



ERDE 3.0

Wie verkraftet die Erde zwei Milliarden Autos?

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC AMERICAN

Spektrum
DER WISSENSCHAFT
10/10
OKTOBER 2010

PSYCHOLOGIE

Babys begreifen mehr, als wir denken

MIKROBIOLOGIE

Die schaurige Mär von den Nanobakterien

TITAN

Die vertrauten Landschaften des Saturnmonds

Ist Zeit eine Illusion?

Die »Theorie für Alles« erzwingt neue Konzepte der Zeit

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



www.spektrum.de



Reinhard Breuer
Chefredakteur

Zeitlose Fragen und die Illusion der Zeit

Schon zum zweiten Mal in diesem Jahr heben wir das Thema »Zeit« auf die Titelseite. Der Beitrag in der aktuellen Ausgabe schildert, wie die moderne Physik mit dem Konzept der Zeit ringt. Heißt das, dass uns womöglich die Themen ausgehen? Keine Sorge, liebe Leser! Zugegeben – in der Redaktionssitzung, in der wir dieses Heft zusammengestellt haben, gab es eine heftige Diskussion darüber, ob dasselbe Titelthema relativ kurz hintereinander wirklich sinnvoll sei. Letztlich bedachten wir, was wir aus vielen Befragungen wissen: Im Zentrum Ihrer Interessen steht die Grundlagenforschung – und ganz besonders die Fundamentalprobleme unseres naturwissenschaftlichen Weltbilds. Dazu gehört auch die Diskussion über das Phänomen Zeit in der modernen Physik.

Denn: Was wir als Zeit in unserem subjektiven Alltag erleben, ist in den Theorien der Forscher entweder nur eingeschränkt brauchbar oder gänzlich umstritten. Doch solange die Rolle der Zeit nicht wirklich geklärt ist, wird – so sehen es jedenfalls prominente Experten – auch eine einheitliche Theorie aller Fundamentalkräfte außerhalb unserer Reichweite sein.

Physiker seit Hermann Minkowski und Albert Einstein haben uns davon überzeugt, dass wir weniger in den getrennten Dimensionen von Raum und Zeit als vielmehr in einer Raumzeit leben. Dennoch blieb Zeit immer der etwas abstraktere Aspekt der Welt. Entfernungen lassen sich mit Zollstock und Lineal messen, Zeitpunkte und Zeitverläufe dagegen nur durch Vergleich mit standardisierten Objekten – Uhren genannt. Zudem ist vielen gar nicht bewusst, welche Quali-

täten jeder Zeitbegriff im Prinzip haben sollte: Ereignisse zu markieren, Chronologien, kausale Beziehungen und Veränderungen zu bestimmen und ihr im Zeitpfeil eine eindeutige, nichtumkehrbare Richtung zu geben.

Keine Theorie der Physik verfügt über einen Zeitbegriff, der dies alles leistet. So legt bisher kein Naturgesetz für den Zeitpfeil eine Richtung fest. Am meisten kann noch Newtons »absolute Zeit«, die jedoch von Einsteins Relativitätstheorien und der Quantenphysik in ihrem absolutem Charakter stark beschnitten wurde. Und in den Theorien zur Vereinheitlichung von Schwerkraft und Quantenphysik verlor die Zeit noch weiter an Bedeutung. So taucht in Formulierungen der Quantengravitation, deren endgültige Fassung noch aussteht, Zeit gar nicht mehr auf. Fachleute wie der Kölner Physiker Claus Kiefer konstatierten »die fundamentale Zeitlosigkeit der Quantengravitation«.

Wenn aber in solchen Theorien Zeit als fundamentaler Parameter verschwindet, wie lässt sich dann verstehen, warum uns die Welt stets der Zeit unterworfen erscheint? Der Physiker und Wissenschaftsphilosoph Craig Callender von der University of California in San Diego forscht seit Jahren über diese Fragen. Sein Beitrag hat mich am Ende, wo er eine mögliche Lösung des Zeiträtsels andeutet, überrascht. Nur: Wie diese physikalische dabei mit der subjektiv erlebten Zeit zusammenhängt – das ist zweifellos noch eine ganz andere Geschichte (S. 32).

Herzlich Ihr

Reinhard Breuer



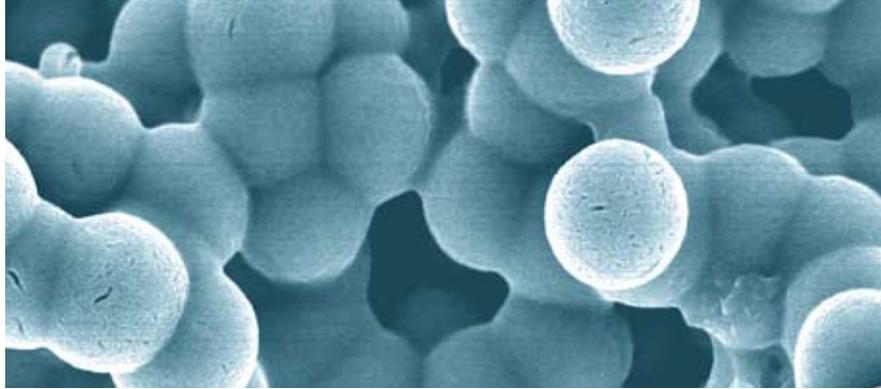
Jetzt am Kiosk: Das neue »Spektrum«-Dossier versammelt die Beiträge unseres Autors Norbert Treitz über Physik mit spannenden und oft überraschenden Beispielen

INHALT



22

ASTRONOMIE & PHYSIK
Ein erdähnlicher Mond



MEDIZIN & BIOLOGIE
Ominöse Nanobakterien

44



60

MEDIZIN & BIOLOGIE
Warum wir nackt sind

AKTUELL

8 Spektrogramm

Angst einflößender Kaffee · Fußbälle im Weltall · Schnapsschuss der Elektromobilität · Steinzeitliche Party · Lang wirkendes Schmerzmittel? u. a.

11 Bild des Monats

Thors Helm am Himmel

12 Supernova mit zwei Gesichtern

Sternexplosion erscheint je nach Betrachtungswinkel verschieden

14 Beeinflusst das Knochenmark unser Verhalten?

Zusammenhang zwischen Zwangsstörung und Immunsystem entdeckt

16 Proteinfaltung als Computerspiel

Teilnehmer eines Onlinespiels falteten Proteine besser als Rechenprogramme

18 Heiße Parade im Wüstensand

Auch Vogelweibchen sind empfänglich für sexy Anblicke

20 Springers Einwürfe

Vier Augen sehen mehr als zwei

ASTRONOMIE & PHYSIK

22 ▶ Fast ein Double der Erde

Die Landschaften des Saturnmonds Titan erscheinen uns seltsam vertraut, denn seine Verwandtschaft mit der Erde ist unübersehbar

SCHLICHTING!

30 Hoch hinaus

Vögel rasten gern auf Hochspannungsleitungen? Das ist nur die halbe Wahrheit

▶ TITEL

32 Die Entthronung der Zeit

Eine neue Theorie sieht in der Zeit nur eine abgeleitete Größe, die sich aus der Art ergibt, wie wir unsere im Grunde statische Welt erleben

PHYSIKALISCHE UNTERHALTUNGEN

40 Falsche Töne und die Quantenmechanik

Die Unschärferelation ist aus einer sehr klassischen Messungengenauigkeit herleitbar

MEDIZIN & BIOLOGIE

44 ▶ Gibt es Nanobakterien?

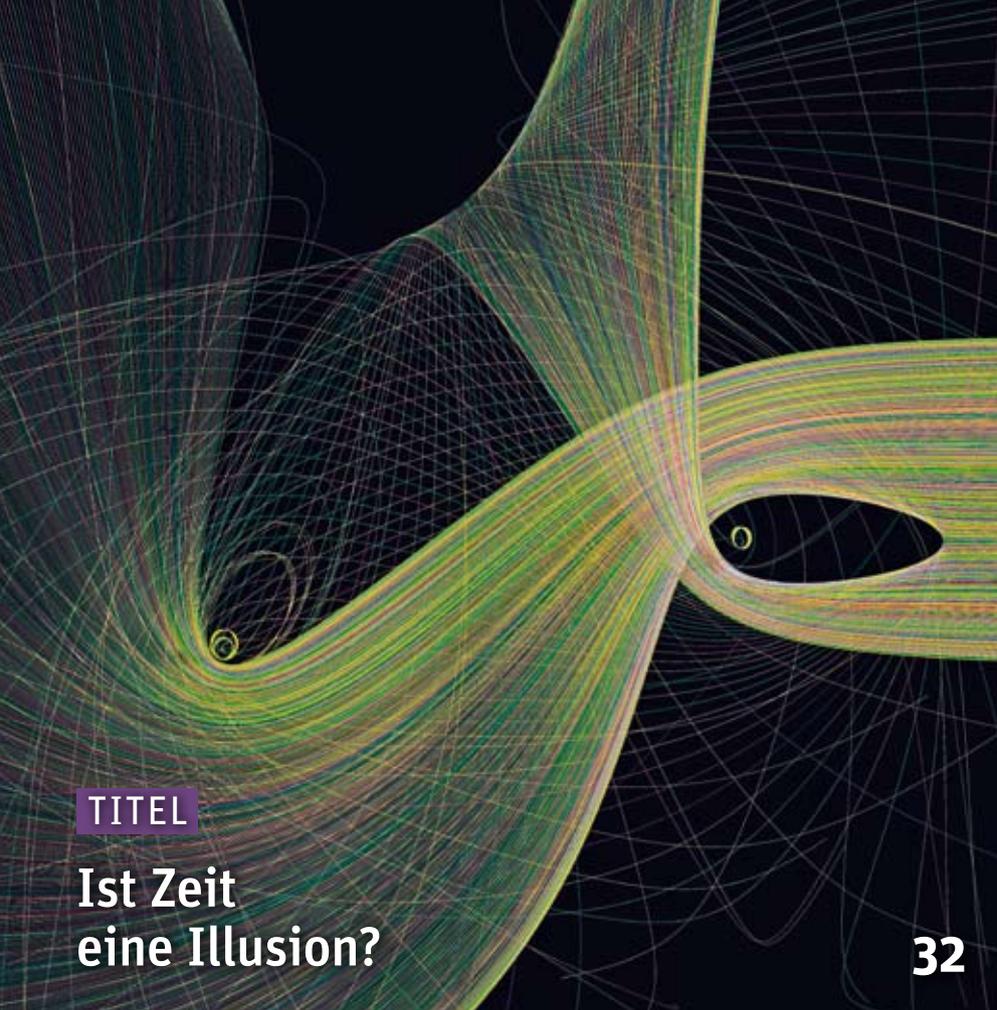
Bis vor Kurzem galten sie als kleinste bekannte Krankheitserreger. Jetzt ist klar: Es handelt sich nicht um Lebensformen. Dennoch spielen Nanobakterien eine wichtige Rolle für unsere Gesundheit

52 Medikamente aus DNA

Nach Jahren voller Fehlschläge stehen nun Impfstoffe und Medikamente auf DNA-Basis vor dem Durchbruch

60 ▶ Warum Menschen kein Fell haben

Wahrscheinlich verloren die Menschen ihr Fell, als sie sich auf eine trockenere Umwelt einstellen mussten. Später kamen die neuen Anpassungen der Hirnentwicklung zugute



TITEL

Ist Zeit eine Illusion?

32



68

MENSCH & GEIST
Kleinkinder als Statistiker



90

TECHNIK & COMPUTER
Nachhaltiger Verkehr – nur ein Wunschtraum?

MENSCH & GEIST

68 ▶ Was Kleinkinder schon alles begreifen 
Kleine Kinder, sogar schon Babys, ergründen die Welt nach wissenschaftlichen Prinzipien. Sie experimentieren, arbeiten mit Statistiken und stellen intuitiv Theorien auf

ERDE & UMWELT

80 Der unerkannte Baustein der Erde
Die Entdeckung eines neuen Minerals hoher Dichte lässt den Erdmantel unruhiger erscheinen als bisher vermutet. Daraus ergeben sich interessante Rückschlüsse auf die Erdgeschichte

TECHNIK & COMPUTER

SERIE TEIL I
90 Zwei Milliarden Autos
Die Zahl der Fahrzeuge wird sich in naher Zukunft verdoppeln. Um die damit einhergehenden Probleme zu lösen, führt kein Weg an elektrischen Antrieben und Hybridfahrzeugen vorbei

FRAG DEN EXPERTEN
98 Festigkeit dank Wasser
Warum härtet Zement aus, wenn man ihn mit Wasser anrührt?

Titelmotiv: Keith Peters

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

WEITERE RUBRIKEN

- 3 Editorial: Zeitlose Fragen und die Illusion der Zeit
- 6 Leserbriefe/Impressum
- 74 Im Rückblick
- 99 Onlineangebote
- 106 Vorschau

- 100 Rezensionen:
- Julian Havil *Verblüfft?!*
 - Julian Havil *Das gibt's doch nicht!*
 - Christina und Manfred Kage *KAGE's fantastische Mikrowelten*
 - Manjit Kumar *Quanten*
 - Klaus Kornwachs *Zuviel des Guten*
 - Esther V. Schärer-Züblin (Hg.) *Forschung und Ernährung – ein Dialog*

nach Seite 98
Eine Sonderpublikation der Deutschen Forschungsgemeinschaft 2010

Briefe an die Redaktion ...

... sind willkommen! Schreiben Sie uns auf www.spektrum.de/leserbrieft oder direkt beim 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 Leserbrieft
Postfach 104840
69038 Heidelberg
E-Mail: leserbrieft@spektrum.com

Die vollständigen Leserbrieft finden Sie unter:
www.spektrum.de/leserbrieft

Gravitationslinseneffekte nicht diskutiert

Das kosmologische Standardmodell auf dem Prüfstand, August 2010

P. Kroupa und M. Pawlowski zeigen recht überzeugend auf, dass Beobachtungsdaten von Satellitengalaxien im Widerspruch zur Annahme von Dunkler Materie stehen, und stärken so alternative Vorstellungen wie MOND (modifizierte newtonsche Dynamik). Leider fallen jedoch damit nicht vereinbare Beobachtungen unter den Tisch. Die Autoren verlieren kein Wort über die Analyse des Gravitationslinseneffekts von Galaxienhaufen, der zufolge die gravitierende Masse die der baryonischen um ein Vielfaches überschreitet. Insbesondere am Beispiel des Haufens Abell 520 zeigen

die Daten, dass die Verteilung von Dunkler Materie und Galaxien signifikant voneinander abweicht. Auch wenn dieser Befund noch nicht wirklich verstanden ist: Mit der Annahme, alle Gravitation ginge von baryonischer Materie aus, ist er meines Erachtens nicht vereinbar.

Auch die Diskussion des kosmologischen Standardmodells gibt Rätsel auf. So sei die Frage ungelöst, ob die Raumzeit »überhaupt unabhängig von Masse existieren kann«. Richtig ist, dass sich Einstein anfänglich heftig gegen die Vorstellung eines leeren Universums gewehrt hat. Aber ebendieses offenbaren wenig später die Friedmann-Lemaître-Lösungen seiner Feldgleichungen, die bis heute Bestandteil des Standardmodells sind. Selbst wenn, wie behauptet, diese Frage noch ungeklärt wäre, lieferte sie kein brauchbares Argument. Denn auch die mit der Dunklen Materie konkurrierenden Hypothesen handeln von Materie, nicht von einem leeren Universum.

Dr. Timm Deeg,
Wachenheim an der Weinstraße

Kein Widerspruch zum Äquivalenzprinzip

Egbert Scheunemann über »Vom Urknall zum Durchknall« von Alexander Unzicker, Rezensionen, August 2010

Das »nicht ganz geklärte Problem« der allgemeinen Relativitätstheorie, dass »in

Unnötig kompliziert

Die Energie der platzenden Kirsche Schlichting!, Juli 2010

Ich habe mit Interesse den Artikel über Osmose und platzende Kirschen gelesen. Die technische Anwendung als Kraftwerk erscheint mir jedoch unnötig kompliziert, ebenso wie derzeitige Süßwassergewinnungsanlagen.

Man könnte einfach einen zweiseitig mit Membranen versehenen Körper zirka 200 Meter tief im Meer schwebend versenken. Aus diesem Körper würde Süßwasser noch hinausströmen – man könnte ihn als unteres Ende eines Wasserkraftwerks verwenden. Für größere Volumenströme müsste man mehrere solcher Platten nebeneinander anordnen. Die einzelnen Platten sollten vertikal stehen, das sorgt für eine Strömung auf Grund des Dichtegradienten auf der Salzwasserseite.

Taucht man die Apparatur tiefer ein und ersetzt die Wasserkraftanlage durch eine Pumpe, hat man ein Süßwasserkraftwerk mit geringerem Energieverbrauch als derzeitige an Land gebaute. Es muss lediglich das Süßwasser im Tauchkörper auf Meeresniveau angehoben werden. Zusätzlich sollte durch die ständige

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur (v.i.S.d.P.): Dr. habil. Reinhard Breuer, Dr. Carsten Könneker

Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Hartwig Hanser (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser

Redaktion: Thilo Körkel (Online Coordinator), 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: Britta Feuerstein, Petra Mers

Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg,

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

Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH,

Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg;

Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg,

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

Amtsgericht Mannheim, HRB 338114

Verlagsleiter: Richard Zinken

Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck

Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733

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

E-Mail: service@spektrum.com

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

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

Bernhard Gerl, Andrea Jungbauer, Dr. Rainer Kaiser, Dr. Andrea

Kamphuis, Dr. Susanne Lipps-Breda, Dr. Michael Springer,

Dr. Sebastian Vogel.

Leser- und Bestellservice: Helga Emmerich, Sabine Häusser,

Ute Park, 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 € 7,90 (D/A) / € 8,50 (L)/sFr. 14,00; im

Abonnement € 84,00 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studien-

nachweis) € 69,90. Die Preise beinhalten € 8,40 Versandkosten.

Bei Versand ins Ausland fallen € 8,40 Portomehrkosten an. Zahlung

sofort nach Rechnungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708

(BLZ 600 100 70). Die Mitglieder des Verbands Biologie, Biowissen-

schaften 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 Döhl; Anzeigenleitung:

Katrin Kanzok, Tel. 0211 887-2483, Fax 0211 887 97-2483; verant-

wortlich für Anzeigen: Ute Wellmann, Postfach 102663, 40017

Düsseldorf, Tel. 0211 887-2481, Fax 0211 887-2686

Anzeigenvertretung: Hamburg: Matthias Meißner, Brandstwierte 1,

6. OG, 20457 Hamburg, Tel. 040 30183-210, Fax 040 30183-283;

Düsseldorf: Ursula Haslauer, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf,

Tel. 0211 887-2053, Fax 0211 887-2099; Frankfurt: Thomas Wolter,

Escherheimer Landstraße 50, 60322 Frankfurt am Main,

Tel. 069 2424-4507, Fax 069 2424-4555; München: Jörg Bönsch,

Nymphenburger Straße 14, 80335 München, Tel. 089 545907-18,

Fax 089 545907-24; Kundenbetreuung Branchenteams: Tel. 0211

887-3355, branchbetreuung@iqm.de

Druckunterlagen an: iq media marketing gmbh, Vermerk:

Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf,

Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686

Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 31 vom 01.01.2010.

Gesamtherstellung: L. N. Schaffrath Druckmedien GmbH & Co. KG,

Marktweg 42–50, 47608 Geldern

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.

Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2010 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg.

Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.

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

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN

75 Varick Street, New York, NY 10013-1917

Editor in Chief: Mariette DiChristina, President: Steven Inchoombe,

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 Bradford

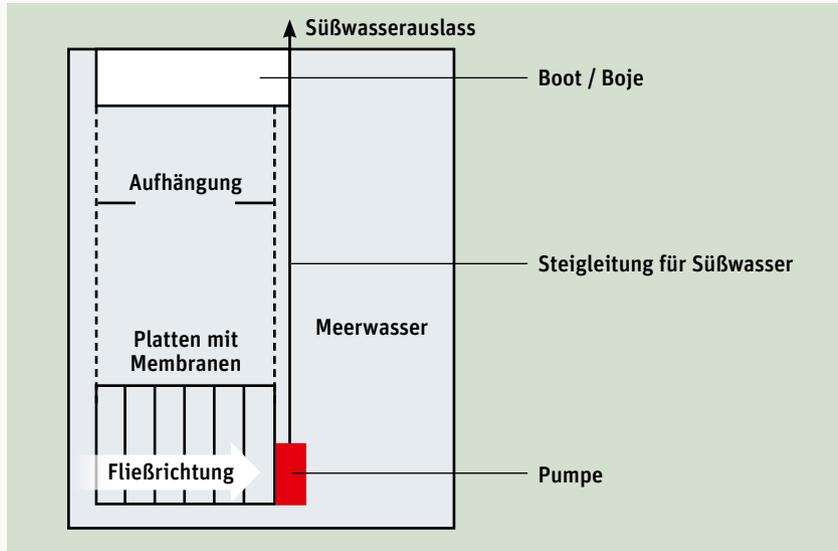


Erhältlich im Zeitschriften- und Bahnhofsbuchhandel und beim Pressefachhändler mit diesem Zeichen.





H. JOACHIM SCHLICHTING



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH MICHAEL SCHINDLER

Durchströmung der Salzgehalt auf der Salzwasserseite geringer sein, was kleinere Druckdifferenzen ermöglicht. Zur Wartung wird der tauchende Teil zur Oberfläche gebracht. Anbei schicke ich Ihnen eine Skizze für ein im Wasser hängendes Süßwasserwerk.

Michael Schindler, Wien

Antwort des Autors

Prof. Dr. H. Joachim Schlichting:

Der alternative Vorschlag von Herrn Schindler, durch Osmose Süßwasser oder Energie aus Meerwasser zu gewinnen (wobei ein Nichtgleichgewichtsozean vo-

Das Phänomen Osmose lässt nicht nur Kirschen platzen (links), man kann es auch zur Gewinnung von Süßwasser nutzen. In der Grafik von Michael Schindler durchfließt Meerwasser halbdurchlässige Membranen, die nur das Salz zurückhalten. Eine Pumpe transportiert das gewonnene Süßwasser dann auf Meeresspiegellhöhe.

rausgesetzt werden muss), ist bedankenswert. Wenn ich ihn richtig verstehe, haben allerdings schon 1974 Octave Levenspiel und Noel de Nevers analoge Überlegungen angestellt (Science 183 (4121), S. 157–160, 18. Januar 1974).

Der Unterschied zu dem im »Spektrum«-Beitrag skizzierten Osmosekraftwerk liegt demnach vor allem darin,

dass man auf große Meerestiefen angewiesen ist – mit allen Problemen praktischer Art, die sich daraus ergeben. Da den Wissenschaftlern und Konstrukteuren auch diese Variante eines Osmosekraftwerks bekannt war, werden wohl diese und/oder andere Probleme eine Rolle bei der Entscheidung für einen der Kraftwerkstypen gespielt haben.

einem Gravitationsfeld ruhende Ladungen »einfach so« Energie abstrahlen müssen«, ist kein Problem!

Nach dem Äquivalenzprinzip macht es physikalisch keinen Unterschied, ob ein System in einem homogenen Gravitationsfeld ruht oder in einem gravitationsfreien Raum durch eine äußere Kraft eine konstante Beschleunigung erfährt. Ob eine Ladung Energie abstrahlt, ist somit eine Frage des Bezugssystems des Beobachters: Für einen, der sich mit ihr mitbewegt, erzeugt sie in beiden Fällen keine elektromagnetischen Wellen. Für einen, der frei seiner Trägheit folgt, also im schwerelosen Raum mit gleich bleibender Geschwindigkeit treibt, während die Ladung beschleunigt wird, erzeugt sie die gleichen Wellen wie für einen, der frei im Gravitationsfeld fällt, wäh-

rend die Ladung ruht. Kein Widerspruch also zum Äquivalenzprinzip, sondern vielmehr die logische Konsequenz aus diesem!

Aus ähnlichen Gründen verfehlt ist Unzickers (von Scheunemann zustimmend zitierte) Behauptung, die kosmische Hintergrundstrahlung definiere – im Widerspruch zur allgemeinen Relativitätstheorie – ein absolutes Bezugssystem. Man kann messen, wie man sich gegen das beobachtete System des Mikrowellenhintergrunds bewegt, aber daraus kann man nicht ableiten, wie dieses selbst sich bewegt.

Walter Pfohl,
München

(Die ungekürzte Version dieses Leserbriefs ist unter www.spektrum.de/artikel/1041899 nachzulesen.)

Korrigendum

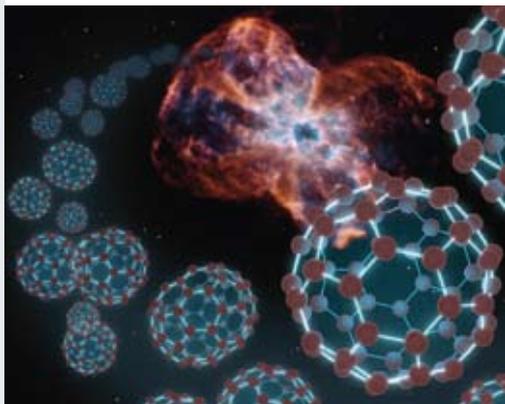
Die Geschichte von den drei kleinen Achtecken, August 2010

Im vorletzten Absatz auf S. 62 ist zu ergänzen, dass m ungerade sein soll. Dann ist die dort gegebene Darstellung für n eindeutig.

