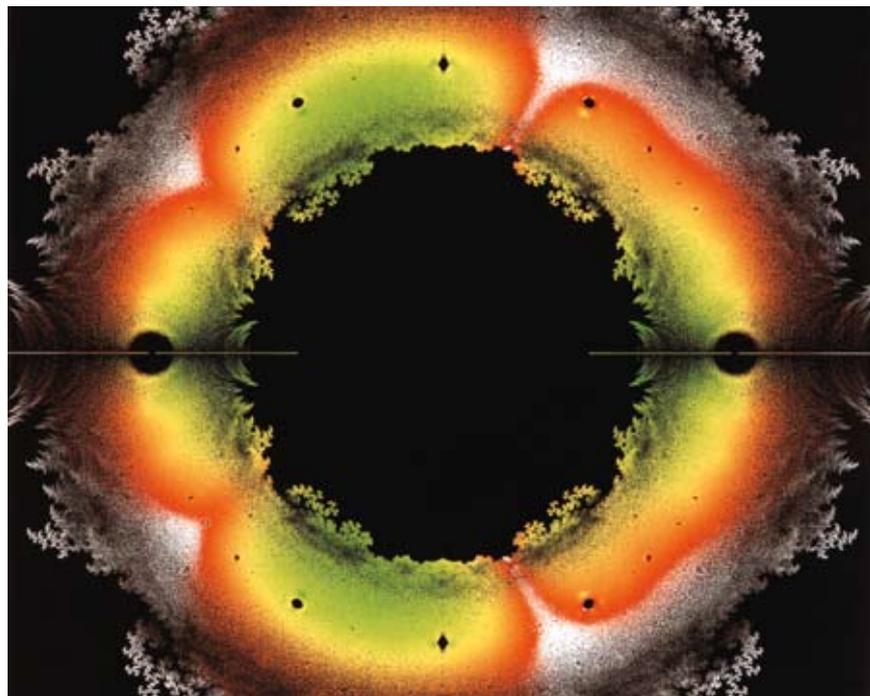
Längst ist die Computergrafik vom Darstellungszum Erkenntnismittel avanciert. Bevor man etwas über besondere Flächen im Raum oder Nullstellenmengen von Polynomen beweist, schaut man sie sich erst einmal an – und entdeckt dabei manchmal sogar Neuigkeiten, die man gar nicht beweisen kann (Bild links).

Für den vorliegenden Band haben die Professoren Konrad Polthier von der Freien Universität Berlin und Georg Glaeser von der Universität für angewandte Kunst in Wien tief in die eigene Vorratskiste gegriffen; Polthiers Minimalflächen (Spektrum der Wissenschaft 10/1990, S. 96) sehen auch 20 Jahre nach ihrer Erstvisualisierung noch richtig gut aus. Aber nicht nur das: Die Autoren haben sich auch bei ihren Kollegen umgeschaut. So ist eine überaus reichhaltige, in jeder Hinsicht bunte Mischung zu Stande gekommen, angereichert mit zahlreichen Weblinks zur Vertiefung.

Die Grenzen zur Kunst sind fließend. Das gilt nicht nur für die sattsam bekannten Fraktale, denen das Buch eine Pflicht-Dopelseite widmet. So kommt neben vielen anderen auch der Künstler Bahman Kalantari mit seiner »Polynomiographie« zu Ehren.

Christoph Pöppe

Der Rezensent ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.



Die komplexen Nullstellen aller Polynome vom Grad bis zu 18 mit Koeffizienten sämtlich gleich ± 1 , eingefärbt nach ihrer Stabilität bezüglich Variation des Koeffizienten a_3 . Die »schwarzen Löcher« rund um die Einheitswurzeln waren zuvor unbekannt.

Georg Glaeser, Konrad Polthier

Bilder der Mathematik

Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2009. 324 Seiten, € 34,95

Nackte Singularitäten

Nach gängiger Meinung wird ein Schwarzes Loch – der unendlich dichte (singuläre) Punkt, zu dem massereiche Sterne kollabieren – stets vom Ereignishorizont umhüllt, der die Grenze herkömmlicher Physik markiert. Aber muss das so sein?

KENN BROWN, MONDLITHIC STUDIOS

WEITERE THEMEN IM DEZEMBER

Hirnaktivität beim Tanz

Fast instinktiv bewegen wir uns zu rhythmischer Musik. Das Hirn ist dabei stark beschäftigt. Viele seiner Regionen müssen kooperieren, damit wir tanzen können

Erstes Aufblitzen menschlicher Kultur

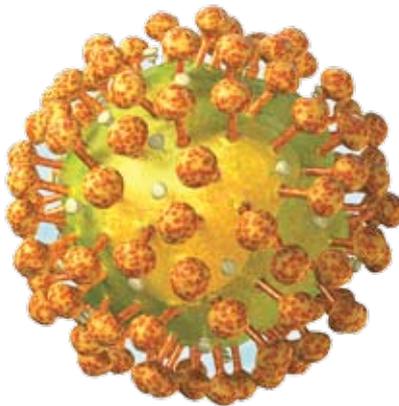
Viel früher als in Europa lebten in Südafrika zweimal vorübergehend Menschen, die Symbole benutzten

Möchten Sie stets über die Themen und Autoren eines neuen Hefts auf dem Laufenden sein?

Wir informieren Sie gern per E-Mail – damit Sie nichts verpassen!

Kostenfreie Registrierung unter:
www.spektrum.com/newsletter

PHOTO RESEARCHERS / ROGER HARRIS



Neue Strategien gegen Tuberkulose

Im Kampf gegen die Infektionskrankheit, die nach Aids die meisten Todesopfer fordert, versagen Antibiotika immer öfter. Jetzt setzen Mediziner auf neuartige Angriffsziele für Medikamente



Null CO₂-Ausstoß bis 2030

Ein Plan für Kopenhagen: Wie sich der globale Kohlendioxidausstoß bis 2030 auf null senken lässt

AURORA PHOTOS / JOHN LEE