In den letzten Fragen auf S. 66 ist der Begriff »Breite« zu präzisieren. Gemeint ist der kleinstmögliche Abstand zweier Geraden, zwischen denen man das Polygon gerade noch durchschieben kann. Es handelt sich also um die kleinste unter den Breiten in einer Richtung, die auf S. 62, zweite Spalte oben definiert werden.

Gerhard Düsing aus Eppstein hat uns auf diese Unklarheiten aufmerksam gemacht.

Auch im Weltall gibt es Fußbälle



NASA, JPL, CALTECH / SSC, TIM PYLE / ESA / STSCI, KEITH NOLL

In Planetarischen Nebeln gebildete Fullere wie C_{60} und C_{70} – hier als Kugelstabmoleküle dargestellt – gelangen von dort ins interstellare Medium.

■ In den vergangenen Jahrzehnten haben Astronomen eine Vielzahl komplexer Moleküle im Weltall aufgespürt. Wissenschaftler um Jan Cami von der University of Western Ontario im kanadischen London bereicherten das Sortiment nun um zwei weitere Exemplare: die Fullere C_{60} , auch bekannt als »Buckyballs«, und C_{70} .

Mit dem Weltraumteleskop Spitzer nahmen die Forscher das infrarote Emissionsspektrum eines Planetarischen Nebels auf und identifizierten darin eindeutige Spuren der Kohlenstoffkäfige. Nach der Intensität der beobachteten Spektrallinien zu urteilen, muss die Menge der beiden Fullerenarten zusammengenommen ungefähr der Masse des Mondes entsprechen. Sie sitzen auf der Oberfläche von Staubkörnern. Frei umherschwebende

Moleküle ließen sich dagegen nicht nachweisen.

Seit der Entdeckung der Buckyballs in Laborexperimenten im Jahr 1985 spekulieren Wissenschaftler, dass erhebliche Mengen an Fullerenen in der Umgebung kohlenstoffreicher Sterne entstehen könnten. Wegen ihrer großen Stabilität sollten sie die harschen Bedingungen im interstellaren Raum überstehen.

In Meteoriten stießen Wissenschaftler bereits auf die fußballförmigen Moleküle. Beobachtungen von interstellaren Nebeln und Sternhüllen lieferten zudem Hinweise auf Fullere im All. Überzeugen konnten diese vagen Indizien – abgesehen von einem unpublizierten Fall – laut Cami und Kollegen bislang allerdings nicht.

Science, Online-Vorabveröffentlichung

EVOLUTION

Jüngster Urahn von Affe und Mensch?

■ Wann lebte der letzte gemeinsame Vorfahr der geschwänzten Altweltaffen, wissenschaftlich Cercopithecoiden genannt, und der Hominoiden, zu denen auch der Mensch gehört? Ein neuer Fossilfund aus dem Nahen Osten könnte diese immer noch viel diskutierte Frage jetzt einer Antwort näher bringen.

Forscher um den Paläontologen William Sanders von der University of Michigan in Ann Arbor fanden in der Provinz Hijaz im westlichen Saudi-Arabien Teile des Gesichtsschädels eines mittelgroßen Primaten, dessen Morphologie sowohl Analogien zu den heutigen Altweltaffen als auch zu den Menschenartigen aufweist. Damit dürfte er einer der letzten gemeinsamen Vorfahren von beiden gewesen sein. Das Erstaunliche dabei ist, wann der ehemals etwa 15 bis 20 Kilogramm schwere Urprimat, der den Namen *Saadanius hijazensis* erhielt, gelebt hat: Die Fundstelle ließ sich auf ein Alter von 29 bis 28 Millionen Jahren datieren.

Dieses Schädelfragment des Primaten *Saadanius hijazensis* fand sich, eingebettet in eisenreiches Gestein, im Westen Saudi-Arabien.

Genomanalysen zufolge fand die Trennung von Cercopithecoiden und Hominoiden im frühen Oligozän vor knapp 35 bis 30 Millionen Jahren statt. Die frühesten eindeutig den Hominoiden zuzuordnenden Fossilienfunde haben ein Alter von 24 Millionen Jahren. Für die Zeit dazwischen gab

es bisher keine eindeutig interpretierbaren fossilen Zeugnisse. *Saadanius hijazensis* lässt nun darauf schließen, dass sich die endgültige Trennung frühestens vor 29 Millionen Jahren vollzog – und damit später, als sich aus Genomanalysen ergibt.

Nature, Bd. 466, S. 360



IMAGES, ZAMMOUT, UNIVERSITY OF MICHIGAN MUSEUM OF PALEONTOLOGY

Todesliste für namenlose Frösche

■ Seit Jahrzehnten beunruhigt ein rätselhaftes Amphibiensterben weltweit die Biologen. Inzwischen hat sich der Pilz *Batrachochytrium dendrobatidis* als mutmaßlicher Hauptverursacher herausgeschält. Die Folgen seines Wütens in Mittelamerika, wo sich der Schädling seit den 1980er Jahren wellenartig ausbreitet, ließen sich nun in einer Fallstudie erstmals quantitativ dokumentieren.

Nach dem Verschwinden der Goldkröte aus Costa Rica rief Karen R. Lips, damals an der University of Maryland in Baltimore, ein Überwachungsprogramm für Amphibien im noch intakten Nationalpark Omar Torrijos in der Nähe von El Copé im benachbarten Panama ins Leben. Dort konnte sie zwischen 2000 und 2003 zusammen mit Kollegen 63 Arten identifizieren.

Außerdem ermittelten die Forscher DNA-Profile aller gefundenen Tiere: kurze Sequenzen, die für die jeweilige Spezies kennzeichnend sind. Anhand genetischer Vergleiche ließen sich so Verwandtschaftsverhältnisse ermitteln und genaue Stammbäume aufstellen. Daraus konnten die Forscher auf die Existenz elf weiterer, zuvor nicht beschriebener Amphibienarten schließen.

Mit dem Vordringen des Pilzes starben 25 von den 63 identifizierten Spezies bis 2008 aus – und mit ihnen elf Gattungen und fünf Familien. 40 Prozent der ehemaligen Biodiversität sind heute also verschwunden. Auch bei den elf unbekannteren Spezies zeigte sich, dass fünf von ihnen nicht überlebt haben, also ausgelöscht wurden, bevor sie genauer untersucht und beschrieben werden konnten.

PNAS, Bd. 107, S. 13777



ANDREW J. CRAWFORD, UNIVERSIDAD DE LOS ANDES, BOGOTÁ

Zu den auf eine Infektion mit dem Pilz *Batrachochytrium dendrobatidis* getesteten Amphibien in Panama zählte auch dieser Beutelfrosch der Art *Hemiphractus fasciatus*.

FEMTOCHEMIE

Schnappschuss der Elektronenbewegung

■ Mit Laserblitzen von weniger als 150 Attosekunden (trillionstel Sekunden) Dauer ist es Wissenschaftlern am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching gelungen, die Bewegung von Valenzelektronen in der äußersten Schale eines ionisierten Kryptonatoms in Echtzeit zu beobachten. Dieser methodische Durchbruch weckt Hoffnungen, künftig auch in komplexeren Systemen jene fundamentalen Prozesse im Detail untersuchen zu können, die dem Zustandekommen oder Brechen chemischer Bindungen zu Grunde liegen.

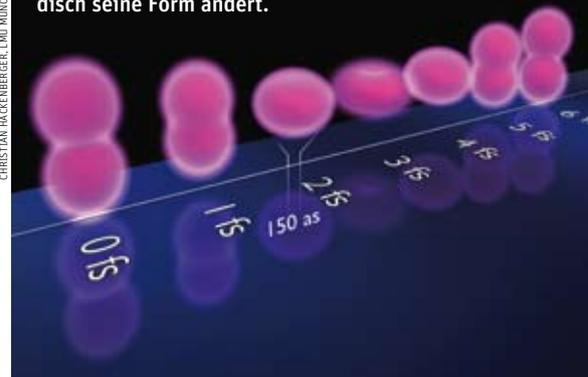
Kurz aufeinander folgende Laserblitze mit Pulsdauern im Bereich von Femtosekunden (billiardstel Sekunden) dienen schon heute dazu, eine chemische Reaktion zunächst auszulösen und dann ihr Fortschreiten zu verfolgen. Diese Zeitspanne reicht aus, um Veränderungen in der

Struktur der reagierenden Moleküle festzustellen. Die Bewegung von Valenzelektronen, die letztlich für das Knüpfen oder Lösen chemischer Bindungen verantwortlich ist, läuft jedoch sehr viel schneller ab.

Ferenc Krausz und seine Kollegen konnten die Methode mit entsprechend kürzeren Laserblitzen nun auch auf diese Zeitspanne ausweiten. In ihrem Experiment ionisierten sie mit einem Anregungspuls im Infrarotbereich eine Anzahl von Kryptonatomen. Das herausgeschossene Elektron hinterließ in deren Valenzschale jeweils ein positiv geladenes »Loch«. Mit Abfragepulsen von weniger als 150 Attosekunden Dauer aus dem extremen Ultraviolettbereich sondierten die Forscher dann nach unterschiedlichen Zeiten die Bewegung der verbleibenden Elektronenwolke. Dabei zeigte die variierende Absorption dieser

Die Abfolge der per Attosekundenspektroskopie gewonnenen Einzelbilder zeigt, wie das Loch in der Elektronenschale eines ionisierten Kryptonatoms periodisch seine Form ändert.

CHRISTIAN HÄCKENBERGER, LMU MÜNCHEN UND MPF FÜR QUANTENOPTIK



Pulse, dass das Loch innerhalb von nur rund sechs Femtosekunden zyklisch zwischen einer lang gestreckten, keulenartigen und einer gedrungenen Form wechselt.

Nature, Bd. 466, S. 739

MEDIZIN

Bald lang wirkendes Schmerzmittel?

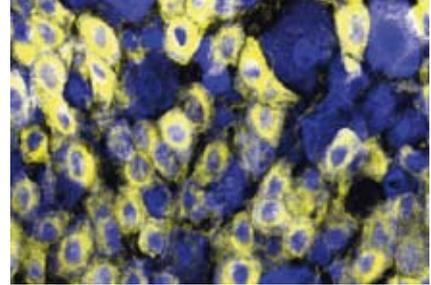
■ Bei chronischen Schmerzen, deren Ursache sich nicht feststellen oder beseitigen lässt, hilft nur die dauerhafte Einnahme von Analgetika. Die aber birgt die Gefahr einer Abhängigkeit. Wünschenswert wäre in solchen Fällen eine Substanz, die das Schmerzsignal über längere Zeit blockiert.

Einen solchen Wirkstoff haben Forscher um Mark J. Zylka von der University of North Carolina in Chapel Hill schon vor zwei Jahren entdeckt. Es handelt sich um die prostataspezifische saure Phosphatase (PAP, nach englisch *prostatic acid phosphatase*). Dieses Protein wird vor allem in der männlichen Vorsteherdrüse gebildet,

kommt in kleinen Mengen aber auch in Nervenzellen vor. Ins Rückenmark von Versuchstieren injiziert, dämpfte es den Schmerz genauso gut wie Morphin, wirkte aber bis zu drei Tage statt nur fünf Stunden.

Nun konnten die Forscher auch den Wirkmechanismus aufklären. Demnach spaltet PAP ein Molekül namens PIP₂ (Phosphatidylinositol-4,5-bisphosphat) in der Membran der Nervenzellen, das eine entscheidende Rolle bei der Weitergabe von Schmerzsignalen über so genannte G-Protein-gekoppelte Rezeptoren spielt.

Zudem stellten Zylka und seine Kollegen fest, dass bei Verabreichung der Substanz



MARK J. ZYLKA, UNIV. OF NORTH CAROLINA AT CHAPEL HILL

Prostataspezifische saure Phosphatase (PAP), in der Aufnahme blau markiert, hemmt die Weitergabe von Schmerzsignalen zwischen – hier gelb eingefärbten – Neuronen.

vor einem schmerzauslösenden Ereignis die Wirkung mit bis zu neun Tagen noch wesentlich länger anhält als bei der Gabe danach. Damit könnte PAP auch gegen postoperative Schmerzen helfen. Bis zu seinem klinischen Einsatz bedarf es aber weiterer Untersuchungen.

Pressemitteilung der University of North Carolina

DROGEN

Angst einflößender Kaffee

■ Kaffee und Tee, aber auch andere koffeinhaltige Getränke wie Cola oder Kakao sind bei vielen vor allem wegen ihrer anregenden Wirkung beliebt. Manche Menschen reagieren darauf allerdings mit Unruhezuständen, Schweißausbrüchen oder Herzrasen. In einem Gemeinschaftsprojekt der Universitäten von Bristol und Würzburg haben Jürgen Deckert und Peter Rogers nun herausgefunden, warum. Demnach ist eine erbliche Disposition für diese Attacken verantwortlich.

Bei den Untersuchungen der beiden Forscher zeigten Probanden mit einer Variante des Gens für den Adenosin-A_{2A}-Rezeptor bei einer bestimmten Koffeindosis, die ungefähr zwei Tassen Kaffee entsprach, typische Angstsymptome, die allmählich wieder abebbten. Der Grund dafür war schnell klar. Normalerweise bindet der A_{2A}-Rezeptor in bestimmten Gehirnregionen den Botenstoff Adenosin, der eine beruhigende Wirkung ausübt. Die mutierte Form lagert stattdessen bevorzugt Kof-

fein an. Der Beruhigungseffekt wird so verhindert.

Die Forscher machten jedoch auch eine paradoxe Entdeckung: Vieltrinker mit der Mutation – die übrigens nur zum Tragen kommt, wenn sie von beiden Elternteilen vererbt wurde – zeigen keine übermäßigen Angstreaktionen. Rogers erklärt das mit einem Gewöhnungseffekt. Regelmäßiger hoher Kaffeekonsum führt zu einer vermehrten Ausbildung von Rezeptoren, so dass Adenosin wieder Bindungspartner findet. Rogers empfiehlt daher, die Unverträglichkeit durch schrittweise Steigerung der Dosis zu kurieren.

Neuropsychopharmacology, Bd. 35, S. 1973

ARCHÄOLOGIE

Steinzeitliche Party-Reste



NATALIE MUNRO, UNIVERSITY OF CONNECTICUT

Diese Lendenwirbel sind die Überreste zweier Rinder, die vor 12000 Jahren zusammen mit 71 Schildkröten bei einem großen Festessen verspeist wurden.

■ Wann feierten Menschen erstmals große Feste? Offenbar früher als bisher gedacht. Reste eines Festschmauses entdeckten Natalie Munro von der University of Connecticut in Storrs und Leore Grosman von der Hebräischen Universität in Jerusalem nun bei der Untersuchung zweier Höhlen in der Region Galiläa. Die Relikte belegen, dass hier etwa 35 Menschen vor 12000 Jahren zwei Rinder und 71 Schildkröten verspeisten. Das große Fessen war vermutlich ein Leichenschmaus: Die Schildkrötenpanzer befanden sich beim Grab einer Schamanin.

Bisher vermuteten Archäologen, dass gemeinschaftliche Feiern frühestens vor 11500 Jahren stattfanden. Damals voll-

zog sich die neolithische Revolution: Aus nomadischen Jägern und Sammlern wurden sesshafte Ackerbauer und Tierzüchter. Die Konsequenz: »Früher konnten die Menschen weiterziehen, wenn es Probleme mit den Nachbarn gab«, so Munro. Nun war das nicht mehr möglich. Feste boten da die Möglichkeit, soziale Konflikte beizulegen und das Gemeinschaftsgefühl zu stärken.

Vor 12000 Jahren hatten die Menschen im Nahen Osten allerdings schon begonnen, Pflanzen und Tiere zu nutzen, die später domestiziert wurden. Begräbnissen kam als rituellen und sozialen Ereignissen eine große Bedeutung zu. Das könnte erklären, warum auch vor dem Neolithikum und den damit verbundenen gesellschaftlichen Umwälzungen bereits große Partys gefeiert wurden.

PNAS, Online-Vorabveröffentlichung

Thors Helm

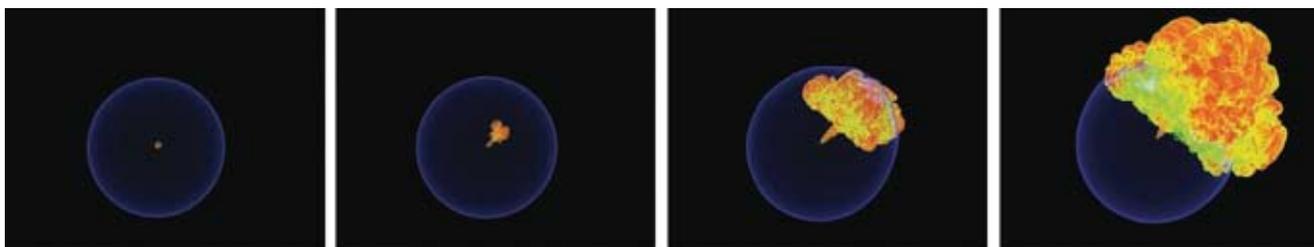
Eigentlich müsste diese kosmische Gaswolke nach dem römischen Götterboten Merkur benannt sein; denn der trägt einen geflügelten Helm. Mythologisch nicht so bewandert, sehen Astronomen darin jedoch die Kopfbedeckung des nordischen Donnergotts, obwohl dessen Markenzeichen der Hammer ist. Erzeugt wurde die interstellare Gasblase mit einem Durchmesser von etwa 30 Lichtjahren von einem intensiven Sternenwind, den ein helles, massereiches Objekt in ihrem Zentrum ausstößt. Dabei handelt es sich um einen so genannten Wolf-Rayet-

Stern: einen extrem heißen Roten Riesen, der kurz vor seiner Explosion als Supernova steht. Der Nebel mit dem Katalognamen NGC 2359 befindet sich 15 000 Lichtjahre entfernt im Sternbild Großer Hund. Für die Falschfarbenaufnahme, die seine filigrane Struktur erstaunlich detailliert und plastisch wiedergibt, haben Astronomen am Stars Shadows Remote Observatory in New Mexico ein optisches Bild so mit Daten von Emissionsspektren überlagert, dass Wasserstoff in Rot und Sauerstoff bläulich erscheint.

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

Supernova mit zwei Gesichtern

Die Vielfalt der Sternexplosionen ist geringer, als es den Anschein hat. Eine umfassende Analyse neuer und alter Daten ergab, dass zwei Untertypen von Supernovae, die zuvor als verschieden galten, in Wahrheit nur die beiden Seiten einer Medaille darstellen.



Von Daniel Kasen

Einige Sterne existieren eine Milliarde Jahre lang und mehr, um dann bei einer Supernova-Explosion in wenigen Sekunden zerrissen zu werden. Wir werden nie Zeugen ihres letzten gewaltigen Aufbaus – nur das Ergebnis sehen wir: eine glühende Wolke radioaktiven Schutts, der mit Geschwindigkeiten von über 10 000 Kilometer pro Sekunde auseinanderstiebt und noch über Entfernungen sichtbar ist, die mehr als dem halben beobachtbaren Universum entsprechen. Keiichi Maeda von der Universität Tokio und seine Kollegen haben bei der genauen Inspektion solcher Trümmerhaufen nun entdeckt, dass in den letzten Augenblicken des sterbenden Sterns einiges im wahrsten Sinn des Wortes schief läuft.

Ihre Untersuchung betrifft Supernovae vom Typ Ia. Laut Theorie handelt es sich dabei um Explosionen Weißer Zwerge, die aus einem kompakten Gemisch von Kohlenstoff und Sauerstoff bestehen – Elementen, die unter Energieabgabe zu schwereren Atomen verschmelzen können. Diese Sterne befinden sich zwar eigentlich im Endstadium ihrer Entwicklung, saugen von einem Begleiter aber Material ab und geraten so immer dichter an den kritischen Punkt, an dem sie unter dem eigenen Gewicht kollabieren, was ihr Kernmaterial augenblicklich explosionsartig zünden lässt.

Solche Supernovae haben im Maximum ihrer Lichtkurve eine erstaunlich einheitliche Leuchtkraft von etwa 10^{36} Watt. Aus ihrer Helligkeit am Himmel lässt sich somit ihr Abstand erschließen. Kosmologen verwenden sie aus diesem Grund als »Standardkerzen«, um die Ausmaße des Universums und seine Ausdehnung seit dem Urknall zu bestimmen.

Bei geeigneter Kalibrierung zeigen Supernovae vom Typ Ia die Entfernung auf etwa zehn Prozent genau an. Eine noch höhere Präzision wäre natürlich wünschenswert, um gewisse kosmologische Parameter weiter eingrenzen zu können. Einige Astrophysiker bezweifeln jedoch, dass sie möglich ist. Die Vorläufersterne solcher Supernovae wurden in unterschiedlichen galaktischen Welten geboren, und sie sterben in einem turbulenten Feuersturm. Warum sollten sie sich alle wie ein Ei dem anderen gleichen?

Tatsächlich tun sie das auch nicht. Jüngste Beobachtungen ergaben ein ebenso interessantes wie beunruhigendes Maß an Vielfalt. So stoßen einige Supernovae Material mit ungewöhnlich hoher Geschwindigkeit aus, wie sich an der Rotverschiebung der Spektrallinien etwa eine Woche nach der Explosion ablesen lässt. Die Vorderfront des Trümmerhaufens bewegt sich bei ihnen eineinhalbmal so schnell auf die Erde zu wie üblicherweise. Das spricht für einen energiereicheren Untertyp von Ia-Supernovae. Anders als man erwarten könnte, strahlen

Bei dieser Computersimulation der ersten 1,6 Sekunden einer Supernova vom Typ Ia zündet ein Weißer Zwerg etwas abseits von seinem Zentrum. Während sich die thermokernleare Reaktionsfront über den gesamten Stern ausbreitet, lässt der Auftrieb das heiße Verbrennungsmaterial – die Temperatur nimmt von grün nach rot zu – auf der Seite, auf der die Zündung erfolgte, rasch zur Oberfläche emporsteigen. Hier laufen die Kernfusionsprozesse deshalb schneller und vollständiger ab als gegenüber, und die Reaktionsprodukte werden mit größerer Gewalt ausgestoßen.

diese schnellen Supernovae allerdings nicht deutlich intensiver als solche, deren Explosionswolke langsamer daherkommt. Dennoch könnte auch ein kleiner systematischer Unterschied in der Leuchtkraft die Eignung von Supernovae des Typs Ia als präzise Abstandsmesser in Frage stellen.

Laut Maeda und seinen Kollegen besteht der Unterschied zwischen Supernovae mit schnell und langsam expandierender Trümmerwolke aber nur dem Anschein nach; in Wahrheit handelt es sich um zwei Seiten einer Medaille. Die Untersuchungen der Forscher sprechen dafür, dass die Explosion nicht im Zentrum des Vorläufersterns, sondern etwas außerhalb davon einsetzt und das Material auf der einen Seite deshalb mit höherer Geschwindigkeit ausgestoßen wird

UNIVERSITY OF CHICAGO FLASH CENTER

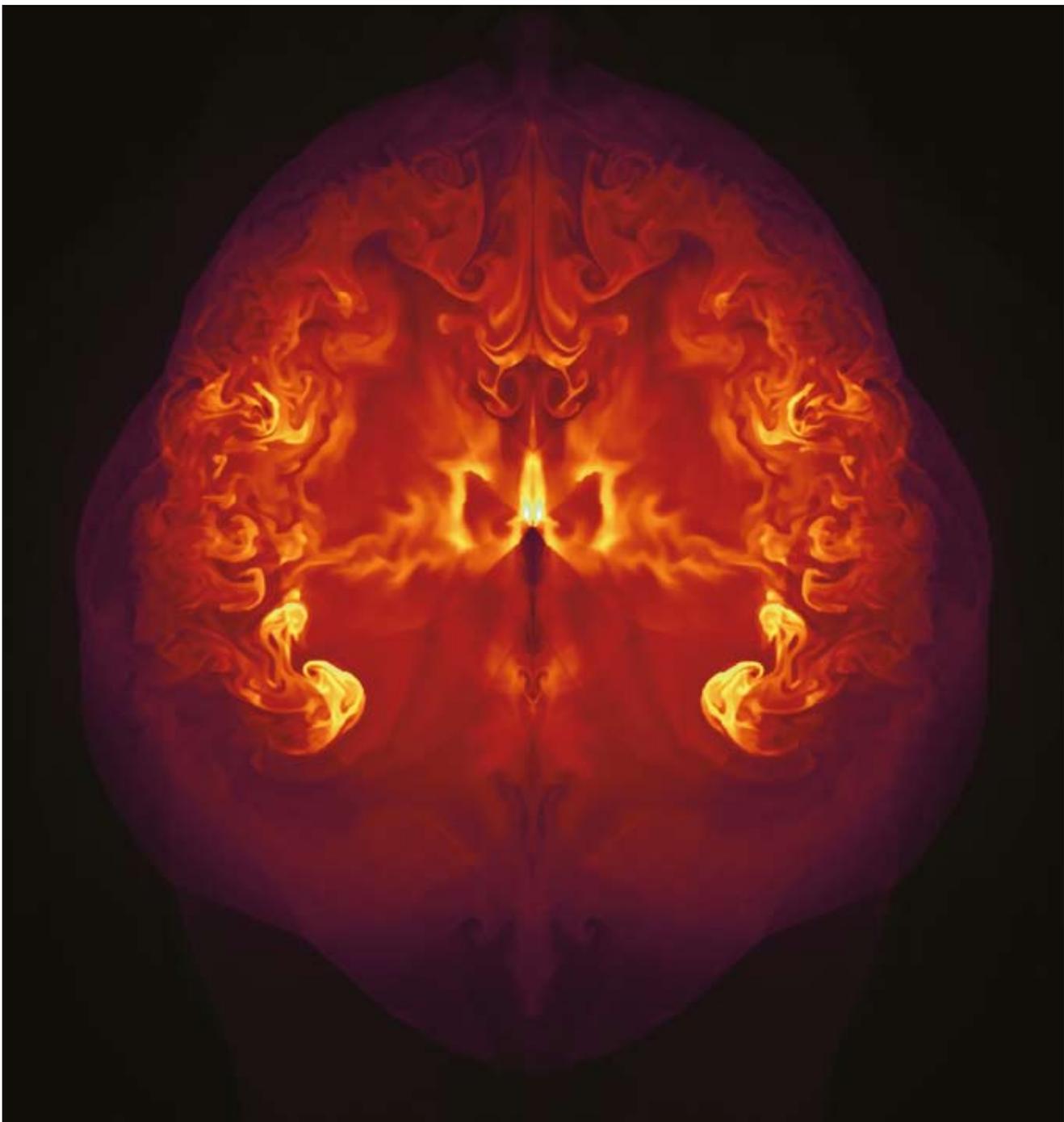
als auf der anderen. Ob eine Supernova vom Typ Ia zur schnellen oder langsamen Sorte gehört, hängt demnach nur davon ab, welche ihrer beiden Seiten zufällig zur Erde gerichtet ist.

Diese Deutung passt zu bestimmten theoretischen Modellen des Explosionsverlaufs. Demnach köchelt der Weiße Zwerg unmittelbar vor der Explosion auf Sparflamme vor sich hin und nähert sich allmählich den kritischen Werten von Druck und Temperatur, bei denen die

zunächst langsam ablaufende Fusionsreaktion außer Kontrolle gerät. In diesem Stadium nimmt die Umwälzbewegung im zentralen Bereich einen dipolaren Charakter an. Blasen heißen Gases steigen dabei in einem gerichteten Strom empor und kreisen einmal um den Stern, bevor sie wieder nach unten sinken. Der im Zentrum entstehende Zündfunke wird von diesem Strom mitgerissen und löst dadurch erst etwas außerhalb die Explosion aus.

Dieser minimale Versatz des Punkts, an dem der Stern durchzubrennen beginnt, reicht aus, die Detonation völlig asymmetrisch ablaufen zu lassen. Während sich die Fusionsreaktion wie ein Lauffeuer ausbreitet, lässt der Auftrieb

Einen asymmetrischen Verlauf der Explosion zeigt auch dieser Querschnitt der simulierten Dichteverteilung zehn Sekunden nach Beginn eines Supernova-Ausbruchs.



FRIEDRICH ROEPKE, MPI FÜR ASTROPHYSIK

die Flammenfront samt den Produkten der thermonuklearen Verschmelzung pilzförmig aufsteigen. Der sich frei schwebend nach oben bewegende Feuerball detoniert dann, kurz bevor oder nachdem er die Oberfläche durchbrochen hat. Das Ergebnis ist weitgehend dasselbe: Auf einer Seite verbrennt das Material des Sterns vollständiger und wird gewaltvoller ausgestoßen als auf der anderen.

Mit Raffinesse und Geduld

Solche azentrischen Explosionen sind in Computersimulationen seit Jahren immer wieder aufgetreten; doch inwieweit sie der Realität entsprechen, ließ sich nur schwer sagen. Supernovae sind mit wenigen Ausnahmen zu weit entfernt, um als ausgedehnte Objekte zu erscheinen. Von der Erde aus sehen wir sie nur als strukturelose Lichtpunkte. Zwar ist ihre Strahlung oft polarisiert, was einen Bruch der Kugelsymmetrie impliziert, aber die Form der Trümmerwolke lässt sich daraus nicht klar ableiten.

Eine raffinierte Analyse erlaubte es Maeda und seiner Gruppe nun, die Geometrie des Schutts zu erschließen. Dabei half ihnen eine heute seltene Tugend: Geduld. Astronomen verlieren wie Paparazzi meist schnell das Interesse an ausgebrannten Sternen oder Sternchen und nehmen lieber jüngere Erscheinungen ins Visier, die künftigen Glanz verheißen. Das Team um Maeda gewann seine Einsichten dagegen, indem es Supernovae Jahre nach ihrem spektakulären Debut beobachtete, als ihre Helligkeit auf weniger als ein Hundertstel des einstigen Werts gesunken war. Zu diesem Zeitpunkt hatte sich das Material der expandierenden Explosionswolke so verdünnt, dass sie transparent wurde. Indem die Forscher durch die Sternenasche hindurchsahen, gelang es ihnen, die Materie- und Geschwindigkeitsverteilung des gesamten Trümmerhaufens zu ermitteln. Die Supernova konnte ihre Rückseite – ihr zweites Gesicht – nicht länger verbergen.

Als Maeda und seine Kollegen neue und alte Daten dieser Art für eine große Zahl von Sternexplosionen – jede mutmaßlich aus einem zufälligen Blickwinkel betrachtet – zusammentrugen, ergab sich ein einheitliches Bild. Ungewöhnlich schnell expandierende Trümmerwolken sterbender Sterne bewegten sich auf die Erde zu, langsame von ihr weg. Offensichtlich handelt es sich nicht um einen Unterschied im Supernova-Typ, sondern

in der Perspektive. Die spektroskopisch festgestellte Asymmetrie ist im Großen und Ganzen vereinbar mit dem, was man bei azentrischen Explosionen erwarten würde, und könnte dazu dienen, zwischen verschiedenen theoretischen Modellen zu unterscheiden.

Eine solche Geometrie kann allerdings nicht die gesamte Vielfalt von Typ-Ia-Supernovae erklären. Die Eigenheiten einiger Vertreter passen nicht ohne Weiteres ins Bild und erfordern möglicherweise einen abweichenden Explosionsmechanismus oder eine andere Art von Vorläuferstern. Doch für die gängigen Typ-Ia-Supernovae legen sowohl Beobachtungen als auch theoretische Modelle nun nahe, dass ihre Variation auf einer asymmetrischen Explosion beruht. Weil ihre Aus-

richtung relativ zur Erde zufällig ist, sollten die resultierenden Schwankungen in der Helligkeit statistischer und nicht systematischer Art sein.

Für Kosmologen sind das gute Nachrichten. Bei Beobachtung einer großen Zahl von Supernovae mittelt sich der Effekt des unterschiedlichen Blickwinkels heraus. Dass die Standardkerzen zwei Gesichter haben, disqualifiziert sie nicht als Meilensteine zur Vermessung des Alls.

Daniel Kasen ist promovierter Physiker und forscht an der Abteilung für Astronomie und Astrophysik der University of California in Santa Cruz über Supernovae.

© Nature Publishing Group
Nature, Bd. 466, S. 37

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

Beeinflusst das Knochenmark unser Verhalten?

Ein Forscherteam um den Nobelpreisträger Mario Capecchi hat Hinweise auf eine überraschende Ursache-Wirkungs-Beziehung zwischen zwanghaftem Verhalten und einem Defekt im Immunsystem gefunden.

Von Nicole Wedemeyer

Dass Mäuse sich ausgiebig und gründlich putzen, liegt in ihrer Natur. Nicht natürlich ist es allerdings, wenn sie das so oft und so zwanghaft tun, dass sie sich dabei die Haare ausreißen und schwere Hautverletzungen zufügen. Ein ähnliches Verhalten lässt sich bei Menschen mit so genannter Trichotillomanie beobachten. Ein bis zwei von 100 Personen leiden an dieser komplexen Zwangsstörung. Eines der auffälligsten Symptome: Der Erkrankte reißt sich unkontrolliert die Haare aus.

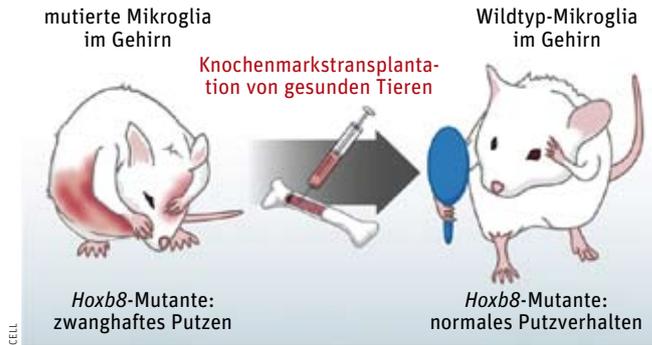
Viele körperliche Leiden beruhen nachweislich auf einem genetischen Defekt. Bei Verhaltensstörungen ist die Ursachenforschung schwieriger. Trotzdem ließ sich auch hier in einigen Fällen – etwa bei der Chorea Huntington, früher als Veitstanz bekannt – ein genetischer Hintergrund nachweisen. In vielen anderen Fällen dürften ebenfalls Genmutationen für die psychischen Auffällig-

keiten verantwortlich sein. Mario Capecchi vom Howard Hughes Medical Institute der University of Utah School of Medicine in Salt Lake City forscht deshalb auch beim Putzzwang der Mäuse in diese Richtung.

Der Wissenschaftler beschäftigt sich seit vielen Jahren mit der Genetik der kleinen Nager. Insbesondere entwickelte er ein Verfahren zur Erzeugung so genannter Knockout-Mäuse, bei denen gezielt einzelne Gene ausgeschaltet wurden. Aus Anomalien oder Defiziten dieser Tiere lassen sich dann Rückschlüsse auf die Rolle der betreffenden Erbfaktoren ziehen. Gemeinsam mit Martin Evans und Oliver Smithies erhielt Capecchi für diesen methodischen Durchbruch 2007 den Nobelpreis für Medizin.

Bei Mäusen, die zu einem exzessiven Putzverhalten neigen, wodurch ihnen die Haare an der Brust, am Bauch und an den Seiten ausfallen, haben der Laureat und Kollegen schon vor einiger Zeit einen speziellen Defekt des Gens *Hoxb8*

CELL, VOL. 144, NO. 5, P. 779, FIG. 3A (LINKS) - 3C (RECHTS), MIT GEN. VON ELSBERRY / CCC



Mäuse mit einem mutierten *Hoxb8*-Gen putzen sich zwanghaft so stark, dass ihnen an Brust, Bauch und Seiten die Haare ausfallen (links). Nach Übertragung des Knochenmarks von normalen Tieren verlor sich die Verhaltensstörung, und das Fell wuchs nach (rechts).

entdeckt. *Hox*-Gene organisieren die Umsetzung des Bauplans eines Lebewesens während der Embryonalentwicklung. Wenn sie mutieren, kann das somit verheerende Störungen etwa bei der Segmentierung des Körpers oder der Anlage von Organen nach sich ziehen.

Warum das Gen *Hoxb8* ausgerechnet mit dem Putzzwang in Verbindung stehen sollte, war allerdings rätselhaft. Normalerweise würde man annehmen, dass es Nervenzellen im Gehirn sind, die das

Verhalten steuern, und der Fehler also bei ihnen zu finden sein müsste. *Hoxb8* steuert jedoch die Entwicklung von Vorläuferzellen, die zwar ins Gehirn wandern, dort aber zu Mikrogliazellen werden, die eigentlich für die Immunabwehr und nicht für neuronale Aktivitäten zuständig sind.

Generell besteht nur ein kleiner Teil des Nervengewebes aus Neuronen. Den überwiegenden Rest bilden unterschiedliche Zelltypen mit anderer Struktur und

Funktion. Mikrogliazellen gehören dazu. Im Gehirn gibt es zwei Arten von ihnen. Die einen bilden sich dort schon während der Embryonalentwicklung, noch bevor der Blutkreislauf überhaupt angelegt wird. Die anderen entstehen im Knochenmark und wandern nach der Geburt aktiv in das Gehirn. In einer aktuellen Untersuchung konnten Capecchi und sein Kollege Shau-Kwaun Chen zeigen, dass das *Hoxb8*-Protein ausschließlich in eingewanderten Mikrogliazellen vorkommt.

Das brachte die beiden Forscher auf die Idee, verhaltensauffälligen Mäusen das Knochenmark von gesunden Artgenossen mit nicht mutiertem *Hoxb8*-Gen

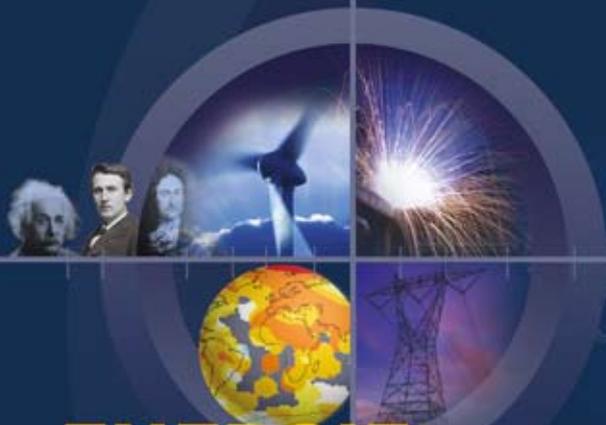
Anzeige

10. MÜNCHNER WISSENSCHAFTSTAGE 2010

23.-26. Oktober

Wissen für alle

alle Veranstaltungen kostenlos!



ENERGIE

Grundlage des Lebens Motor für die Zukunft

an der Ludwig-Maximilians-Universität München und an über 30 weiteren Orten im Großraum München

Marktstände und Vorträge, Führungen und Workshops
spezielles Programm für Schüler und Kinder

Im Mittelpunkt der 10. Münchner Wissenschaftstage steht das Phänomen Energie. Ohne sie gäbe es kein Leben und keine Zukunft. Spitzenforscher werden dieses Phänomen allgemein verständlich darstellen und erläutern. Spannende Vorträge und interaktive Marktstände der Wissenschaft in der Ludwig-Maximilians-Universität München geben Einblick in die grundlegenden Fragen zur sicheren, kostengünstigen und umweltschonenden Energieversorgung. Wie sieht die Energie der Zukunft aus? Mit dieser Frage befassen sich Führungen, Vorträge, Schüler-Workshops und ein Kinderprogramm, auch in vielen weiteren Einrichtungen im Großraum München.

Die sichere Energieversorgung zählt zu den größten Herausforderungen des 21. Jahrhunderts. Der Vorrat an fossilen Ressourcen schwindet. Gleichzeitig wird deren Förderung immer riskanter. Welche Folgen für Umwelt und Klima hat die herkömmliche Energieversorgung? Eine der wichtigsten Aufgaben wird es sein, die CO₂-Emissionen zu reduzieren - durch Erzeugung „sauberer Kohlekraft“, unterirdische Speicherung von CO₂ und die verstärkte Energiegewinnung durch erneuerbare Energiequellen wie Sonne, Wind, Wasserkraft und Bioenergie. Wodurch kann jeder Einzelne täglich zur Verringerung des Energieverbrauchs beitragen? Diese und viele weitere Fragen stehen im Fokus der 10. Münchner Wissenschaftstage.



Landeshauptstadt München

BASF

e-on

Spektrum
muenchen.de

www.muenchner-wissenschaftstage.de

zu transplantieren. Tatsächlich begann sich daraufhin das Putzverhalten der Tiere zu normalisieren. Wundheilung und Haarwachstum setzten wieder ein, und teils erholten sich die Mäuse sogar vollständig (*Cell*, Bd. 141, S. 775).

Das Experiment funktionierte auch andersherum: Als Capecchi und seine Kollegen normalen Mäusen das Knochenmark von zwei *Hoxb8*-Mutanten transplantierten, entwickelten die zuvor verhaltensunauffälligen Tiere die Zwangsstörung. »Damit haben wir zum ersten Mal eine direkte Ursache-Wirkungs-Beziehung zwischen einem Defekt im Immunsystem und einer mentalen Störung zeigen können«, staunt Capecchi über das verblüffende Ergebnis.

Lange Zeit galten Mikrogliazellen als bloße Hilfsarbeiter im Nervensystem: Sie sollen die Neurone schützen und im Fall einer Störung – etwa bei einer Infektion oder einem Schlaganfall – die Eindringlinge verschlingen oder abgestorbenes Gewebe entsorgen, ähnlich wie die Fresszellen im Blut. »Auf die Frage, was Mikrogliazellen eigentlich machen, bekommen Sie von vielen Neurowissenschaftlern sicher die Antwort: »Aufräumen!«, meint Capecchi.

Auch in der Vergangenheit gab es allerdings bereits Hinweise, dass die vermeintlichen Hilfsarbeiter in Wahrheit mehr können. So gab es Berichte, wonach die sich amöbenartig fortbewegenden Zellen im Gehirn regelrecht patrouillieren und an aktiven Synapsen, an denen Signale zwischen zwei Nervenzellen übertragen werden, Halt machen – fast so, als würden sie deren Aktivität überwachen. Capecchi fragte sich, warum man etwas überwachen sollte, wenn man nicht auch in das Geschehen eingreifen kann. Falls Mikrogliazellen neuronale Aktivitäten nicht nur beobachten, sondern eventuell auch modulieren, erscheint der Einfluss einer *Hoxb8*-Mutation auf das Putzverhalten der Mäuse nicht mehr völlig rätselhaft. Dann wäre denkbar, dass ein Defekt die Mikrogliazellen daran hindert, ihre Überwachungsfunktion angemessen wahrzunehmen und notfalls korrigierend einzugreifen. Warum sich das ausgerechnet in einem zwanghaften Verhalten manifestiert, bleibt aber immer noch unklar.

Immerhin haben auch andere Untersuchungen schon eine Verbindung zwischen Auffälligkeiten im Immunsystem und neuropsychischen Störungen nahe-

gelegt. So gibt es Hinweise, wonach bei Menschen mit Depressionen das Immunsystem geschwächt ist. Außerdem legen Genomanalysen nahe, dass Gene, die etwa bei Schizophrenie, manisch-depressiven Störungen oder Autismus gehäuft mutiert sind, auch in der Immunabwehr eine Rolle spielen.

Wenn bei Mäusen ein Defekt in bestimmten Mikrogliazellen exzessives Putzverhalten auslöst und eine Knochenmarkstransplantation von gesunden Spendern das Fehlverhalten beseitigt, erhebt sich natürlich sofort die Frage, ob sich diese Befunde auf die Trichotillomanie oder andere Zwangsstörungen beim Menschen übertragen lassen. Wenn ja, könnten sie die Therapie solcher Erkrankungen revolutionieren. Capecchi sieht aber noch zu viele ungeklärte Fragen.

BIOINFORMATIK

Proteinfaltung als Computerspiel

Mehr als 50 000 Teilnehmer eines Onlinespiels hatten nicht nur ihren Spaß, sondern leisteten zugleich nützliche Forschungsarbeit. Mit ihrer menschlichen Intuition übertrafen sie Computerprogramme bei einer notorisch schwierigen Aufgabe: der Vorhersage der Proteinfaltung.

Von Michael Groß

Die Abfolge der Aminosäurebausteine bestimmt im Prinzip die dreidimensionale, vielfach gewundene Anordnung, zu der sich ein kettenförmiges Proteinmolekül in Sekundenbruchteilen verknäult – oder »faltet«, wie Biologen sagen. Es gibt inzwischen Computerprogramme, die diesen Vorgang durch Optimierung der Energie des Gesamtsystems (Molekül plus Wasser als Lösungsmittel) simulieren und bisweilen auch die richtige Struktur herausbekommen. Erfolgreich sind solche Programme allerdings nur bei den kleinsten der vielen bekannten, sich unabhängig faltenden Untereinheiten von Proteinen, in der Fachsprache als Domänen bezeichnet. Viele biologisch oder medizinisch interessante Problemfälle, auch und gerade solche, bei denen sich die Struktur des ge-

Außerdem steht er Knochenmarkstransplantationen als möglicher Behandlungsmethode für psychische Störungen grundsätzlich skeptisch gegenüber. Er hält sie, weil sie das Risiko schwerwiegender Komplikationen bergen, nur in Ausnahmefällen als letzte lebensrettende Maßnahme für gerechtfertigt. Doch auch er weiß: Man soll niemals nie sagen.

In jedem Fall aber lohnt es sich seiner Ansicht nach, der schon lange diskutierten Frage nach dem Zusammenhang zwischen Immun- und Nervensystem intensiver nachzugehen. Die putsüchtigen Mäuse aus Utah mit dem mutierten *Hoxb8*-Gen könnten da noch für manche interessante Erkenntnis gut sein.

Nicole Wedemeyer ist studierte Biologin und freie Wissenschaftsjournalistin in Halle.

falteten Moleküls nicht experimentell – etwa mittels Röntgenbeugung – ermitteln lässt, sind damit bisher nicht lösbar.

David Baker von der University of Washington in Seattle ist deshalb auf eine ungewöhnliche, zunächst paradox anmutende Idee verfallen. Der Forscher, der auch eines der erfolgreichsten Faltungsprogramme namens Rosetta entwickelt hat, begann vor einigen Jahren damit, statt Computeralgorithmen das riesige Reservoir menschlicher Internetnutzer für die Energieoptimierung einzusetzen. Damit diese auch Lust bekommen, ohne Bezahlung stundenlang an einem elektronischen Molekülmodell herumzudrehen, hat Baker gemeinsam mit Zoran Popović von derselben Universität die Aufgabe in ein Computerspiel gekleidet.

Foldit genannt, erfordert es keinerlei biochemische Vorkenntnisse. Wie üblich, erreicht der Spieler mit zuneh-



Dieser Screenshot von Foldit zeigt die Benutzeroberfläche des Programms mit der Werkzeugleiste am unteren Rand. Das Strukturbild des Proteins enthält Hinweise auf die Güte des vom Spieler erzeugten Faltungsmusters, von dem die erreichte Punktzahl abhängt. Zum Beispiel markieren rote stachelige Bälle Stellen, an denen sich Molekülteile zu nahe kommen.

memendem Erfolg immer höhere Schwierigkeitsstufen. Die beiden untersten Niveaus dienen dem Erlernen der nötigen Fertigkeiten im Verdrehen und Optimieren von Molekülmodellen. Erst dann geht es darum, echte Probleme zu lösen. Dabei muss ein Spieler nicht im Alleingang knobeln, sondern kann sich auch mit anderen zu einem Team zusammenschließen. Eine Punktwertung belohnt die Mühe. Als Anreiz zur Teilnahme fungieren auch soziale Komponenten wie Chat- und Wiki-Seiten, auf denen die Spieler sich austauschen und einander kennen lernen können.

Mitte 2008 hatten Baker und Popović die erste Version von Foldit fertig gestellt und begannen Freiwillige zu rekrutieren. Anhand der Rückmeldungen der frühen Teilnehmer verbesserten sie das Spiel stetig weiter: Der Erwartungsdruck der Forscher, nützliche Strukturprognosen für echte Proteine zu erhalten, förderte eine fruchtbare Symbiose von Mensch und Computerprogramm.

Zwei Jahre nach dem Start haben bereits über 57 000 Spieler mitgemacht. Und die Forscher ziehen eine positive Bilanz. Tatsächlich können Teilnehmer, welche die höchste Stufe erreichen, die Faltung von Proteinen zutreffender voraussagen als die besten Computerprogramme (*Nature*, Bd. 466, S. 756). Das ließ sich an Strukturen, die zwar ermittelt, aber noch nicht veröffentlicht worden waren, ganz exakt nachweisen. Die

durchschnittliche Abweichung der tatsächlichen dreidimensionalen Gestalt des Proteins von der Vorhersage, in Nanometern gemessen, war bei den Algorithmen in der Regel größer als bei den menschlichen Spielern der höchsten Rangstufe.

Intuition kontra Rechenleistung

Wie schafften es diese, das Computerprogramm zu schlagen? Ein großes Handicap der bisherigen Algorithmen besteht darin, dass sie zwar naheliegende Verbesserungen der Gesamtenergie leicht und schnell finden, aber versagen, wenn sie in einer relativ günstigen, aber dennoch falschen Anordnung feststecken. Einem menschlichen Spieler fällt es in solchen Fällen leichter, radikale Entscheidungen zu treffen – etwa größere Teile der bereits geordneten Proteinkette aufzutrennen und neu zusammenzulegen. Ein Mensch erkennt oft intuitiv auch relativ weit entfernte Lösungen. Dadurch kann er Wege beschreiten, die dem strikt mit energetischen Gewinnen und Verlusten kalkulierenden Programm verwehrt bleiben.

Überdies legt ein Ensemble aus Tausenden von Spielern eine Fülle an Vorgehensweisen und Strategien an den Tag, wie sie ein Computerprogramm unmöglich alle anwenden kann. Zwar sind die meisten Ansätze letztlich nicht erfolgreich, doch die Vielfalt erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass ein Weg dabei ist, der zur Lösung führt.

Wo liegen die Schwächen der menschlichen Spieler? Am schwersten tun sie sich offenbar mit einer völlig entfalteten, ausgestreckten Kette. Wie sich erwies, empfiehlt sich deshalb eine gemischte Vorgehensweise, bei der ein Computerprogramm die erste Phase der Faltung, den »Kollaps« zu einem kompakten, aber noch nicht korrekt strukturierten Zustand, erledigt. Die Foldit-Spieler übernehmen dann die kniffligen Umordnungen, die zur energetisch günstigsten dreidimensionalen Gestalt führen.

Im nächsten Schritt plant Baker, die Vorgehensweise umzukehren: Statt für eine Proteinkette bekannter Zusammensetzung das korrekte Faltungsmuster zu finden, sollen die Spieler eine Aminosäuresequenz entwerfen, die sich zu einer vorgegebenen Struktur verknäueln. Das wäre von großem Nutzen für die Entwicklung neuer Medikamente; denn es würde die Herstellung maßgeschneiderter Wirkstoffe ermöglichen, die sich an eine gewünschte Zielstruktur heften – etwa einen Rezeptor oder die Bindungstasche eines Enzyms – und so eine therapeutisch sinnvolle physiologische Reaktion auslösen. Einige der am höchsten bewerteten Foldit-Cracks haben bereits Gelegenheit, sich – rein spielerisch, versteht sich – dieser neuen Aufgabe zu widmen.

Michael Groß ist kein Spieler, aber ehemaliger Faltungsforscher und freier Wissenschaftsjournalist in Oxford (England).

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

Heiße Parade im Wüstensand

Wie schon länger bekannt ist, stecken Weibchen bei einem attraktiven Paarungspartner mehr Ressourcen in den Nachwuchs. Untersuchungen an künstlich befruchteten Kragentrappen haben nun gezeigt, dass allein der Anblick eines Schönlings den gleichen Effekt hat – eine wichtige Erkenntnis für den Artenschutz.

Von Adeline Loyau und Dirk S. Schmeller

Im gesamten Tierreich investieren die Weibchen auf die eine oder andere Weise in ihre Nachkommen. Damit nehmen sie direkt Einfluss auf die Entwicklung ihrer Jungen und verbessern deren Zukunftsaussichten. Allerdings ist das Ausmaß der mütterlichen Investition in den Nachwuchs nicht immer gleich, sondern scheint von diversen Faktoren abzuhängen. Dazu gehört insbesondere die

Attraktivität des Paarungspartners. Diese wirkt sich bei Vögeln zum Beispiel darauf aus, wie viele Eier ein Weibchen legt und wie viel von dem Wachstumshormon Testosteron es darin konzentriert. Das zeigte schon 2007 eine Untersuchung am Blauen Pfau (*Pavo cristatus*), die eine von uns (Adeline Loyau) geleitet hat.

Die Mechanismen, die diesem Verhalten zu Grunde liegen – etwa die Frage, wie das Attraktivitätssignal registriert und verarbeitet wird –, sind allerdings noch kaum erforscht. Dabei hat ihr Verständnis große Bedeutung für die Zucht von bedrohten Tierarten und deren Auswilderung, da sich nur so Jungtiere in ausreichender Zahl und mit guter Überlebenschance produzieren lassen.

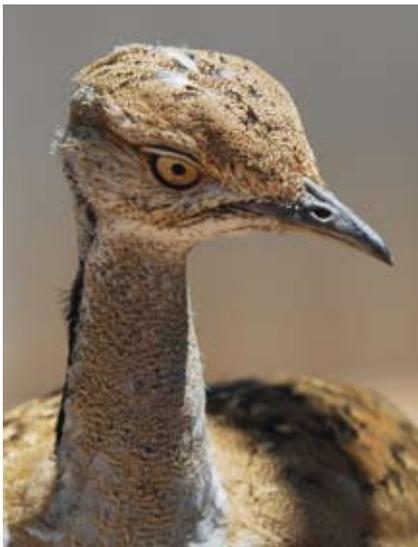
Ein eindrucksvolles Beispiel dafür liefert der Kakapo, ein Papagei aus Neuseeland. Er droht das gleiche Schicksal zu erleiden wie der tragisch berühmte Dodo, der schon im 19. Jahrhundert ausstarb. Wie dieser ist er ein am Boden

brütender, flugunfähiger Vogel, den vom Menschen eingeschleppte Raubtiere wie Katzen, Ratten, Hunde und das Hermelin schon fast ausgerottet haben.

Im letzten Moment wurde ein Zuchtprogramm ins Leben gerufen. Doch anfangs hatte es trotz hohen Aufwands wenig Erfolg. Fast zu spät entdeckten die beteiligten Forscher, dass die Nahrungsmenge entscheidend für den Bruterfolg und ein ausgeglichenes Geschlechterverhältnis beim Nachwuchs ist. Erst eine 2006 publizierte Untersuchung zeigte die Bedeutung dieses Faktors. Demnach produzieren die Weibchen bei zu wenig Nahrung kaum Eier, bei zu viel dagegen fast nur männliche Nachkommen.

Auch eine aktuelle Untersuchung an der Kragentrappe (*Chlamydotis undulata undulata*), die wir an einer Zuchtstation im marokkanischen Missour durchgeführt haben, unterstreicht die Bedeutung verhaltensbiologischer Erkenntnisse für den Artenschutz. Die Kragentrappe ist ein in Nordafrika und in Trockengebieten Asiens verbreiteter Wüstenvogel. Sie dient als Beute bei der traditionellen Falkenjagd, die in der arabischen Welt des Nahen Ostens tief verwurzelt ist und eine über 700-jährige Geschichte hat. Dabei werden wild lebende Falken gefangen und gezielt abgerichtet, um die aufmerksame, intelligente und schwierig aufzuspürende Trappe zu erlegen. Diese galt und gilt immer noch als Delikatesse; in manchen arabischen Ländern wird ihr auch eine aphrodisierende Wirkung zugeschrieben.

Seine Beliebtheit wurde dem Vogel fast zum Verhängnis. Mit dem Beginn des Ölreichtums in den 1960er Jahren änderte sich die Falkenjagd nach vielen Jahrhunderten erstmals grundlegend. An die Stelle der Kamele traten sehr viel schnellere Geländewagen. Zudem halfen Mobiltelefone und Funkgeräte den Suchtrupps, sich untereinander zu verständigen und einen Fund zu melden. Das steigerte den Jagderfolg und führte zu einem dramatischen Rückgang der Kragentrap-



ADELINE LOYAU

Interessiert betrachtet ein Kragentrappen-Weibchen (links) ein balzendes Männchen (unten). Allein der Anblick eines attraktiven Freiers bringt Damen dieser Vogelart dazu, mehr in ihren Nachwuchs zu investieren.



MIT FRIEDL. GEN. VON THORSTEN PRAHL

pe. Heute ist sie auf der internationalen Roten Liste als gefährdet eingestuft.

Um ihr Aussterben zu verhindern, wurden mehrere Nachzuchtstationen eingerichtet und Auswilderungsprogramme entwickelt. Eines dieser Zentren ist das Emirates Center for Wildlife Propagation (ECWP), das der damalige Emir Abu Dhabis, Scheich Zayid bin Sultan Al Nahyan, im Jahr 1995 gegründet hat.

Nachdem sich die Attraktivität des Paarungspartners beim Pfau als wichtiger Faktor für die Investition des Weibchens in den Nachwuchs herausgestellt hatte, führten wir dort im Rahmen eines Forschungsprogramms zur Verbesserung des Zuchterfolgs ähnliche Untersuchungen an der Kragentrappe durch. Allerdings wollten wir in diesem Fall den visuellen Reiz vom direkten physischen Kontakt abkoppeln, um den Einfluss von beiden Faktoren gesondert feststellen zu können. Durch künstliche Befruchtung und die Technisierung der Brut war das erstmals möglich.

Bei dem Experiment boten wir je 30 brütenden Weibchen den Anblick von

attraktiven oder unattraktiven Männchen oder von anderen Weibchen. Als Attraktivitätsmerkmal zogen wir die Häufigkeit und Länge der Parade heran, welche die Männchen als Balzritual vorführen und in der sich ihre jeweilige Fitness gut widerspiegelt.

Das Ergebnis war eindeutig: Weibchen, die der Werbung eines attraktiven Männchens zusehen durften, legten mehr Eier, gaben diesen größere Mengen des wachstumsfördernden Hormons Testosteron mit und waren generell weniger gestresst als ihre Geschlechtsgenossen in den anderen Versuchsgruppen. Ihre Nachkommen gediehen ähnlich gut wie die Küken von wild lebenden Weibchen. Mit diesem Experiment konnten wir erstmals zeigen, dass sich die mütterliche Investition in den Nachwuchs durch rein visuelle Reize stimulieren lässt, was den Zuchterfolg erheblich verbessert.

Diese Erkenntnis ist in mehrfacher Hinsicht von großer Bedeutung für den Artenschutz. In Gefangenschaft stehen Tiere oft unter erheblichem Stress, weil

ihre Bewegungsfreiheit eingeschränkt ist und Möglichkeiten zum Verstecken fehlen. Als Maß der psychischen Belastung ermittelten wir die Konzentration des Stresshormons Corticosteron. Sie war bei Weibchen, die der Parade eines attraktiven Männchens zusehen durften, deutlich geringer als bei Artgenossinnen, die keinen solchen Anblick genießen durften.

Das ist vielleicht auch für Zoos interessant. Vielleicht sind dort Weibchen, die in Sichtweite zu attraktiven Männchen gehalten werden, gleichfalls weniger gestresst und können damit mehr Energie in Aktivitäten wie Nahrungssuche, Fortpflanzung und Pflege stecken.

Unsere Ergebnisse zeigen überdies einen eleganten Weg, die Quantität und Qualität des Nachwuchses zu steigern. Bei Nachzuchtprogrammen ist es enorm wichtig, Paarungen zwischen nahe verwandten Tieren zu vermeiden, damit keine Inzucht mit ihren negativen Folgen auftritt. Selbst wenn der Bruder ein sehr attraktives Männchen sein sollte, kommt er als Sexualpartner nicht in Fra-

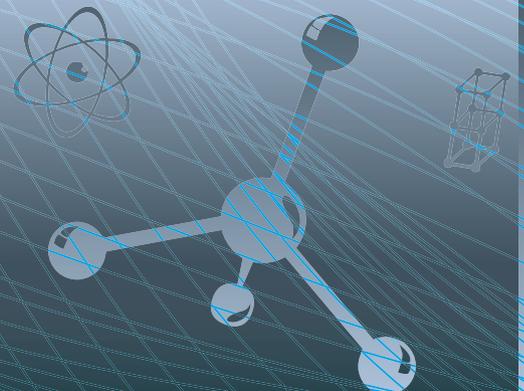
Anzeige

www.spektrum.de/aboplus

Der Premiumbereich – exklusiv für Abonnenten von Spektrum der Wissenschaft

Treue **Spektrum der Wissenschaft**-Leser profitieren nicht nur von besonders günstigen Abo-Konditionen, exklusiv auf sie warten unter www.spektrum.de/aboplus auch eine ganze Reihe weiterer hochwertiger Inhalte und Angebote:

- alle **Spektrum der Wissenschaft**-Artikel seit 1993 im Volltext
- Bonusartikel aus den Magazinen des Verlags – und das Archiv mit allen Bonusartikeln
- ausgewählte Ausgaben anderer Zeitschriftentitel aus dem Programm der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH als kostenlose Downloads
- ein Mitgliedsausweis, dessen Inhaber in zahlreichen Museen und wissenschaftlichen Einrichtungen Vergünstigungen erhält
- das **spektrumdirekt**-Premiumabo sowie das »Produkt des Monats« – jeweils zum exklusiven Vorteilspreis
- unter allen Abonnenten verlosen wir jeden Monat 4 Gutscheine im Wert von € 25,- für den Science-Shop.de





DIRK SCHMELLER

Eine der Autoren (Adeline Loyau) entnimmt Proben aus Eiern von Kragentrappen, um sie auf den Gehalt des Wachstumshormons Testosteron zu untersuchen.

ge. Nach unseren Ergebnissen kann er aber trotzdem allein durch seine optische Präsenz die Investition seiner Schwester in deren Nachwuchs fördern.

Da rein visuelle Reize als Stimulanz ausreichen, lassen sich also genetische Erfordernisse und Maßnahmen zur Steigerung des Bruterfolgs strikt trennen. In der Praxis heißt das, dass es unter Umständen genügt, einfach die Käfige mit Männchen und Weibchen anders anzuordnen, um eine größere Zahl an überlebensfähigem Nachwuchs zu erhalten, ohne dass das Schema der künstlichen Befruchtung, das auf dem genetischen Stammbaum basiert, verändert werden muss. Kurz gesagt ist es möglich, die Verteilung der weiblichen Ressourcen unabhängig von der Qualität der männlichen Gene zu steuern. Die männliche Balz allein liefert wirksame Signale dafür und bietet Artenschützern damit ein einfaches und preiswertes Mittel, den Zuchterfolg zu erhöhen.

Weltweit gibt es immer mehr Zucht- und Auswilderungsprogramme. Wie die Untersuchungen an der Kragentrappe und dem Kakapo zeigen, sind verhaltensbiologische Erkenntnisse von großer Bedeutung für deren Gelingen. Nur wenn solche Erkenntnisse mit ökologischen und genetischen Erwägungen kombiniert werden, bestehen Aussichten auf einen langfristigen Erfolg im Artenschutz.

Adeline Loyau führte diese Untersuchung im Rahmen eines Forschungsprogramms des Emirates Center for Wildlife Propagation durch und analysierte die Proben in den Laboratorien des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung in Leipzig. Sie und **Dirk S. Schmeller** forschen derzeit an der Station für Experimentelle Ökologie des CNRS in Moulis (Ariège, Frankreich).

Springers Einwürfe

Vier Augen sehen mehr als zwei ...

... aber nur, wenn sie etwas taugen.

So ein Schiedsrichter hat es nicht leicht. 90 Minuten lang muss er zwischen 22 hochtrainierten Fußballprofis, alle ein gutes Stück jünger als er, über den Rasen hetzen. Er soll dabei sie und den Ball im Auge behalten und immer wieder ganz außer Puste in die Trillerpfeife blasen. Währenddessen lauert eine brodelnde Masse von Fußballfans in den Stadionrängen darauf, dass er eine Fehlentscheidung trifft; dann braucht er nach dem Abpfiff Personenschutz.

Zum Glück besitzt er als zusätzliche Sinnesorgane seine Linienrichter, deren Fähnchen sofort in die Höhe schnellen, wenn der Angespülte im Abseits steht oder der Ball über die Linie rollt. Nicht nur hier bewährt sich das so genannte Mehraugenprinzip. Auch in der Medizin holt man in schweren Fällen eine zweite Meinung ein. Und der Abschuss einer Atomrakete muss zur Sicherheit von zwei Soldaten gleichzeitig ausgelöst werden.

Doch wie gut funktioniert das? Was hilft ein Linienrichter, der schlecht sieht? Was hat eine ärztliche Koryphäe von der Zweitdiagnose eines Kurpfuschers? Treffen bei einem nuklearen Fehlalarm wirklich zwei Kommissköpfe unter extremem Zeitdruck mit doppelter Sicherheit die richtige Entscheidung?

Der Psychologe Bahador Bahrami und sein Team am University College London sind dieser Frage nachgegangen. Dazu setzten sie Versuchspersonen paarweise vor einen Schirm, der ihnen kurz unscharfe Bilder darbot, und ließen die Paare gemeinsam entscheiden, was sie eben gesehen hatten. Tatsächlich erkannten die Probanden das Dargebotene zu zweit signifikant besser als jeder für sich allein – sofern sie danach in aller Ruhe über ihre Eindrücke diskutieren durften. Es war für den Kooperationserfolg auch nicht nötig, dass sie ihre Trefferquoten von früheren Durchläufen nachkontrollierten; es genügte schon, dass jede Versuchsperson auf die Urteilsfähigkeit der anderen vertraute (*Nature*, Bd. 329, S. 1081).

Das galt allerdings nur, solange beide Probanden ungefähr gleich gut sehen konnten. Hinterhältig, wie Experimentalpsychologen nun einmal sind, verrauschten sie in einer Versuchsreihe heimlich das Bild des einen Teilnehmers so stark, dass er die Details noch schlechter erkennen konnte als der andere. Prompt minderte seine Kooperation die Trefferquote des Partners: Beide zusammen sahen schlechter als der eine mit dem weniger getrübbten Blick. Biblisch gesprochen: Der Einäugige vertraute dem Blinden; doch allein wäre er besser dran gewesen.

Die Grenze, ab der dieser Effekt eintritt, liegt bei ungefähr 40 Prozent, fand Bahrami heraus: Wenn der visuell Beeinträchtigte nur weniger als halb so gut sieht wie sein Partner, sollte der besser nicht auf ihn hören. Doch offenbar neigt der Mensch dazu, fast blind darauf zu vertrauen, dass sein Nächster ungefähr so kompetent urteilt wie er selbst.

In den meisten Fällen ist dieses Grundvertrauen ganz vernünftig. Es ist ja nicht die Regel, dass einem jemand begegnet, der seine Welt kaum halb so gut wahrnimmt wie man selbst. Schon häufiger kommt es vor, dass man auf jemanden hereinfällt, der – mit bestem Wissen oder in böser Absicht – nur vorgibt, er sehe klar. Darum lohnt es vielleicht, den mahnenden Schlusssatz von Bahramis Artikel wörtlich zu zitieren: »In der Tat kennen wir nur allzu gut die katastrophalen Folgen, die eintreten, wenn man sich bei so unterschiedlichen Problemen wie der Existenz von Massenvernichtungswaffen und der Möglichkeit von risikofreien Investitionen auf Indizien verlässt, deren Zuverlässigkeit unbekannt ist.«



Michael Springer

EIN MOND

mit dem Zeug zum

PLANETEN

Titan, der größte Satellit des Planeten Saturn, verdient es nicht, als schlichter Mond bezeichnet zu werden. Denn als fast zu vertraut empfinden wir Erdbewohner seine Landschaften, über denen sich Regenwolken sammeln und die erst dank Flüssen zu ihrer heutigen Form gelangten.

Von Ralph Lorenz und Christophe Sotin

Wir waren alle ziemlich überrascht, als wir im Kontrollraum die ersten Bilder sahen. Einige von uns glaubten, die Küste Kaliforniens zu erkennen, andere die französische Riviera. Sogar an seinen Garten in Tucson, Arizona, fühlte sich ein Kollege erinnert. Hätten wir nicht gewusst, dass die gerade eingetroffenen Aufnahmen Landschaften des Saturnmonds Titan zeigten, so hätten wir vielleicht geglaubt, auf den Monitoren seien neue Fotos vom Mars oder gar von der Erde zu sehen.

Bis zu diesem Augenblick waren wir ziemlich nervös gewesen. Denn nach ihrer Trennung von der Orbitersonde Cassini war die Landekapsel Huygens drei Wochen lang antriebslos auf ihr Ziel zugetrieben. Das tatenlos mitanzusehen, war uns schwergefallen: Wir hatten einen großen Teil unserer Laufbahn an dieser Mission gearbeitet, wir hatten Systeme und Instrumente dafür entwickelt. Wir hatten uns immer wieder in die Sonde hineinversetzt, um uns vorzustellen, wie sie auf einer fremden und weit gehend unbekanntem Welt funktionieren könnte. Und wir hatten uns die Welt des Titans vorgestellt. Wir dachten, er ähnele Jupitermonden wie dem kraterübersäten Kallisto oder dem zerfurchten Ganymed mit ihren ebenfalls je rund 5000 Kilometer Durchmesser. Doch die Bilder, die am 14. Januar 2005 im European Space Operations Center in Darmstadt eintrafen, verwirrten uns: Niemand hatte erwartet, dass Titans Landschaft jener der Erde so sehr ähneln würde. Während Huygens

an Fallschirmen herabschwebte, schickte er uns Luftbilder ganzer Flusssysteme, die offensichtlich durch Regen genährt wurden. Und das Gebiet, in dem die Landesonde niederging, war feucht, mit »Steinen« übersät und wohl erst kürzlich von einer Sturzflut überschwemmt worden. Es war die unheimliche Vertrautheit, die den Titan so fremdartig machte.

Inzwischen hatten wir Zeit, die Ergebnisse von Huygens zu verdauen, der immerhin mehr als drei Stunden lang auf der Mondoberfläche »überlebte«. Während der ersten 70 Minuten, als er sich noch in Funkreichweite befand, konnte der Orbiter auch Huygens' Messdaten empfangen. Diese lassen sich nun in das größere Bild einordnen, das uns Cassini während seiner inzwischen rund 70 Vorbeiflüge an Titan geliefert hat. Angesichts seiner Größe (Titan ist größer als Merkur), seiner Dynamik (aktiver als Mars) und seiner Atmosphäre (dichter als die der Erde) könnte der Mond genauso gut ein Planet sein. Vielfältige geologische Prozesse gestalten seine Oberfläche, wobei Methan die Rolle spielt, die auf der Erde das Wasser übernimmt. Es verdampft aus Seen, bildet Wolken, fällt als Niederschlag herab, formt Täler und fließt zurück in Seen. Fehlte nicht Sauerstoff in der Atmosphäre (die wie ihr irdisches Pendant vor allem aus Stickstoff besteht) und läge die Temperatur nicht bei minus 180 Grad Celsius – man könnte sich auf dem Mond ein bisschen zu Hause fühlen.

Vor Cassini besaßen wir vom Titan recht schlichte Vorstellungen. Als die Voyager-Sonden 1980 und 1981 am Saturn vorbeiflogen, zeigten sie ihn nur als dunstverhüllte, orange-farbene Billardkugel. Selbst Mitte der 1990er

In Kürze

- ▶ **Vor der Cassini-/Huygens-Mission wussten Wissenschaftler fast nichts** über den »verschommenen Tennisball«, als welcher der Saturnmond Titan den Voyager-Forschern erschienen war. Dabei ist er größer als der Planet Merkur.
- ▶ Mittlerweile hat der Orbiter Titans Dunstschleier durchdrungen und eine dynamische **Landschaft mit Flüssen, Seen, Dünen, Bergen und möglicherweise Vulkanen** entdeckt. Kurz- und langfristige Wetterzyklen bestimmen das Klima: Dabei spielt Methan die Rolle von Wasser.
- ▶ **Titans Verwandtschaft mit der Erde**, wenngleich diese viel wärmer ist, erhellt auch Prozesse wie etwa die Entstehung von Dünen und den irdischen Klimawandel.

ASTRONOMIE & PHYSIK



Vertrauter als von Forschern erwartet wirkte der Mond Titan auf den Bildern der Sonden Cassini und Huygens. Die Computergrafik zeigt, wie wir uns seine Landschaft in einer dunklen, stürmischen Nacht vorstellen können. Smogartiger Dunst verhüllt die Sonne und Saturn, in der Ferne geht Regen nieder.

Jahre lieferten die besten Bilder irdischer Teleskope nur eine grobe Infrarotkarte, auf der sich undeutliche dunkle und helle Flächen ausmachen ließen (siehe SdW 8/2004, S. 48). Über die Oberfläche und die Atmosphäre Titans sprachen die Wissenschaftler damals noch so, als ob eine einzige Messgröße oder eine einzige anschauliche Formulierung eine ganze Welt beschreiben könnte. Doch dann kamen Unmengen neuer Daten herein. Nun reden wir über Sandseen in niedrigen Breiten, die Atmosphäre über dem Nordpol im Sommer oder einen wolkigen Tag in der südlichen Seenregion.

Spekulieren (fast) ohne Daten

In niedrigen Breiten ist die Landschaft charakterisiert durch zerfurchte, helle Berge – wie vor allem in der großen Xanadu-Region – und durch dunkle Sandseen, die man zunächst für flüssigkeitsgefüllte Becken gehalten hatte. Sanddünen, die wie die größten Exemplare auf der Erde 100 Meter hoch sein können, erstrecken sich bisweilen über Hunderte von Kilometern. Der dunkle Sand erinnert an Kaffeesatz, denn er besteht nicht aus Silikatineralien, sondern aus Kohlenwasserstoffen. Nahe den Polen entdeckten wir diese Moleküle auch in flüssiger Form. Hier haben sich in steilen Vertiefungen kleine Seen mit einigen zehn Kilometern Durchmesser gebildet. Der Ontario Lacus mit seinen flachen Stränden wiederum bedeckt rund 15 000 Quadratkilometer Fläche – etwa so viel wie Schleswig-Holstein. Manche Seen wie das Kraken Mare sind gar so groß wie das Kaspische Meer.

Und schließlich finden sich, eingeklemt zwischen tropischen Wüstengebieten und feuchten polaren Regionen, die rätselhaften mittleren Breiten mit ihren stark erodierten Landschaften und Hinweisen auf Fließgewässer.

Bereits nach den Voyager-Vorbeiflügen hatten die Forscher begriffen, dass es auf Titan einen Methankreislauf mit Wolken, Regen und Seen geben könnte. Diese Spekulation basierte vor allem auf einem einzigen Datenpunkt: Die Oberflächentemperatur Titans liegt nahe beim Tripelpunkt von Methan, so wie die der Erde nahe beim Tripelpunkt von Wasser liegt. Bei dieser Temperatur können gasförmige, flüssige und feste Phase eines Stoffes koexistieren.

Bedeutet dies aber tatsächlich, dass Übergänge zwischen den drei Phasen die Temperatur Titans regulieren? In den späten 1990er Jahren lieferten bodengebundene Teleskope das erste gewichtige Indiz: In Höhen, in denen mit der Kondensation von Methan zu rechnen ist, entdeckten sie kurzlebige Wolken. Genauere Studien und schließlich Cassini zeigten die Wolken sogar, wie sie sich gleich irdischen Kumuluswolken nach oben auf-

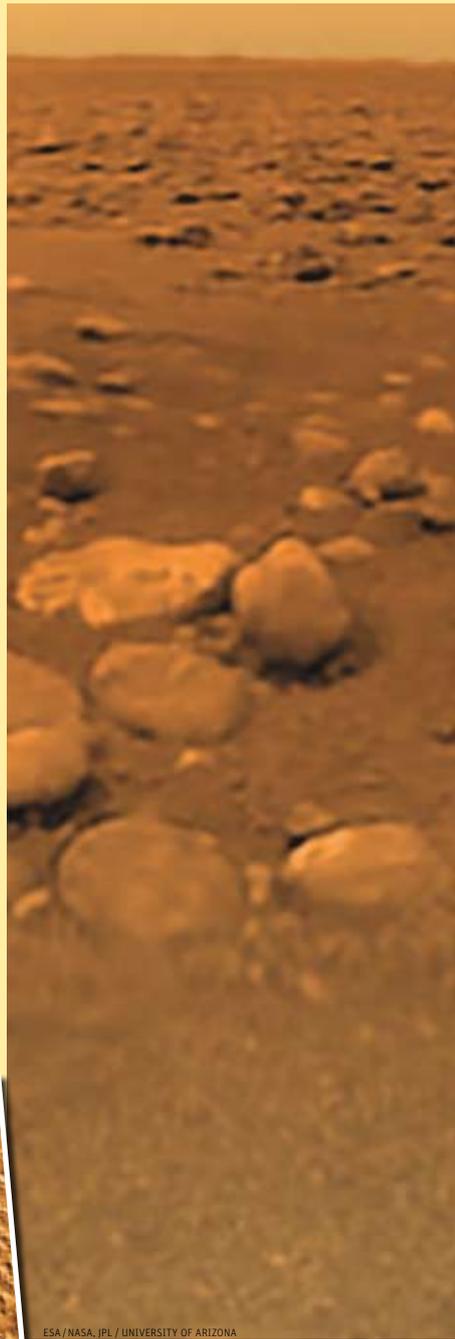
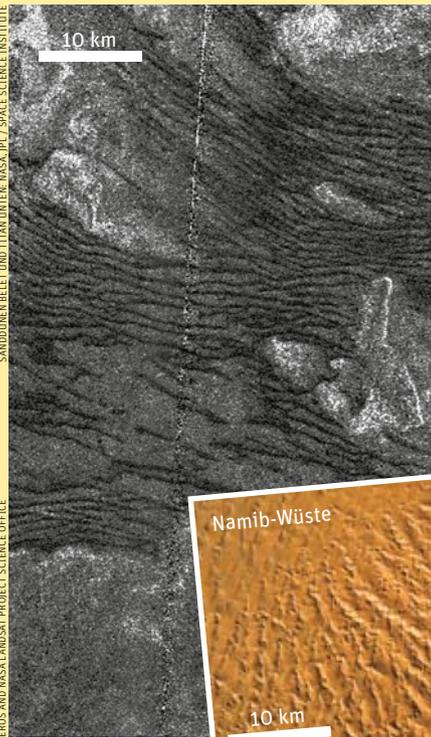
Dank des Orbiters Cassini und der Landesonde Huygens konnten Wissenschaftler erstmals einen genauen Blick auf den Titan und seine Oberfläche werfen, deren vielfältige Strukturen seither die Erforscher des Sonnensystems faszinieren.

Die Bodenaufnahmen von Huygens zeigen eine mit faustgroßen Eisbrocken übersäte Landschaft. Die abgerundeten Formen der Brocken deuten darauf hin, dass eine strömende Flüssigkeit – vermutlich Methan – sie hat erodieren lassen.

Sanddünen in der Region Belet zeigen sich auf diesem Radarbild als dunkle Streifen. Sie sind mehrere zehn bis zu Hunderte von Kilometern lang, verlaufen parallel zur durchschnittlich vorherrschenden Windrichtung und brechen sich an hellen Erhebungen. Der Sand besteht nach Ansicht der Forscher aus Kohlenwasserstoffmolekülen. Die Höhen und Abstände der Dünen sind denen der größten irdischen Dünen etwa in der westafrikanischen Namib-Wüste (kleines Bild) vergleichbar. Grund dafür könnte sein, dass die atmosphärische Grenzschicht, die turbulente unterste Schicht der Lufthülle, auf der Erde wie auf Titan die gleiche Dicke besitzt.

SANDDÜNEN BELET, LUND TITAN UNTEREN NASA, JPL / SPACE SCIENCE INSTITUTE

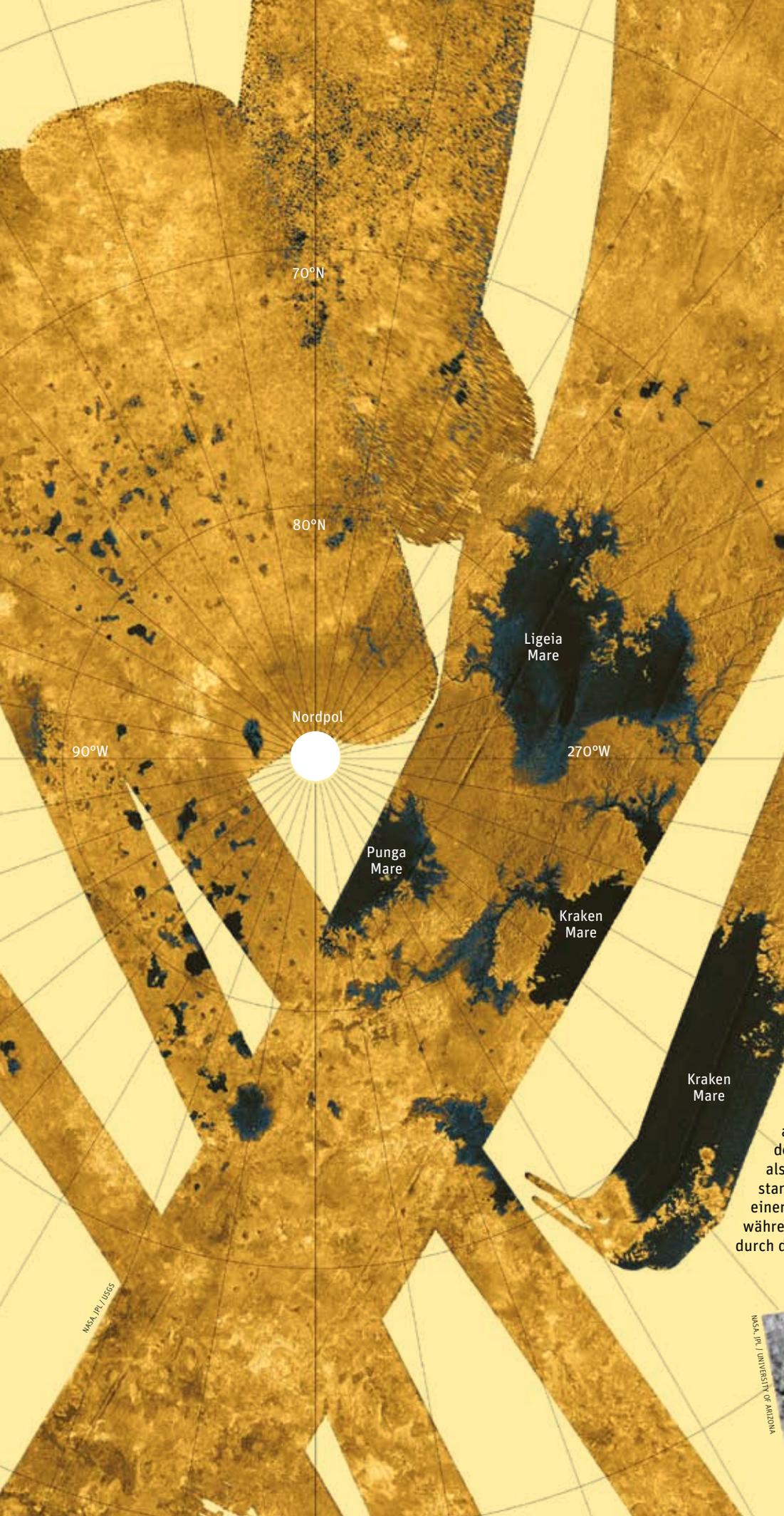
SANDDÜNEN NAMIBIA: USGS NATIONAL CENTER FOR EROSION AND LANDSLIDE PROJECT SCIENCE OFFICE



ESA / NASA, JPL / UNIVERSITY OF ARIZONA

SO KANNEN WIR TITAN VOR CASSINI

Im Jahr 1980 mussten sich die an Voyager 1 beteiligten Forscher entscheiden: Sollte die Sonde dicht an Titan vorbeifliegen – oder sollten sie sich lieber ein späteres Rendezvous mit Pluto zum Ziel setzen? Sie entschieden sich für Titan. Die Belohnung dafür war das Bild eines »verschwommenen Tennisballs ohne scharfen Rand«, so Teammitglied Tobias Owen. Doch die Instrumente untersuchten auch ultraviolette, infrarote und Radiostrahlung. Seither wissen wir, dass sich die Atmosphäre überwiegend aus Stickstoff zusammensetzt und die dortigen Bedingungen die Existenz von Methanwolken, Methanregen und sogar Methanozeanen erlauben. Das Team von Voyager 2 verzichtete auf einen Besuch bei Titan.

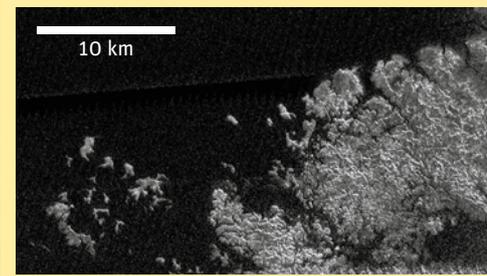


Die im Juli 2009 von Cassini gelieferte Infrarotaufnahme zeigt, wie sich Sonnenlicht im Kraken Mare spiegelt. Der See hatte 15 Jahre lang in der Dunkelheit des Winters gelegen, im August 2009 brach dort der Frühling an.

NASA, JPL / UNIVERSITY OF ARIZONA / DLR

Cassinis Radaraufnahmen (links) zeigen dunkle Gebiete in der nordpolaren Region, bei denen es sich vermutlich um Seen aus Methan und Ethan handelt; darunter auch Ligeia Mare, Punga Mare und Kraken Mare, die drei größten Seen auf dem Saturnmond. Warum erscheinen sie so dunkel? Aus demselben Grund, aus dem eine nasse Straße nachts im Scheinwerferlicht dunkler wirkt als eine trockene: Die glatte Oberfläche reflektiert das Licht der Strahlungsquelle, so dass es nicht mehr ins Auge des Beobachters fällt. Trockenes, unebenes Terrain erscheint auf der Karte heller und goldfarben.

Eine Nahaufnahme des Kraken Mare (unten) zeigt Inseln, Buchten und auch andere für irdische Seen typische Strukturen.



NASA, JPL

Diese Flussrinnen (unten) stammen möglicherweise von flüssigem Methan, das von etwa 200 Meter hohen Hügelketten in einen jetzt ausgetrockneten See geflossen ist. Das Muster der Zuflüsse deutet darauf hin, dass das Methan als Regen niederging. Entstanden ist die Aufnahme in einer Höhe von 6,5 Kilometern während Huygens' Sinkflug durch die Atmosphäre.

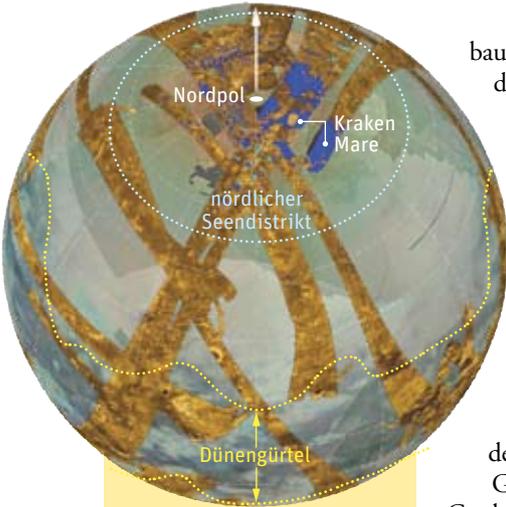


NASA, JPL / UNIVERSITY OF ARIZONA

NASA, JPL / USGS

SONNENSYSTEM

NASA, JPL / CALTECH / UNIVERSITY OF ARIZONA / CASINI IMAGING TEAM



Ergänzt um Daten aus Radar-aufnahmen (oben) setzt sich diese Karte von Titan (unten) aus Einzelaufnahmen im nahen Infrarot zusammen. Offenbar variiert die Oberflächenstruktur des Monds mit der geografischen Breite. Auffällig ist auch der Mangel an Einschlagkratern (orangefarbene Kreise). Zu den markanten Orten zählen Belet (wohl eine Art Sandmeer), die geologisch auffällige Region Xanadu (die etwa so groß wie Australien ist) und das vielleicht kryovulkanisch geprägte Gebiet Hotei Arcus.

bauchten und – wohl weil Tröpfchen aus den Wolken als Regen herabfielen – wieder auflösten. Mancherorts beobachtete Cassini darüber hinaus, dass sich die Oberfläche des Monds nach dem Durchzug von Wolken dunkel verfärbte, auch dies vielleicht ein Hinweis auf Regen. Direkte Beobachtungen von Niederschlägen gelangen der Sonde zwar nicht. Doch Huygens' Luftaufnahmen lassen keine Zweifel daran, dass Regen und schnell strömende Flüssigkeiten zumindest Teile von Titans Oberfläche formten.

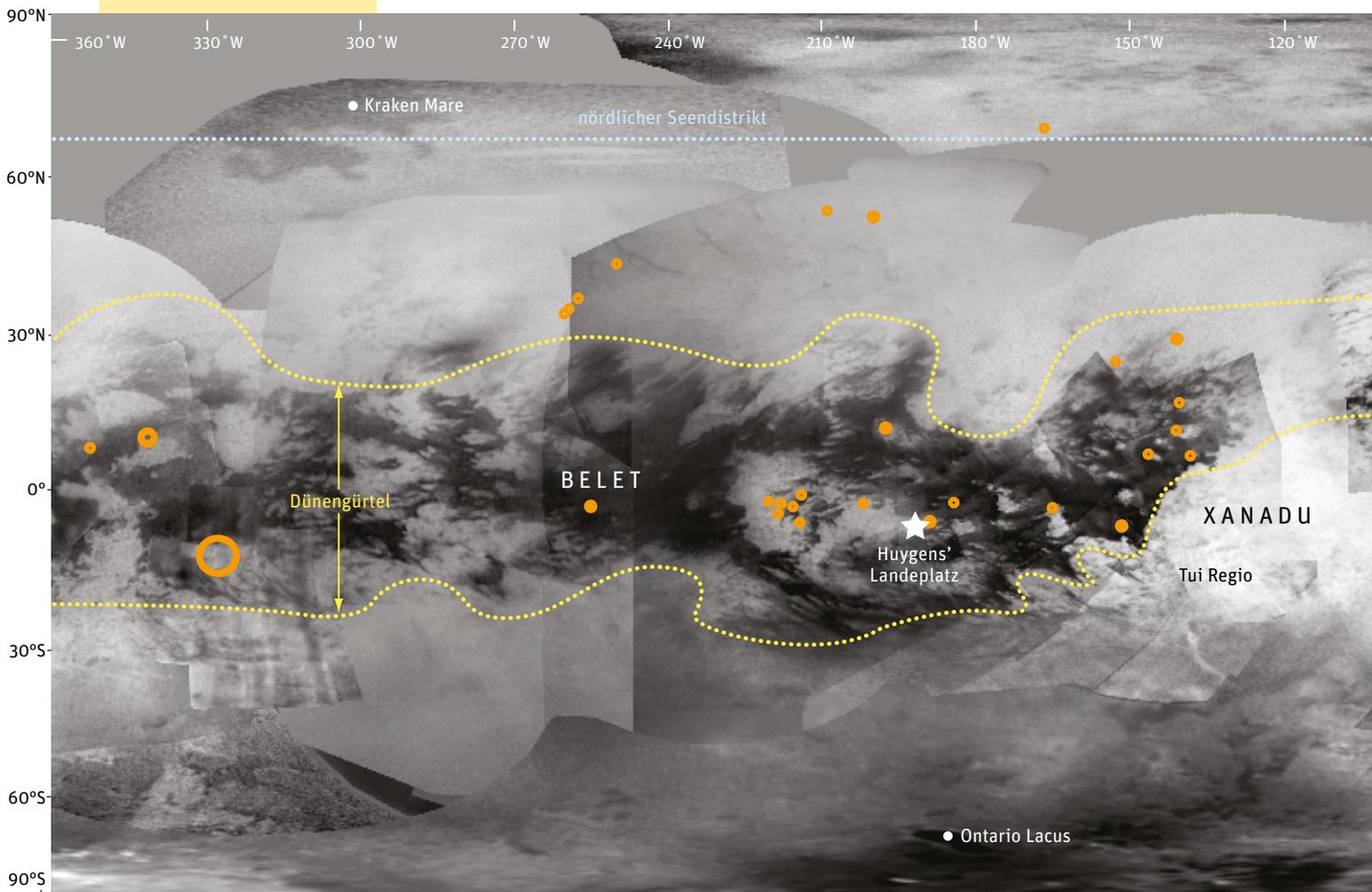
Gelandet ist die Sonde dann etwa zehn Grad südlich des Äquators inmitten eines großen Sandsees, nahe einigen hell leuchtenden Eishügeln. Ihre Bilder zeigen in der Ferne eine Reihe langer Dünen, und die unmittelbare Umgebung des Landplatzes ähnelt einem ausgetrockneten Flussbett – sandiger Untergrund, übersät mit abgerundeten »Steinen« wohl aus gefrorenem Wasser. Wir wissen, dass der Untergrund eher weich ist, »klebrig« wie feuchter Sand oder Lehm. Zu verdanken ist dieser Befund dem Penetrometer, das bei der Landung in den Boden stieß und seine mechanischen Eigenschaften vermaß. Einer von uns (Lorenz) hatte das Gerät noch als Doktorand entworfen und gebaut – zwölf Jahre bevor es schließlich zum Einsatz kam. Auf einen feuchten Unter-

grund weisen auch Temperaturmessungen hin, die zeigen, dass die Wärme der erhitzten Sonde sehr schnell abgeleitet wurde. Weitere Untersuchungen lassen zudem vermuten, dass auf der Blende von Huygens' Kamera Methandampf kondensiert ist. Eines der Bilder zeigt das typische Muster von Licht, das an einem Taupfen reflektiert wird. Der Tropfen fiel wohl durch das Gesichtsfeld der Kamera und erlaubte uns so die erste Nahaufnahme einer Flüssigkeit auf einer extraterrestrischen Welt.

Eine Sturzflut überschwemmte Huygens' Landeplatz

So wie der galoppierende Treibhauseffekt auf der Venus stellt auch der hydrologische Kreislauf auf Titan einen ins Extreme gesteigerten Prozess nach irdischem Muster dar. Auf unserem eigenen Planeten reicht die Sonnenenergie aus, um jährlich eine Wasserschicht von einem Meter Dicke verdampfen zu lassen. Die irdische Atmosphäre kann aber nur das mengenmäßige Äquivalent einer einige Zentimeter dicken Schicht halten, bevor sich Wolken bilden. Das irdische Wetter ist deshalb im Großen und Ganzen durch Regenschauer charakterisiert, bei denen alle ein, zwei Wochen ein paar Zentimeter Wasser niedergehen.

Auf Titan lässt das schwache Sonnenlicht nur etwa einen Zentimeter Flüssigkeit pro Jahr verdampfen, doch die Atmosphäre kann das



Äquivalent von rund zehn Metern halten. So dürfte es typischerweise zu jahrhundertelangen Trockenzeiten kommen, die dann plötzlich durch sintflutartige Regenfälle und anschließende Sturzfluten unterbrochen werden. An Huygens' Landeplatz ist es möglicherweise tatsächlich zu einer solchen Sturzflut gekommen; vielleicht einen Monat vor der Landung, vielleicht auch ein Jahrtausend zuvor. Titans Wetterzyklus ist also eine Extremversion dessen, was uns auch auf der Erde bevorstehen könnte: Erwärmt sich die untere Atmosphärenschicht – die Troposphäre –, kann sie mehr Feuchtigkeit halten; dann gewinnen Regenfälle ebenso wie Trockenzeiten an Intensität.

Doch wir wissen noch mehr über die Atmosphäre des Mondes. In den irdischen Tropen dominiert die so genannte Hadley-Zirkulation: Am Äquator steigt warme Luft auf und strömt in Richtung der Pole, wobei sie durch die Erdrotation Scherkräften ausgesetzt ist. Bei einer Breite von 30 Grad sinkt die dann sehr trockene Luft wieder herab, weshalb sich in diesen Regionen die meisten irdischen Wüsten befinden. Auf Titan kommt es zu einem ähnlichen Zirkulationsmuster, dieses aber erstreckt sich – weil der Mond nur einmal alle 15 Erdtage eine volle Rotation ausführt – von den sommerlichen mittleren Breiten bis zum winterlichen Pol. Die dabei beteiligten Prozesse lassen jedoch die Äquatorregion austrocknen,

weshalb wir dort die ausgedehnten Sandseen beobachten.

Obgleich sie wesentlich kälter ist, besitzt die Atmosphäre Titans ein ähnliches Temperaturprofil wie die der Erde: Die Troposphäre wird durch einen Treibhauseffekt erwärmt, und die Temperatur sinkt mit zunehmender Höhe. Darüber liegt die Stratosphäre, erwärmt durch die dort absorbierte Sonnenstrahlung. Bei aller vertrauten Physik sind aber auch in diesem Fall die beteiligten Substanzen ungewöhnlich. In der irdischen Stratosphäre ist das Molekül Ozon für die Absorption der Strahlung verantwortlich, doch woraus besteht der undurchsichtige Dunst, der Titan einhüllt? Bei seinen Vorbeifügen entnahm Cassini Proben der oberen Atmosphäre in einer Höhe von etwa 1000 Kilometern. Vor Missionsbeginn hatten wir dort einen vergleichsweise leichten Kohlenwasserstoff wie Ethan mit einer (relativen) Molekülmasse von 30 erwartet, fanden nun aber schwere organische Moleküle, darunter Benzen und Anthrazen sowie Makromoleküle mit einer Molekülmasse von über 2000, in überraschender Häufigkeit. Sie entstehen durch Wechselwirkung des Sonnenlichts mit dem atmosphärischen Methan. Vermutlich verklumpen die Moleküle zu immer größeren Körnern, sinken zur Oberfläche und lassen dort die großen Sandgebiete entstehen.

Neben dem von der Sonne aufrechterhaltenen Wasserkreislauf lässt sich auf der Erde ein weiterer Wasserzyklus beobachten, bei dem zwischen ihrer Oberfläche und dem Erdinneren Wasser ausgetauscht wird. Angetrieben von der Plattentektonik erstreckt er sich allerdings über sehr lange Perioden: Vulkanische Hotspot-Regionen und mittelozeanische Rücken setzen über Hunderte von Millionen Jahren Wasser frei, während in Zonen, wo Lithosphärenplatten zusammenstoßen und absinken, Wasser in das Erdinnere zurückgelangt. Ohne diesen Kreislauf würde sich das Wasser allmählich in der Atmosphäre ansammeln und schließlich ins All entweichen.

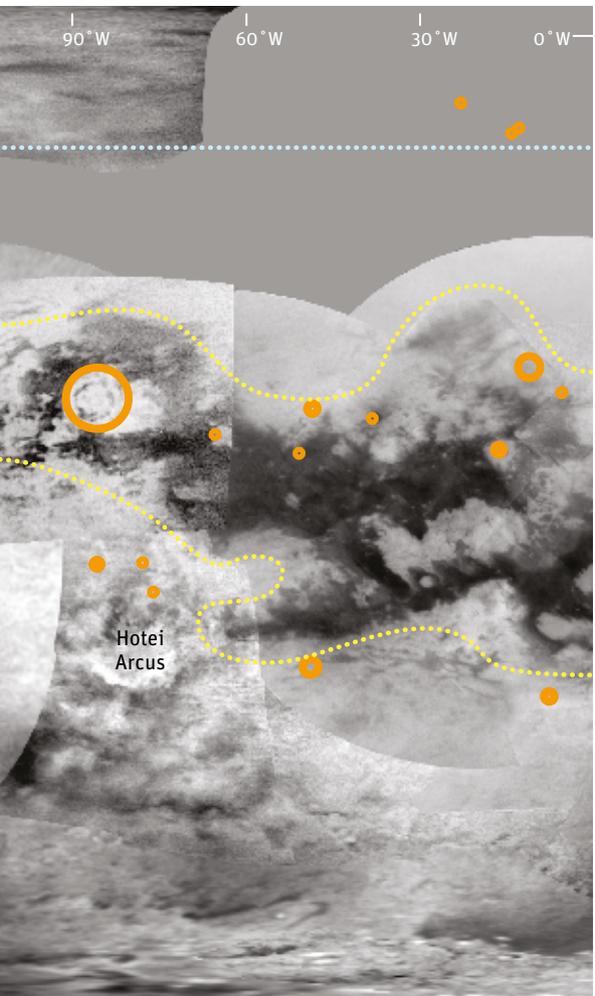
Geschieht Ähnliches auf Titan? Zumindest eine grobe Analogie lässt sich beobachten. Die sonnengetriebenen fotochemischen Reaktionen in der Hochatmosphäre produzieren so viele schwere organische Stoffe, dass sie das gesamte Methan in der Atmosphäre und auf der Oberfläche von Titan binnen weniger Millionen Jahre verbrauchen würden – es sei denn, es wird von irgendwoher nachgeliefert. Titan muss also verborgene, unterirdische Methanreservoirs besitzen, aus denen Gas in die Atmo-



KEVIN HAND

ZÄHFLÜSSIG IM INNEREN

Die Dichte von Titan deutet darauf hin, dass der Mond zur einen Hälfte aus einem Gesteinskern und zur anderen Hälfte vor allem aus Wasser sowie einer dünnen Schicht aus Kohlenwasserstoffen besteht. Modelle legen nahe, dass die obere 50 Kilometer dicke Eisschicht warm und verformbar genug ist, um eine langsame Konvektion zu ermöglichen. Darunter könnte sich ein Ozean aus flüssigem Wasser, gemischt mit Ammoniak, von einigen hundert Kilometern Dicke befinden, der möglicherweise sogar Leben beherbergt.



NASA JPL / SPACE SCIENCE INSTITUTE

Literaturhinweise

Brown, R. H. et al. (Hg.): Titan from Cassini-Huygens. Springer, 2009.

Davies, A. G., Sotin, C. et al.: Atmospheric Control of the Cooling Rate of Impact Melts and Cryolavas on Titan's Surface. In: Icarus 208(29), S. 887 – 895, August 2010.

Lorenz, R., Mitton, J.: Titan Unveiled: Saturn's Mysterious Moon Explored. Princeton University Press, 2008.

Lunine, J. I., Lorenz, R. D.: Rivers, Lakes, Dunes, and Rain: Crustal Processes in Titan's Methane Cycle. In: Annual Review of Earth and Planetary Sciences 37, S. 299 – 320, Mai 2009.

Tobie, G. et al.: Episodic Outgassing as the Origin of Atmospheric Methane on Titan. In: Nature 440, S. 61 – 64, 2. März 2006.

sphäre gelangt (siehe SdW 7/2007, S. 32). Cassini entdeckte zwar weder vulkanische Hotspots noch Anzeichen für Plattentektonik. Doch in zumindest zwei Regionen stieß der Orbiter auf Formationen, die große Ähnlichkeit mit gefrorenen vulkanischen Strömen besitzen. Im infraroten Licht leuchten Hotei Arcus und Tui Regio heller als alle anderen Gebiete auf Titan, was auf eine ganz besondere Zusammensetzung hinweist. Noch erscheinen sie rätselhaft. Einige Forscher vermuten aber, dass sie von einer Schicht aus Kohlendioxid- oder Ammoniak eis überzogen sind, die aus einer Eruption stammt.

Ein weiteres Zeichen für geologische Aktivität auf Titan ist das nahezu vollständige Fehlen von Kratern, obwohl es in der Vergangenheit natürlich zu vielen Einschlägen von kleineren Himmelskörpern gekommen sein muss. Möglicherweise wurden die Krater aber durch Vulkanismus oder ähnliche Prozesse aufgefüllt. Gemessen an der vermuteten Ein-

schlagrate lässt die Kraterhäufigkeit auf eine zwischen 200 Millionen und einer Milliarde Jahre alte Oberfläche schließen.

Globale Runderneuerung

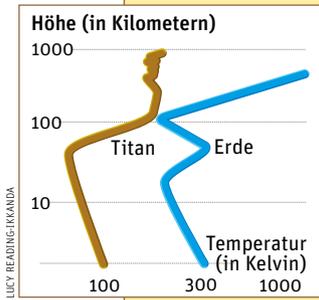
Mangels Plattentektonik verlaufen die inneren Zyklen Titans vermutlich nicht kontinuierlich wie auf der Erde, sondern schubweise. Forscher haben vorgeschlagen, diesen Teil der Geschichte von Titan folgendermaßen zu rekonstruieren. Das Innere des Saturnmonds gab während dreier Phasen Methan in die Atmosphäre ab: während der Entstehung des Monds vor 4,5 Milliarden Jahren, beim Einsetzen der Konvektion im Kern vor 2,5 Milliarden Jahren sowie beim Einsetzen der Konvektion in der Eiskruste innerhalb der vergangenen Jahrtausende. Diese letzte Episode hätte demnach eine globale vulkanische Reaktion ausgelöst, welche die gesamte Oberfläche erneuert hätte – ganz ähnlich den gewaltigen Ereignissen, die vor etwa einer Milliarde Jahren auf der Venus stattfanden (siehe SdW 5/1999, S. 38). Zwischen diesen extremen Episoden lagen aber tektonisch ruhige Zeiten, während deren aus Titans Innerem nur geringe Methanmengen entwichen. Ein solches Modell erklärt nicht nur die geringe Kraterdichte, sondern überdies die Isotopenzusammensetzung der Atmosphäre.

Mathematische Modelle des Titaninneren sagen voraus, dass der Mond einen verborgenen Ozean aus flüssigem Wasser besitzen könnte. Auch Messungen von Huygens deuten auf eine elektrisch leitende Schicht 45 Kilometer tief unter der Oberfläche hin, und die Forscher halten Wasser für den wahrscheinlichsten Kandidaten, um diese Schicht zu erklären. Radarmessungen lieferten zudem Hinweise darauf, dass die Kruste schneller rotiert als der Kern – gerade so, als ob eine dazwischenliegende flüssige Schicht als Schmiermittel wirkt. Eine neue Analyse der Daten hat diese Schlussfolgerung kürzlich jedoch wieder in Frage gestellt.

Im Prinzip könnte Cassini auch das sekundäre Magnetfeld nachweisen, das Saturn in einem möglichen unterirdischen Ozean auf Titan induzieren würde. Leider hindert die Atmosphäre des Monds den Orbiter daran, sich genug zu nähern. Doch ein solches Feld könnte die entscheidenden Hinweise liefern (siehe SdW 12/1999, S. 42), weshalb die Forscher in diesem Jahrzehnt weiter am Ball bleiben und überdies nach verräterischen Störungen in Titans Gravitationsfeld suchen wollen.

Zwischen der kurzen Zeitskala jahreszeitlicher Wetteränderungen und den in geologischen Zeiträumen ablaufenden atmosphärischen »Nachfüllzyklen« liegt eine mittlere Zeitskala von Zehntausenden bis Millionen

ANDERE TEMPERATUREN, ABER VERTRAUTE PHYSIK



Titans Atmosphäre besitzt wie die irdische eine Troposphäre (eine untere, dynamische Schicht, in der sich das Wettergeschehen abspielt) und eine Stratosphäre (eine von der ultravioletten Strahlung der Sonne aufgeheizte stabile Schicht). Titans Atmosphäre ist aber mehr als 200 Grad kälter und durch die schwächere Anziehungskraft des Mondes vertikal gestreckt. Seine Stratosphäre enthält zudem mehrere Dunstschichten aus Kohlenwasserstoffmolekülen, die eine ähnliche Rolle wie die irdische Ozonschicht spielen.

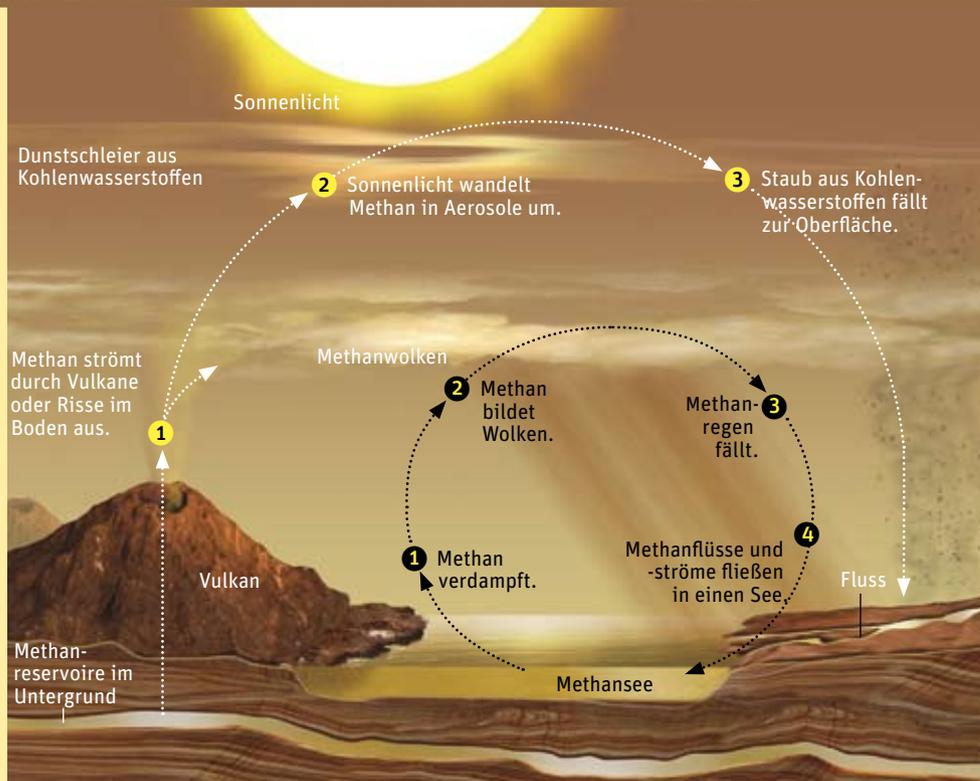
HÖHE (in Kilometern)	TITAN	ERDE
1000	THERMOSPHERE	THERMOSPHERE
100 - 1000	MESOSPHERE dünnere Dunstschleier dichter fotochemischer Dunst	THERMOSPHERE
100	STRATOSPHERE Ethanwolken	MESOSPHERE
10	STRATOSPHERE Methanwolken	STRATOSPHERE Ozonschicht
0 - 10	TROPOSPHERE Berge	TROPOSPHERE Wasserwolken Berge
0	ATMOSPHERISCHE GRENZSCHICHT	ATMOSPHERISCHE GRENZSCHICHT

DIE WETTERVORHERSAGE FÜR HEUTE: STARKE METHANNIEDERSCHLÄGE

Methan durchläuft auf Titan auf kurzen Zeitskalen einen Kreislauf (schwarz), der dem irdischen Wasserkreislauf ähnelt. Ein weiterer Zyklus (weiß) findet über geologische Zeiträume hinweg statt: Sporadisch strömt Methan aus Untergrundreservoirien des Monds in die obere Atmosphäre. Dort wandelt Sonnenstrahlung das Gas in Ethan und schwerere Kohlenwasserstoffe um, die dann durch die Atmosphäre herabsinken.



Methanwolken



METHANWOLKEN: LINKS: NASA, ILLUSTRATION: KEVIN HAND

von Jahren. Infolge der Anziehungskräfte anderer Planeten verändert sich die Neigung und Bahn der Erde ganz allmählich – mit der Folge, dass die solare Energiezufuhr variiert und so die Abfolge von Eis- und Warmzeiten ausgelöst wird. Vergleichbares ist auf Titan zu beobachten. Hier ist der südliche Sommer kürzer, aber intensiver als der nördliche, weil sich Saturn und damit auch sein Mond auf einer elliptischen Bahn um die Sonne bewegt und ihr während des südlichen Mittsommers um etwa zehn Prozent näher rückt. Die asymmetrischen Jahreszeiten könnten der Grund dafür sein, dass flüchtige Stoffe wie Methan und Ethan vom Süden zum Norden gepumpt werden und der Norden heute daher sehr viel mehr Seen aufweist. Allmählich ändert sich jedoch die relative Lage von Titans Polachse zu Saturns elliptischer Umlaufbahn. In 30 000 Jahren wird daher der Sommer im Norden intensiver sein, so dass dort die Seen austrocknen, während im Süden neue entstehen. Auch darin ähnelt Titan eher einem terrestrischen Planeten als einem eisigen Mond.

Ohnehin verweisen Cassinis Entdeckungen die Wissenschaftler oft zurück auf die Erde. So ähneln Titans Sanddünenfelder Landschaften in den afrikanischen Wüsten Namib und Sahara. Dort orientieren sich die Dünen in Richtung des Mittelwerts aus zwei vorherrschenden Windrichtungen. Doch die Forscher stoßen auf Schwierigkeiten, wenn sie die Entstehung der Dünen auf Titan reproduzieren wollen. Berücksichtigen sie in ihren Simu-

lationen noch nicht alle Effekte, die auf Titans Winde wirken? Oder müssen sie die Entstehungsprozesse der Sandformationen ganz allgemein noch besser verstehen lernen?

Ein weiteres Rätsel: Die Seen von Titan sind fast spiegelglatt, obwohl die geringere Schwerkraft und die dichtere Luft eigentlich sogar zu recht großen Wellen führen sollten. Was müssen wir noch lernen, um die Erzeugung von Wellen durch Wind zu erklären?

Seit Mitte dieses Jahres wurden neue Fragen aufgeworfen. In Infrarotspektren fand ein Team um Roger Clark vom US Geological Survey in Denver, Colorado, keinerlei Spuren von Azetylen, obwohl das Molekül durch das in die Titanatmosphäre einfallende UV-Licht eigentlich ständig nachgebildet werden müsste. Darrell Strobel von der Johns Hopkins University in Baltimore, Maryland, beobachtete, dass unerklärlicherweise Wasserstoff aus den unteren Schichten der Titangashülle zu verschwinden scheint. Und stimmt es, dass die bis zu zwei Kilometer hohen Gebirgszüge entstehen, weil der Mond allmählich schrumpft? Dieser Mechanismus würde allerdings die Existenz eines flüssigen Ozeans unter der Eiskruste voraussetzen.

Die Erkundung von Mars hat gezeigt, welche Möglichkeiten die Wissenschaft hat. Nun sollten sie auch auf Titan genutzt werden: Eines Tages werden dort hoffentlich Messballons durch die Atmosphäre schweben und sogar Rover landen – auf dem Mond, der das Zeug zu einem Planeten hat. ◁



Ralph Lorenz (links) half bei Entwicklung und Bau der Huygens-Sonde, fertigte mit Hilfe von Aufnahmen des Hubble Space Telescope die ersten Karten von Titan an und leitete das Team, das die Cassini-Radarbeobachtungen von Titan plante. Er arbeitet jetzt am Applied Physics Laboratory der Johns Hopkins University (Baltimore, Maryland). **Christophe Sotin** war an den Beobachtungen und der Analyse der Beobachtungsdaten von Titans Oberfläche mit Cassinis Visual and Infrared Mapping Spectrometer beteiligt. Seit 2007 ist er leitender Wissenschaftler am Jet Propulsion Laboratory des California Institute of Technology.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/1044178.



DREAMSTIME / ART TWISTER

Hoch hinaus

Vögeln, die auf Hochspannungsleitungen rasten, sollte eigentlich nichts geschehen. Doch das ist nur die halbe Wahrheit.

Bild aus vergangenen Zeiten (oben). Heutzutage finden die Vögel fast nur noch Hochspannungsleitungen vor – und auf diesen bevorzugen sie den Neutralleiter (rechts).

Von H. Joachim Schlichting

Natürlich gibt es eine einfache Erklärung dafür, dass Vögel unbeschadet auf Hochspannungsleitungen sitzen können. Die meisten von uns werden sie auch kennen. Warum aber sitzen die Tiere auf manchen Leitungen lieber als auf anderen? Warum scheint es eine 60-Kilowatt-Grenze zu geben – das Maximum der durch die Kabel geleiteten Leistung, die die Vögel gerade noch tolerieren? Und warum achten sie auf einen Mindestabstand, wenn sich ein dritter Ankömmling zwischen zwei Sitzende drängt?

Während in Deutschland meist Erdkabel die Oberleitungen verdrängt haben, wurde die elektrische Energie in früheren Zeiten noch durch Freileitungen in die Häuser transportiert. Sie bestanden aus Strom führenden, nicht isolierten Drähten, und zum gewohnten Bild einer ländlichen Idylle gehörte es, dass die Vögel darauf wie Noten auf Notenlinien saßen. (Diese ergaben allerdings keine nennenswerte Melodie; Ausnahmen – siehe Literaturtipps – bestätigen die Regel.) Dass den Vögeln

ihr Sitzplatz nichts anhaben kann, war also Teil der Alltagserfahrung und darum wenig überraschend. Sollte man sich aber nicht vielleicht doch darüber wundern, dass die Vögel keinen elektrischen Schlag bekommen?

Wer im Haushalt eine Strom führende Leitung berührt, wird Teil eines Stromkreises. Denn seine Füße sind mit dem Fußboden und dieser wiederum ist mit der Erde verbunden, die als Neutralleiter zum Kraftwerk fungiert. Dann kommt es unter anderem auf den Widerstand zwischen Erde und Füßen an: Ist er zu klein, kann der durch den Körper fließende Strom gefährlich werden.

Vögel auf Freileitungen stehen indessen nicht in Kontakt mit der Erde. Damit ihnen ein Stromschlag droht, müssten sie schon zwei Strom führende Leitungen, zwischen denen eine Spannung besteht, gleichzeitig berühren oder auch zwischen die Leitung und den erdverbundenen Strommast geraten. Kleinen Vögeln passiert dies selten, große jedoch erleiden vor allem auf Grund ihrer Flügelspannweite immer wieder tödliche Stromschläge. Die häufigste Todesursache für Weißstörche, so

der Naturschutzbund Deutschland, sind Unfälle an Mittelspannungsfreileitungen.

Im Großen und Ganzen aber dürften die Tiere nicht wählerisch bei ihrem Sitzplatz sein. Begeben wir uns also, auch wenn dies heutzutage einige Geduld erfordert, auf Ausschau nach Vögeln, die auf Hochspannungsleitungen rasten. Was sehen wir? Die fernen schwarzen Punkte haben keineswegs auf einer x-beliebigen Leitung Platz genommen.

Hochspannungsnetze nutzen nicht nur die Erde als »Rückleitung« zum Kraftwerk, sondern verfügen auch über einen mit der Erde verbundenen Neutralleiter. Dieser ist meist auf der Spitze der Hochspannungsmasten angebracht und, anders als die Strom führenden Leiter, nicht durch Isolatoren von den Masten getrennt (siehe Bild rechts). Und tatsächlich: Genau hier, also auf dem Neutralleiter oder den Streben des eisernen Fachwerks der Masten, scheinen die Vögel mit Vorliebe zu sitzen. Haben sie mit den Strom führenden Leitungen vielleicht doch unangenehme Erfahrungen gemacht?

Wenn sie die Leitungen im »Sitzen« mit beiden Füßen berühren, befindet sich zwischen diesen ein kurzes Leitungsstück. Könnte der Spannungsabfall bereits hier so groß sein, dass der über die Beine durch den Körper geleitete Strom zumindest zu unangenehmen Empfindungen führt? Nein, denn um Energieverluste gering zu halten, werden die Leitungen meist aus einer Eisenseele und darum gewickeltem Aluminiumdraht hergestellt. Ihr elektrischer Widerstand ist so gering, dass zumindest auf sehr kurzen Strecken so gut wie keine Spannung abfällt. Es muss also andere Gründe geben, weshalb die Vögel den Strom führenden Leitungen aus dem Weg gehen.

Akzeptanzschwelle überschritten

In der ornithologischen Literatur finden sich dazu sehr differenzierte Aussagen. Axel Donges von der Naturwissenschaftlich-Technischen Akademie in Isny berichtet, dass sich Vögel oberhalb einer durch die Kabel übertragenen Maximalleistung von etwa 60 Kilowatt nicht mehr auf Leitungsseilen aufhalten. Experimente mit Tieren in Gefangenschaft zeigten zwar, dass sie je nach Art auch höhere Spannungen akzeptieren. Die höhere Toleranz etwa von Brieftauben oder Staren dürfte sich allerdings auf ihre im Vergleich zur freien Natur geringeren Wahlmöglichkeiten zurückführen lassen.

Tatsächlich ist der durch die Leitungen fließende Wechselstrom von starken elektromagnetischen Wechselfeldern umgeben. So misst man an der Oberfläche der Leiter elektrische

Feldstärken von bis zu 1500 Kilovolt pro Meter und magnetische Feldstärken von acht Millitesla. Nach heutigem Kenntnisstand gehen von magnetischen Feldern zwar keine nennenswerten Wirkungen auf den Organismus der Vögel aus. Das elektrische Wechselfeld jedoch macht sich durch gleich zwei Effekte bemerkbar. Zum einen lassen bereits Felder ab einer Stärke von fünf Kilovolt pro Meter die Behaarung von Säugetieren und die Federn von Vögeln vibrieren. Zum anderen wirkt der elektrisch leitfähige Vogelkörper, selbst wenn es nicht zum Kontakt mit dem Leiter kommt, wie eine Antenne. Durch kapazitive Ankopplung gerät er also unter Spannung, so dass elektrische Ströme fließen. Je nach Größe des Vogels erreichen sie einige hundert Mikroampere, auf die dann auch dessen Sinnesrezeptoren ansprechen. Mindestens einer der beiden Effekte wird von den Vögeln offenbar als unangenehm empfunden.

Vögel sind »auch nur Menschen«, hatte einst der Verhaltensforscher Konrad Lorenz formuliert. Da stellt sich natürlich die Frage, ob Menschen auch Vögel sind, zumindest in der Hinsicht, dass sie ebenfalls ein Sensorium für elektrische Wechselfelder besitzen. Tatsächlich scheint es Menschen zu geben, die sich durch die Wirkungen von Wechselfeldern beeinträchtigt fühlen, weshalb nicht nur die Hochspannungsleitungen in der Nähe von Häusern, sondern auch die Stromleitungen in den Häusern selbst unter dem Stichwort Elektromog kontrovers diskutiert werden.

Doch nicht nur die Physik spielt bei der Platzwahl eine Rolle. Hat ein Vogel erst einmal die »richtige« Leitung gefunden, kommen danach noch hirnpfysiologische Zusammenhänge ins Spiel. Beobachtet man die Vögel bei ihrem Kommen und Gehen auf den Leitungen, stellt man nämlich fest: Sie nähern sich einander nur bis zu einem bestimmten Mindestabstand. Lässt sich eines der Tiere zwischen zwei bereits sitzenden Artgenossen nieder, so rückt meist derjenige zur Seite, dem der Neuankömmling zu nahe zu kommen droht. Und versucht ein Vogel sich zwischen zwei andere zu drängen, die schon so dicht sitzen, dass der Mindestabstand in jedem Fall überschritten würde, werden manchmal sogar die übernächsten Nachbarn aktiv, um die Situation bereits präventiv zu normalisieren. Da fallen einem natürlich eine ganze Menge Parallelen ein. Eine davon hat Petr Seba untersucht: Statistisch gesehen erzeugen Vögel beim Hinsetzen und Menschen beim Parken ihrer Autos dasselbe Lückenmuster. Menschen, so darf man schließen, sind also auch in dieser Hinsicht nur Vögel. ◀

H. JOACHIM SCHLICHTING



H. Joachim Schlichting ist Direktor des Instituts für Didaktik der Physik an der Universität Münster. Er erhielt 2008

den Pohl-Preis der Deutschen Physikalischen Gesellschaft für seine didaktischen Konzepte.

Donges, A.: Setzen sich Vögel wirklich auf Hochspannungsleitungen? In: MNU 53(6), S. 354, 2000 (dort weitere Literatur).

Seba, P.: Parking and the Visual Perception of Space. In: Journal of Statistical Mechanics, L10002, 2009.

Sitzende Vögel als Melodiengeber: www.basicthinking.de/blog/2009/09/09/netzkunst-wenn-voegel-den-ton-angeben

Unfallgefahren durch Freileitungen: www.storchennest.de/de/index_storchenwelt_gefahren.html

Weitere Weblinks finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/1044193.

- Teil I: Zeitwahrnehmung in Altägypten
- Teil II: Vergangenheitskult in Babylonien
- Teil III: Die Entdeckung des Fortschritts
- TEIL IV: DIE ZEIT IN DEN NATURWISSENSCHAFTEN**

In Kürze

- ▶ Die Zeit ist in der Physik **ein besonders umstrittenes Thema**. Die Suche nach einer einheitlichen Theorie zwingt die Physiker, grundlegende Annahmen zu überprüfen – und kaum etwas ist so grundlegend wie die Zeit.
- ▶ **Einige Physiker bestreiten**, dass es so etwas wie Zeit überhaupt gibt. Andere meinen, die Zeit müsse noch mehr Bedeutung gewinnen als bisher. Zwischen diesen Positionen liegt die faszinierende Idee, dass die Zeit existiert, aber nicht fundamental ist. Irgendwie entspringt aus einer statischen Welt die Zeit, die wir wahrnehmen.
- ▶ **Vielleicht entsteht die Zeit** aus der Art, wie das Universum unterteilt wird; was wir als Zeit wahrnehmen, spiegelt die Beziehungen zwischen diesen Teilen wider.

KEITH PETERS

IST ZEIT EINE ILLUSION?

Unmittelbar erleben wir, wie die Dinge sich »im Lauf der Zeit« verändern. Dennoch postulieren Physiker neuerdings ein völlig statisches, zeitloses Universum.

Von Craig Callender

Während Sie diesen Satz lesen, haben Sie wahrscheinlich das Gefühl: Dieser Moment – gerade jetzt – ist das, was sich ereignet. Der gegenwärtige Augenblick fühlt sich besonders an. Er ist real. Auch wenn wir uns an die Vergangenheit erinnern oder in die Zukunft blicken, leben wir in der Gegenwart. Natürlich geschieht der Moment, in dem Sie jenen Satz lasen, nicht mehr. Jetzt ist dieser dran. Mit anderen Worten, die Zeit scheint zu fließen, indem die Gegenwart sich ständig erneuert. Wir haben den unabwiesbaren Eindruck, dass die Zukunft offen ist, bis sie Gegenwart wird, und dass die Vergangenheit feststeht. Mit dem Fluss der Zeit treibt die Dreiheit aus fixierter Vergangenheit, unmittelbarer Gegenwart und offener Zukunft vorwärts. Diese Struktur ist in unserer Sprache, unserem Denken und Verhalten fest verankert. Von ihr hängt ab, wie wir unser Leben führen.

Doch so natürlich diese Denkweise anmutet, in der Naturwissenschaft spiegelt sie sich nicht wider. Die physikalischen Gleichungen sagen uns nicht, was sich gerade jetzt ereignet; sie sind wie eine Karte ohne die Markierung »Sie sind hier«. In ihnen gibt es weder den gegenwärtigen Moment noch den Fluss der Zeit. Insbesondere besagen Albert Einsteins Relativitätstheorien nicht nur, dass keine speziell ausgezeichnete Gegenwart existiert, sondern auch, dass alle Momente gleich real sind (siehe »Der rätselhafte Fluss der Zeit« von Paul Davies, Spektrum Spezial 1/2003, S. 10). Im Grunde ist die Zukunft nicht offener als die Vergangenheit.

Die Kluft zwischen dem wissenschaftlichen Zeitbegriff und unserem Alltagsverstand hat Denker seit jeher beschäftigt. Schritt für Schritt haben Physiker die Zeit der meisten Eigenschaften beraubt, die wir ihr gemeinhin zuschreiben. Jetzt kommt dieser Prozess zu seinem logischen Abschluss, denn nach Meinung vieler Theoretiker existiert die Zeit eigentlich überhaupt nicht.

Die Vorstellung einer zeitlosen Realität ist zunächst so verblüffend, dass man sie kaum ernst nehmen mag. Alles, was wir tun, geschieht in der Zeit. Die Welt ist eine zeitlich verbundene Ereignisfolge. Offensichtlich ergraut mein Haar, bewegen sich Objekte und so weiter. Wir sehen Veränderungen, das heißt den zeitlichen Wandel von Eigenschaften. Ohne Zeit stünde die Welt still. Eine zeitlose Theorie muss erklären, wieso wir Veränderungen wahrnehmen, wenn die Welt sich nicht wirklich ändert.

Neue Forschungen versuchen genau dieses Kunststück. Selbst wenn die Zeit auf einer fundamentalen Ebene nicht existiert, kann sie auf höheren Ebenen entstehen – so wie ein Tisch sich fest anfühlt, obwohl er ein Teilchenschwarm ist, der größtenteils leeren Raum umfasst. Festigkeit ist eine kollektive oder emergente Eigenschaft der Teilchen. Auch die Zeit könnte eine emergente Eigenschaft der grundlegenden Bestandteile unserer Welt sein.

Der Begriff der emergenten Zeit ist möglicherweise so revolutionär wie vor einem Jahrhundert Relativitätstheorie und Quantenmechanik. Einstein sagte, sein entscheidender Schritt sei die Neufassung des Zeitbegriffs gewesen. Auch die Physiker, die seinen Traum einer Vereinigung von Relativitätstheorie und Quantenmechanik weiterspinnen, halten die

Mit seiner Computerkunst veranschaulicht Keith Peters – Programmierer und Künstler aus Boston – die Idee, dass eine an sich statische Welt dennoch Dynamik zu entwickeln vermag.

Zeit für zentral. Im Jahr 2008 veranstaltete das Foundational Questions Institute (FQXi) einen Essaywettbewerb über das Wesen der Zeit, an dem prominente Physiker teilnahmen. Viele behaupteten, eine einheitliche Theorie müsse eine zeitlose Welt beschreiben. Anderen widerstrebe das. Einig war man sich nur in einem: Ohne tiefes Nachdenken über die Zeit wird man der großen Vereinigung kaum näherkommen.

Aufstieg und Niedergang der Zeit

Unser erfahrungsgesättigter Zeitbegriff musste eine ganze Serie vernichtender Kränkungen hinnehmen. Die Zeit hat in der Physik viele Aufgaben zu erfüllen, aber sukzessive wurde ihr eine nach der anderen abgenommen.

In Isaac Newtons Bewegungsgesetzen besitzt die Zeit, obgleich das auf den ersten Blick nicht auffällt, viele spezielle Eigenschaften. Im Prinzip stimmen alle Beobachter bezüglich der Abfolge von Ereignissen überein. Unabhängig davon, wann und wo ein Ereignis eintritt, vermag man als klassischer Physiker objektiv anzugeben, ob es vor, nach oder gleichzeitig mit einem anderen Ereignis im Universum geschieht. Darum liefert die Zeit eine komplette Ordnung sämtlicher Geschehnisse. Gleichzeitigkeit ist eine absolute, vom Beobachter unabhängige Tatsache. Außerdem muss die Zeit kontinuierlich sein, damit wir Geschwindigkeit und Beschleunigung definieren können.

Die klassische Zeit muss auch eine Vorstellung von Dauer enthalten – physikalisch gesprochen eine Metrik –, damit wir angeben können, wie weit Ereignisse zeitlich auseinanderliegen. Um zu sagen, dass Usain Bolt, der Weltrekordhalter im Hundertmeterlauf, eine Spitzengeschwindigkeit von 44 Kilometer pro Stunde erreichen kann, brauchen wir ein Maß für die Dauer einer Stunde. Wie die Abfolge von Ereignissen ist die Dauer beobachterunabhängig. Wenn Alice und Bob um 3 Uhr die Schule verlassen, sich trennen und um 6 Uhr zu Hause eintreffen, sind für Alice wie für Bob drei Stunden vergangen.

Im Grunde unterstellte Newton, die Welt sei mit einer Normaluhr ausgestattet, welche die Welt eindeutig und objektiv in zeitliche Momente unterteilt. Newtons Physik hört ausschließlich auf das Ticken dieser Uhr. Zudem meinte Newton, dass die Zeit fließt und dass dieser Fluss uns einen Pfeil liefert, der in die Zukunft weist; doch diese Zusatzigenschaften werden von seinen Gesetzen nicht streng eingefordert.

Newtons Zeit erscheint uns heute als alter Hut, doch bei näherer Betrachtung erweist sie sich als höchst erstaunlich. Ihre zahlreichen Eigenschaften – Ordnung, Kontinuität, Dau-

er, Gleichzeitigkeit, Fluss und Zeitpfeil – sind logisch trennbar, doch sie alle vereinen sich zu der Normaluhr, die Newton als »Zeit« titulierte. Diese Kombination von Eigenschaften war so erfolgreich, dass sie fast zwei Jahrhunderte unbeschadet überlebte.

Dann kamen die Angriffe des späten 19. und frühen 20. Jahrhunderts. Den ersten führte der österreichische Physiker Ludwig Boltzmann. Er argumentierte: Da Newtons Gesetze in beiden Zeitrichtungen gleich gut funktionieren, hat die Zeit keinen eingebauten Pfeil. Der Unterschied zwischen Vergangenheit und Zukunft ist keine Eigenschaft der Zeit selbst, sondern entsteht durch die asymmetrische Organisation der Materie im Universum. Obwohl Boltzmann damit der newtonschen Zeit in überzeugender Weise eine ihrer Eigenschaften raubte, debattieren die Physiker noch immer über die Details dieses Arguments (siehe »Der kosmische Ursprung des Zeitpfeils« von Sean M. Carroll, Spektrum der Wissenschaft 8/2008, S. 26).

Den nächsten Angriff führte Einstein, indem er die absolute Gleichzeitigkeit abschaffte. Nach seiner speziellen Relativitätstheorie hängt die Gleichzeitigkeit zweier Ereignisse davon ab, wie schnell man sich bewegt. Die eigentliche Bühne der Ereignisse ist nicht die Zeit oder der Raum, sondern ihre Vereinigung: die Raumzeit. Zwei Beobachter, die mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten unterwegs sind, stimmen nicht darin überein, wann und wo ein Ereignis eintritt, doch über seinen Ort in der Raumzeit sind sie sich einig. Raum und Zeit sind sekundäre Begriffe, die – nach einem berühmten Ausspruch des Mathematikers Hermann Minkowski, bei dem Einstein studiert hatte – »in bloße Schatten versinken werden«.

Noch schlimmer wird es 1915 mit Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie; sie erweitert die spezielle Relativitätstheorie auf Situationen, bei denen die Schwerkraft wirkt. Die Gravitation verzerrt die Zeit derart, dass eine Sekunde hier nicht unbedingt dasselbe bedeutet wie eine Sekunde dort. Nur ausnahmsweise ist es möglich, Uhren zu synchronisieren und zu erreichen, dass sie synchron bleiben. Die Welt entfaltet sich nicht im Takt eines einzigen Zeitparameters. In extremen Situationen lässt sie sich nicht einmal in Momente zerlegen; dann wird es unmöglich, zu sagen, ein Ereignis habe vor oder nach einem anderen stattgefunden.

Die allgemeine Relativitätstheorie enthält viele Funktionen mit dem Etikett Zeit: Koordinatenzeit, Eigenzeit, Globalzeit. Zusammen erledigen sie viele Aufgaben, die Newtons einzige Zeit erfüllte, doch allein scheint keine des

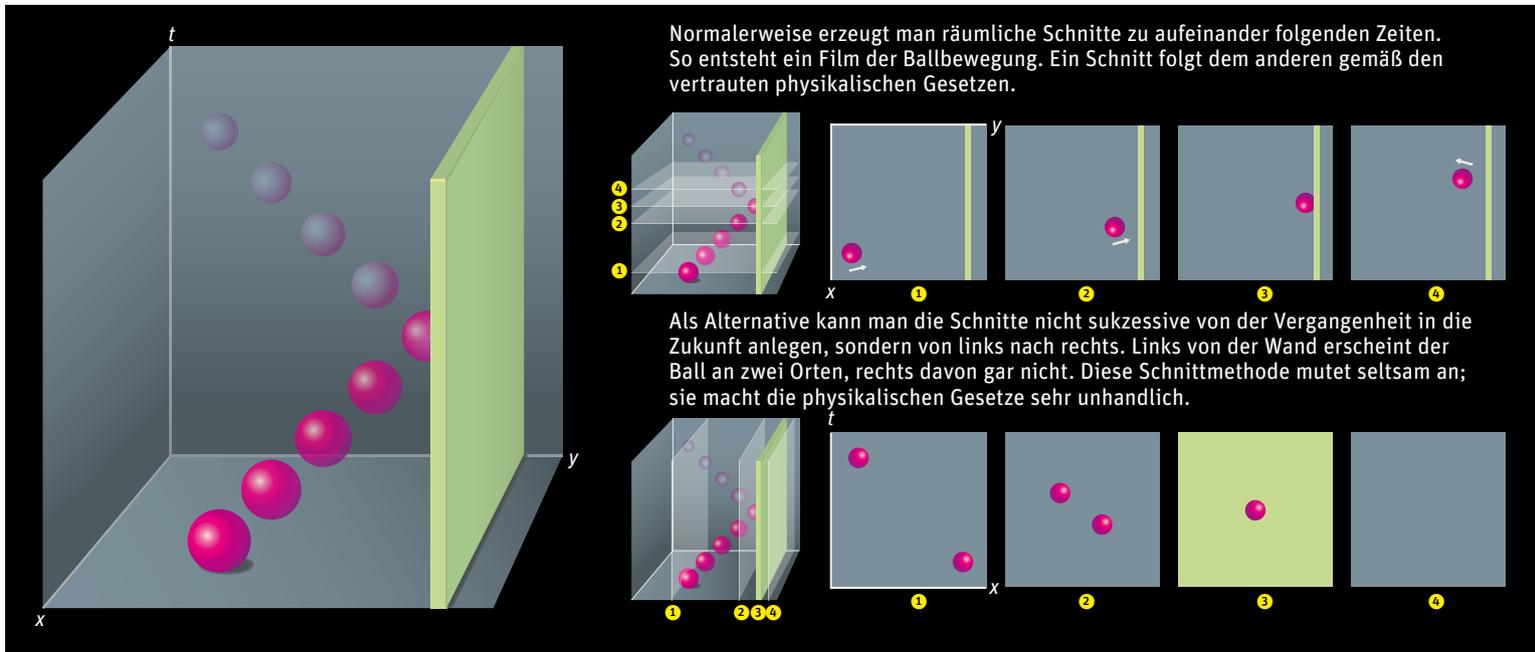
EMERGENTE ZEIT

Das Wort Emergenz leitet sich vom lateinischen *emergere* für auftauchen, emporkommen her. Gemeint ist, dass das Gesamtverhalten eines Systems Eigenschaften und Verhaltensweisen zeigt, die nicht mit denjenigen der isolierten Systemelemente identisch sind. Ein klassisches Beispiel bietet die statistische Thermodynamik: Aus der Kinematik vieler Gasatome »emergiert« das makroskopische Verhalten des Gases. Es wird durch Größen wie Druck und Temperatur beschrieben, die für einzelne Gasatome keinen Sinn haben – sondern erst für das statistische Verhalten großer Teilchenmengen. In ähnlicher Weise könnte die Zeit aus zeitlosen Komponenten »emergieren«.

WAS DIE ZEIT VOM RAUM UNTERSCHIEDET

Physiker und Künstler veranschaulichen die Zeit als zusätzliche Raumdimension und kreieren eine einheitliche Raumzeit. Sie ist hier als ein dreidimensionaler Block dargestellt, in dem ein Ball

gegen eine Wand prallt. Der Relativitätstheorie zufolge kann die Raumzeit unterschiedlich aufgeschnitten werden. Doch nicht alle Schnitte sind gleichermaßen vernünftig.



Namens würdig zu sein. Entweder hört die Physik nicht auf diese Uhren, oder sie gelten nur für kleine Flecken des Universums oder für spezielle Beobachter. Wenn Physiker heute bedauern, dass eine einheitliche Theorie die Zeit wird eliminieren müssen, weigern sie sich eigentlich nur einzusehen, dass die Zeit schon 1915 verloren ging.

Die Zeit als große Erzählerin

Wozu ist die Zeit dann überhaupt gut? Man könnte fast glauben, der Unterschied zwischen Raum und Zeit sei fast verschwunden und der wahre Schauplatz der Ereignisse in einem relativistischen Universum sei ein großer vierdimensionaler Block. Die Relativitätstheorie scheint die Zeit zu verräumlichen, als wäre sie bloß eine Richtung innerhalb des Blocks – als wäre die Raumzeit ein Brotlaib, der sich auf unterschiedliche Art in Scheiben schneiden lässt, denen man fast beliebige die Attribute »Raum« oder »Zeit« zuordnen kann.

Doch selbst in der allgemeinen Relativitätstheorie behält die Zeit eine eigene und wichtige Funktion: Sie unterscheidet lokal zwischen »zeitartigen« und »raumartigen« Richtungen. Zeitartig zusammenhängende Ereignisse können kausal verbunden sein; ein Objekt oder Signal kann von einem Ereignis zum anderen gelangen und beeinflus-

sen, was geschieht. Raumartig zusammenhängende Ereignisse sind kausal unverbunden; kein Objekt oder Signal kann von einem Ereignis zum anderen gelangen. Mathematisch unterscheiden sich die beiden Richtungen nur durch ein Minuszeichen, doch physikalisch macht das einen gewaltigen Unterschied. Beobachter nehmen die Reihenfolge raumartiger Ereignisse verschieden wahr, aber über die Abfolge zeitartiger Ereignisse sind sich alle einig. Wenn ein Beobachter feststellt, dass ein Ereignis ein anderes verursachen kann, dann gilt dasselbe für alle Beobachter.

In meinem Essay für den FQXi-Wettbewerb untersuchte ich, was diese Eigenschaft der Zeit bedeutet. Angenommen, wir zerschneiden die Raumzeit in Scheiben, sukzessive von der Vergangenheit in die Zukunft. Jede Scheibe ist der gesamte dreidimensionale Raum zu einer bestimmten Zeit. Die Summe all dieser raumartigen Schnitte ist die vierdimensionale Raumzeit. Wir können aber auch quasi von der Seite auf die Welt schauen und sie entsprechend zerschneiden. Dadurch wird jeder dreidimensionale Schnitt eine seltsame Mischung von raumartigen – zweidimensionalen – und zeitartigen Ereignissen. Die zwei Schnittfolgen ähneln dem vertikalen oder horizontalen Zerteilen eines Brotlaibs (siehe Kästen oben).

Selbst in der **allgemeinen Relativitätstheorie**, welche die Zeit zu verräumlichen scheint, behält die Zeit eine eigene und wichtige Funktion

VERTEIDIGER DES ZEITFLUSSES

Nicht alle Physiker meinen, die Welt sei im Grunde zeitlos. Eine interessante Alternative ist die kausale Mengenlehre, die Rafael Sorkin und David Rideout vom Perimeter Institute for Theoretical Physics in Waterloo (Kanada) entwickelt haben. Demnach ist die Welt eine Menge von Ereignissen, genannt *causet* (ein Kunstwort aus englisch *causal* für kausal und *set* für Menge). Diese Ereignismenge wächst, indem nach probabilistischen Regeln neue Ereignisse eintreten. Man hofft, dass dieser Prozess die vertrauten Eigenschaften der Raumzeit reproduziert, insbesondere den Fluss der Zeit. Offen bleibt, ob dabei mit der Relativitätstheorie verträgliche Welten entstehen.

Die erste Methode ist Physikern vertraut – und Kinogängern. Die Einzelbilder eines Films entsprechen Schnitten der Raumzeit: Sie zeigen den Raum in sukzessiven Augenblicken. Wie Filmfans, welche die Handlung erraten und vorhersagen, was als Nächstes passiert, können Physiker aus einem einzelnen kompletten räumlichen Schnitt durch Anwendung der physikalischen Gesetze rekonstruieren, was in den anderen räumlichen Schnitten geschieht.

Zu der zweiten Schnittmethode gibt es keine einfache Analogie. Dabei wird die Raumzeit nicht von der Vergangenheit in die Zukunft zerstückelt, sondern von Osten nach Westen. Ein Beispiel wäre die Nordwand Ihrer Wohnung plus alldem, was auf dieser Wand künftig passiert. Mit Hilfe der physikalischen Gesetze rekonstruieren Sie aus diesem Schnitt, wie der Rest Ihrer Wohnung aussieht – und sogar das übrige Universum. Das hört sich seltsam an. Lassen die physikalischen Gesetze so etwas überhaupt zu? Wie der Mathematiker Walter Craig von der McMaster University in Hamilton (Kanada) und der Philosoph Steven Weinstein von der University of Waterloo (Kanada) kürzlich gezeigt haben, ist das zumindest für einige einfache Situationen tatsächlich der Fall.

Auf dem Weg zur Quantenzeit

Obwohl beide Schnittverfahren im Prinzip möglich sind, unterscheiden sie sich grundlegend. Beim üblichen Zerschneiden von der Vergangenheit zur Zukunft lassen sich die erforderlichen Daten auf einem Schnitt recht leicht beschaffen. Beispielsweise misst man die Geschwindigkeiten sämtlicher Teilchen. Da die Geschwindigkeit eines Teilchens an einem Ort von der eines anderen Teilchens unabhängig ist, kann man beide einfach messen. Doch bei der zweiten Methode sind die Teilcheneigenschaften nicht unabhängig; sie müssen auf sehr spezielle Weise zusammenpassen, damit ein einzelner Schnitt zur Rekonstruktion aller anderen ausreicht. Man müsste äußerst schwierige Messungen an Teilchengruppen ausführen, um die erforderlichen Daten zu sammeln. Wie Craig und Weinstein an einem Beispiel demonstriert haben, lässt sich nur in Ausnahmefällen aus diesen Messungen die volle Raumzeit rekonstruieren.

In einem sehr präzisen Sinn ist die Zeit innerhalb der Raumzeit diejenige Richtung, in der gute Vorhersagen möglich sind – die Richtung, in der wir die informativsten Geschichten erzählen können. Die Erzählung des Universums entfaltet sich nicht im Raum, sondern in der Zeit.

Eines der höchsten Ziele der modernen Physik bleibt die Vereinigung der allgemeinen

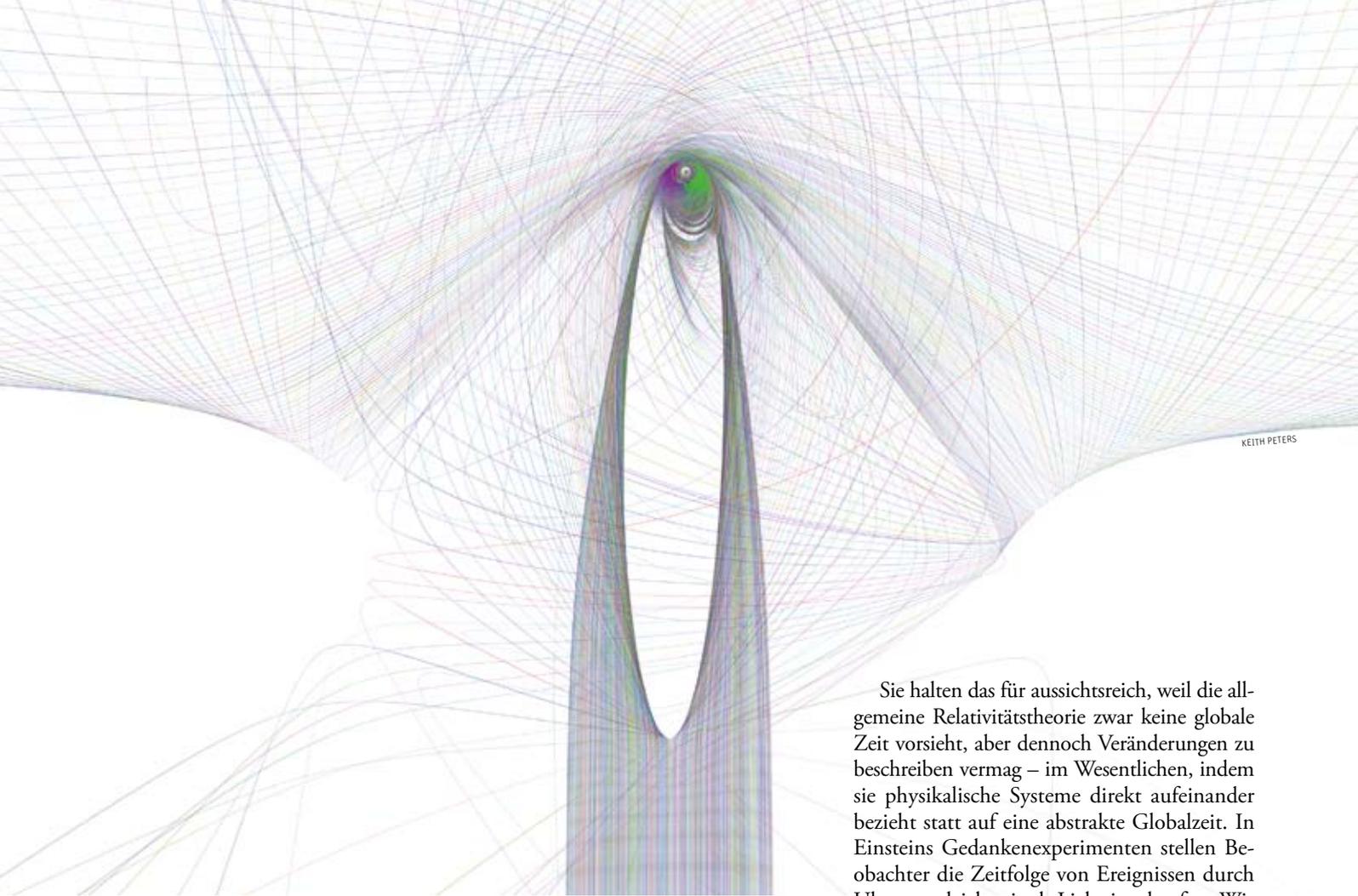
Relativitätstheorie mit der Quantenmechanik zu einer einzigen Theorie, die zugleich Gravitation und Quantenphänomene bewältigt – eine Quantentheorie der Gravitation. Dabei ist hinderlich, dass die Quantenmechanik von der Zeit Eigenschaften verlangt, die dem bisher Gesagten widersprechen.

Quantenmechanische Objekte haben ein so reiches Verhaltensrepertoire, dass klassische Größen wie Ort und Geschwindigkeit dafür nicht genügen. Die vollständige Beschreibung liefert erst eine mathematische Funktion, der so genannte Quantenzustand. Er entwickelt sich kontinuierlich mit der Zeit. Daraus können Physiker die Wahrscheinlichkeit jedes experimentellen Resultats zu jeder Zeit berechnen. Wenn wir ein Elektron durch einen Apparat senden, der es entweder nach oben oder nach unten ablenken wird, vermag die Quantenmechanik das Ergebnis meist nicht mit Gewissheit vorherzusagen. Der Quantenzustand liefert nur Wahrscheinlichkeiten – zum Beispiel 25 Prozent für Ablenkung aufwärts und 75 Prozent für Ablenkung abwärts. Zwei durch identische Quantenzustände beschriebene Systeme können unterschiedliche Ergebnisse liefern. Die Resultate von Quantenexperimenten sind probabilistisch.

Die probabilistischen Vorhersagen der Theorie verlangen von der Zeit bestimmte Eigenschaften. Erstens macht die Zeit Widersprüche möglich. Ein Würfelwurf kann nicht gleichzeitig 5 und 3 ergeben, sondern nur zu verschiedenen Zeiten. Mit dieser Eigenschaft hängt zusammen, dass die sechs Wahrscheinlichkeiten für jede Augenzahl zusammen 100 Prozent betragen müssen; andernfalls hätte der Wahrscheinlichkeitsbegriff keinen Sinn. Die Wahrscheinlichkeiten summieren sich zu einer bestimmten Zeit, nicht an einem Ort. Dasselbe gilt für die Wahrscheinlichkeiten, dass Quantenteilchen einen bestimmten Ort oder Impuls haben.

Zweitens macht die zeitliche Ordnung von Quantenmessungen einen Unterschied. Angenommen, ich schicke ein Elektron durch einen Apparat, der es zuerst in vertikaler Richtung und danach horizontal ablenkt. Wenn es auftaucht, messe ich seinen Drehimpuls. Ich wiederhole das Experiment, indem ich diesmal das Elektron erst horizontal, dann vertikal ablenke, und messe wieder seinen Drehimpuls. Die Werte werden ganz verschieden sein.

Drittens liefert ein Quantenzustand Wahrscheinlichkeiten für den gesamten Raum zu einem bestimmten Zeitpunkt. Wenn der Zustand ein Teilchenpaar umfasst, dann beeinflusst die Messung des einen Teilchens augenblicklich das andere über beliebige Entfernungen hinweg. Das ist die berüchtigte



KEITH PETERS

Vielleicht existiert die Zeit nicht an sich, sondern entsteht als eine Beschreibung für die Beziehungen zwischen Objekten. Diese Idee inspirierte den Künstler Keith Peters zu seinen kompliziert verwobenen farbigen Schleifen.

chungen dieselbe Form gaben wie den Formeln für den Elektromagnetismus; man hoffte, die Methoden zur Entwicklung einer Quantentheorie des Elektromagnetismus könnten auch für die Gravitation funktionieren. Als John Wheeler und Bryce DeWitt dieses Verfahren Ende der 1960er Jahre ausprobierten, erhielten sie ein höchst seltsames Resultat. In ihrer Wheeler-DeWitt-Gleichung kam überhaupt keine Zeitvariable vor. Das Zeitsymbol t war einfach verschwunden.

Jahrzehntelang waren die Physiker fassungslos. Wie konnte die Zeit einfach fehlen? Im Nachhinein kam dieses Ergebnis gar nicht so überraschend. Wie erwähnt war die Zeit aus der allgemeinen Relativitätstheorie schon fast verschwunden, noch bevor Physiker versuchten, sie mit der Quantenmechanik zu vereinen.

Wenn man das Resultat wörtlich nimmt, existiert die Zeit nicht wirklich. Carlos Rovelli von der Universität de la Méditerranée in Marseille, einer der Begründer der Schleifengravitation, nannte seinen FQXi-Essay »Forget Time« (Vergiss die Zeit). Er und der englische Physiker Julian Barbour sind die prominentesten Vertreter dieser Idee. Sie haben versucht, die Quantenmechanik auf zeitlose Weise zu formulieren, wie das die Relativitätstheorie anscheinend verlangt.

Sie halten das für aussichtsreich, weil die allgemeine Relativitätstheorie zwar keine globale Zeit vorsieht, aber dennoch Veränderungen zu beschreiben vermag – im Wesentlichen, indem sie physikalische Systeme direkt aufeinander bezieht statt auf eine abstrakte Globalzeit. In Einsteins Gedankenexperimenten stellen Beobachter die Zeitfolge von Ereignissen durch Uhrenvergleich mittels Lichtsignalen fest. Wir könnten die Ortsveränderung eines Erdsatelliten anhand des Tickens einer Küchenuhr messen – oder umgekehrt. Wir beschreiben dabei die Korrelationen zwischen zwei physikalischen Objekten, ohne irgendeine Globalzeit als Zwischenglied. Statt meine Haarfarbe als mit den Jahren veränderlich zu beschreiben, können wir sie mit dem Satellitenumlauf in Beziehung setzen. Statt zu sagen, ein Tennisball wird mit zehn Meter pro Sekundenquadrat beschleunigt, können wir ihn auf die Veränderung eines Gletschers beziehen. Und so weiter. Die Zeit wird überflüssig. Veränderungen lassen sich ohne sie quantifizieren.

Dieses riesige Netzwerk von Korrelationen ist so ordentlich organisiert, dass wir etwas namens »Zeit« definieren und alles darauf beziehen können; das befreit uns von der Bürde, all die direkten Relationen zu verfolgen. Die Physiker fassen die Vorgänge im Universum kompakt zu physikalischen Gesetzen zusammen, in denen die Zeit vorkommt. Doch diese bequeme Tatsache darf uns nicht auf die Idee bringen, Zeit gehöre zur Grundausstattung des Universums. Auch Geld macht das Leben viel leichter; sonst müssten wir bei jedem Kaffee-kauf einen Naturalientausch aushandeln (siehe Kasten S. 37). Aber Geld ist ein erfundener Platzhalter für von uns begehrte Güter, kein Wert an sich. Ebenso erlaubt uns die Zeit,

physikalische Systeme miteinander in Beziehung zu setzen, ohne dass wir genau herausfinden müssen, wie ein Gletscher mit einem Tennisball zusammenhängt. Sie ist ebenfalls eine bequeme Fiktion, die in der Natur genauso wenig fundamental existiert wie Geld.

Die Zeit loszuwerden hat einen gewissen Reiz, aber auch unangenehme Nebenwirkungen. Zum einen muss die Quantenmechanik gründlich überdacht werden. Nehmen wir den berühmten Fall von Schrödingers Katze. Sie schwebt zwischen Leben und Tod, während ihr Schicksal vom Zustand eines Quantenteilchens abhängt. Nach der gängigen Interpretation entscheidet sich ihr Schicksal erst, wenn eine Messung oder ein äquivalenter Vorgang stattfindet. Doch Rovelli würde behaupten, dass der Zustand der Katze niemals entschieden wird. Das arme Ding kann für sich tot sein, für einen Menschen im Raum am Leben, tot für einen zweiten Menschen außerhalb des Raums und so weiter.

Es ist schon ungewohnt, den Zeitpunkt des Katzentods vom Beobachter abhängig zu machen, wie das die spezielle Relativitätstheorie vorschreibt. Noch viel überraschender ist es, den Eintritt des Todes überhaupt zu relativieren, wie Rovelli vorschlägt, indem er den Geist der Relativitätstheorie auf die Spitze treibt. Da die Zeit so grundlegend ist, muss ihre Vertreibung das physikalische Weltbild erschüttern.

Die wiedergefundene Zeit

Selbst wenn die Welt im Grunde zeitlos ist, scheint sie doch Zeit zu enthalten. Jeder, der für die zeitlose Quantengravitation eintritt, muss unbedingt erklären, warum die Welt veränderlich erscheint. In der allgemeinen Relativitätstheorie fehlt die newtonsche Zeit, aber zumindest enthält sie verschiedene Ersatzkomponenten, die sich zusammen wie die newtonsche Zeit verhalten, sofern die Gravitation schwach ist und die Relativgeschwindigkeiten gering bleiben. Die Wheeler-DeWitt-Gleichung bietet nicht einmal dieses Surrogat. Barbour und Rovelli haben jeweils zu beantworten versucht, wie dem Nichts die Zeit – oder wenigstens eine Illusion davon – zu entspringen vermag. Doch die kanonische Quantengravitation bietet bereits eine weiterentwickelte Idee.

Dieser Vorschlag, die so genannte semiklassische Zeit, geht auf einen Artikel von 1931 zurück, in dem der englische Physiker Nevill F. Mott die Kollision zwischen einem Heliumkern und einem größeren Atom beschrieb. Um das Gesamtsystem darzustellen, nutzte Mott eine Gleichung für statische Systeme, in der die Zeit fehlt. Er teilte das System dann in zwei Subsysteme und verwendete den Helium-

kern als »Uhr« für das Atom. Erstaunlicherweise gehorcht das Atom relativ zum Kern der üblichen zeitabhängigen Gleichung der Quantenmechanik, wobei eine räumliche Funktion die Rolle der Zeit spielt. Obwohl das System insgesamt zeitlos ist, verhalten sich die einzelnen Teile nicht statisch. In der zeitlosen Gleichung für das Gesamtsystem verbirgt sich eine Zeit für das Subsystem.

Das Gleiche gilt für die Quantengravitation, behauptete Claus Kiefer von der Universität Köln in seinem FQXi-Essay und berief sich unter anderem auf Thomas Banks von der University of California in Santa Cruz. Das Universum mag zeitlos sein, aber wenn man es gedanklich in Stücke bricht, können manche Stücke als Uhren für die anderen dienen. Aus Zeitlosigkeit geht Zeit hervor. Wir nehmen die Zeit wahr, weil wir von Natur aus eines dieser Stücke sind.

Die Idee ist zwar interessant und verblüffend, befriedigt aber nicht ganz. Das Universum lässt sich nicht immer in Stücke aufbrechen, die als Uhren dienen, und in solchen Fällen macht die Theorie keine probabilistischen Vorhersagen. Um alle Situationen zu beherrschen, ist eine vollständige Quantentheorie der Gravitation nötig – und tieferes Nachdenken über die Zeit.

Historisch gingen die Physiker von der hochgradig strukturierten Zeit der Erfahrung aus, mit fester Vergangenheit, Gegenwart und offener Zukunft. Sie bauten die Struktur schrittweise ab, bis kaum etwas davon übrig blieb. Nun müssen die Forscher diesen Gedankenweg umkehren und die Erfahrungszeit aus der Zeit der nichtfundamentalen Physik rekonstruieren – die vielleicht ihrerseits aus einem Netz von Korrelationen zwischen Stücken einer fundamental statischen Welt rekonstruiert werden muss.

Der französische Philosoph Maurice Merleau-Ponty argumentierte 1945 in seiner »Phänomenologie der Wahrnehmung« ähnlich wie moderne Physiker gegen einen objektiven Fluss der Zeit: »Die ›Geschehnisse‹ sind von einem endlichen Beobachter aus der raumzeitlichen Totalität der objektiven Welt herausgeschnitten. Wenn ich aber diese Welt selbst betrachte, so habe ich nur ein einziges unteilbares Sein, das sich nicht wandelt.« Merleau-Ponty sprach von unserer subjektiven Zeiterfahrung, und bis vor Kurzem ahnte niemand, dass die objektive Zeit auf ähnliche Weise erklärt werden könnte. Die Zeit existiert vielleicht nur, wenn wir die Welt in Subsysteme unterteilen und betrachten, was sie verbindet. In diesem Bild entsteht die physikalische Zeit dadurch, dass wir uns selbst in Gedanken von der übrigen Welt ausnehmen. ◀



Craig Callender ist Philosophieprofessor an der University of California in San Diego. Beginnend mit seiner Doktorarbeit »Explaining Time's Arrow« hat er zahlreiche Fachartikel über Philosophie und Physik der Zeit publiziert. Er schrieb das populäre Buch »Introducing Time« und arbeitet an einem Werk über Zeitwahrnehmung unter dem Titel »Time: From the Inside Out«.

Callender, C.: Introducing Time. Faber & Faber, London 2010.

Carroll, S.: From Eternity to Here: The Quest for the Ultimate Theory of Time. Dutton, Boston 2010.

Greene, B.: Der Stoff, aus dem der Kosmos ist. Siedler, München 2004.

Healey, R.: Can Physics Coherently Deny the Reality of Time? In: Callender, C. (Hg.): Time, Reality & Experience. Cambridge University Press, 2002.

Rovelli, C.: Relational Quantum Mechanics. In: International Journal of Theoretical Physics 35(8), S. 1637–1678, 1996.

Smolin, L.: Three Roads to Quantum Gravity. Basic Books, New York 2002.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/1044180.

QUANTENMECHANIK

Von den falschen Tönen zur Unbestimmtheitsrelation

Dass eine Messung eine unvermeidliche Unschärfe hat, ist keine Spezialität der Quantenmechanik, sondern gilt grundsätzlich für alle wellenartigen Phänome – von Musik bis zum Alphazerfall von Atomkernen.

Von Norbert Treitz

Wie kann man die Frequenz einer Schwingung messen? Man gibt sich eine Messdauer Δt vor und zählt, wie viele Schwingungen in diesem Zeitintervall stattfinden. Nennen wir diese Anzahl n ; dann können wir die Periode oder Schwingungsdauer T berechnen als $T = \Delta t/n$. Da n nur eine ganze Zahl sein kann, leidet sie unter einer Unsicherheit Δn , deren Betrag nicht wesentlich kleiner als 1 ist. Wir rechnen im Folgenden mit der Größenordnung 1, sozusagen als Aufrundung für den *worst case*. Der Kehrwert der Periode wird Frequenz genannt: $f = 1/T$. Mit der Unsicherheit Δf gilt dann $f \pm \Delta f = (n \pm 1)/\Delta t$ und $\Delta f \approx \pm 1/\Delta t$.

Wenn man also eine Sekunde lang misst, findet man die Frequenz auf 1 Hertz ungenau, nach zehn Sekunden aber auf 0,1 Hertz. Allgemein braucht man, um eine Frequenz auf k Hertz genau zu erkennen – oder eben zwei Schwingungen zu unterscheiden, deren Frequenzen um k Hertz voneinander abweichen –, eine Messdauer von $1/k$ Sekunden. Je länger man misst, desto geringer wird die Ungenauigkeit; eine absolut genaue Frequenzmessung dauert aber mit dieser Methode unendlich lange.

Wer schon weiß, dass die zu vermessende Schwingung die exakte Gestalt einer Sinuskurve hat, erreicht die geforderte Genauigkeit in viel kürzerer Zeit, zum Beispiel durch Messung mehrerer Kurvenpunkte. Für allgemeine periodische Phänomene bleibt jedoch neben dem Abzählen der Schwingungen im Wesentlichen nur die Fourier-Analyse, und auch für sie gilt der genannte Zu-

sammenhang zwischen Messdauer und Frequenzgenauigkeit. Er ist bemerkenswerterweise unabhängig vom Wert der Frequenz selbst.

Eine blecherne Realisierung der Fourier-Analyse ist der Zungenfrequenzmesser. Er sieht aus wie ein Stück aus einer Mundharmonika: Nebeneinander sind mehrere Metallzungen aus Eisen oder einem anderen ferromagnetischen Material angebracht, die verschiedene Resonanzfrequenzen besitzen. Man bringt das Gerät in ein Magnetfeld, das mit der zu messenden Frequenz schwankt. Dann schwingt die Zunge mit der »richtigen« Resonanzfrequenz besonders stark mit. Die Nachbarzungen haben leicht abweichende Frequenzen und schwingen umso schwächer mit, je weniger die Frequenzen zusammenpassen.

Der Fehltritt des Organisten

Auch unsere Ohren sind Frequenzmessgeräte, sogar ziemlich genaue, was wir merken, wenn sich ein Musiker verspielt. Schon kleinste Frequenzabweichungen kreischen uns in den Ohren. Die Rolle der Metallzungen spielen – mit einigen wesentlichen Verfeinerungen – die Haarzellen im Innenohr. Aber wie klein darf die Abweichung sein, damit wir sie noch wahrnehmen?

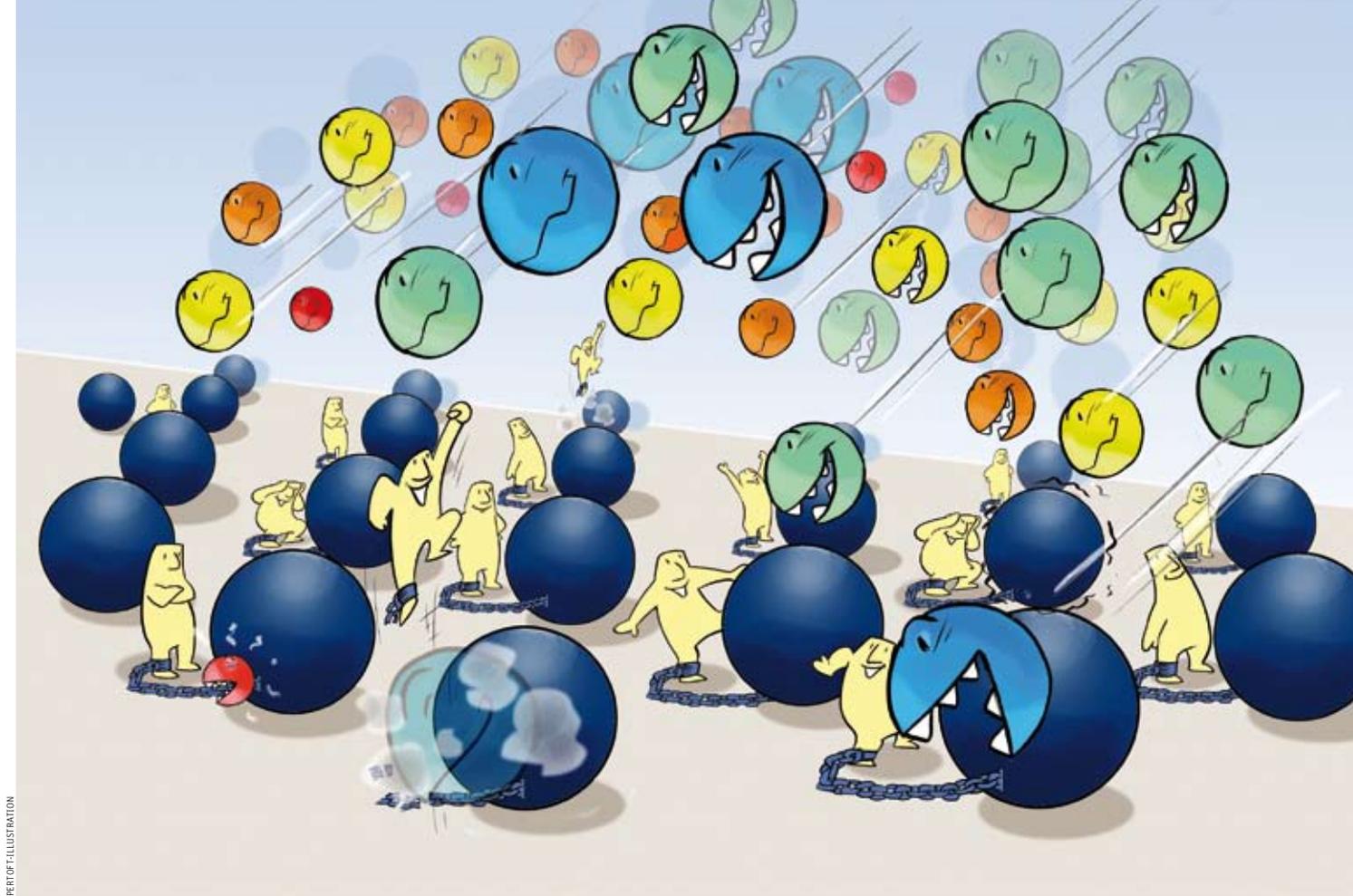
Nach der Regel des Physiologen Ernst Heinrich Weber (1795–1878) gilt: Zwei Sinnesreize R und $R + \Delta R$ sind unterscheidbar, wenn $\Delta R/R$ einen Mindestwert überschreitet. Für das Hören von Frequenzen beträgt diese Schwelle rund drei Tausendstel (Spektrum der Wissenschaft 6/2008, S. 42). Man kann also 1003 und 1000 Hertz gerade so

eben unterscheiden, wenn man sie nacheinander jeweils lange genug zu hören bekommt, ebenso 100,3 und 100 oder 10030 und 10000 Hertz. In ein Halbton-Intervall (rund 1,06:1) passen demnach 20 gerade noch unterscheidbare Zwischenstufen.

Wie lange braucht ein Zuhörer, um zu merken, dass jemand sich um einen Halbton verspielt? Wie lange hat der Spieler Zeit, von der falschen Taste auf die richtige zu wechseln, bevor es dem Publikum auffällt? (Natürlich darf er nicht warten, bis er selbst hört, dass der Ton falsch ist ...) Nehmen wir einen mittelhohen Ton an, zum Beispiel 320 Hertz. Der nächsthöhere Halbton liegt sechs Prozent höher, also bei 338 Hertz. Die Differenz ist 18 Hertz, wird also schon nach rund 1/18 Sekunde hörbar.

Wenn der Musiker aber einen drei Oktaven tieferen Ton treffen will – also 40 Hertz – und sich um einen Halbton verspielt, ist die absolute Differenz nur 2,4 Hertz. Diese ist erst nach ungefähr 0,4 Sekunden deutlich zu hören. Da hat der Organist, der mit dem linken Fuß einen Fehltritt begeht, gute Chancen zur Korrektur (Spektrum der Wissenschaft 12/2009, S. 32).

Bisher war keine Rede von Atomphysik; es geht um mathematische Beziehungen zwischen Größen, die bei allen Schwingungen auftreten. Wir weiten sie auf Wellen aus: Multiplizieren wir die Größen mit der Phasengeschwindigkeit c , so kommen wir von der Periode T und der Frequenz f zur Wellenlänge λ und ihrem Kehrwert $1/\lambda$. Von der Messdauer Δt kommen wir zur Länge des Wellenzugs und damit zur Messstrecke Δx , und



PERTOFT-ILLUSTRATION

Nur die energiereichsten unter den Photonen (blau) sind fähig, ein Elektron aus seiner Bindung an den Atomkern zu befreien (und hauchen durch diesen Akt ihr Leben aus). Dagegen beißt sich ein kleines Photon (rot) an der Kette die Zähne aus.

die Ungenauigkeitsbeziehung wird aus $\Delta f = |1/\Delta t|$ zu $\Delta(1/\lambda) = |1/\Delta x|$.

Zu Heisenbergs berühmter Beziehung zwischen der Energie- und der Zeitunschärfe fehlt uns nun nur noch eine Zutat: Einsteins Lichtquantenhypothese.

$E = hf$: der Ausbruch aus der klassischen Physik

Schon 1888 hatte Wilhelm Hallwachs (1859–1922), die Ansätze seines Lehrers Heinrich Hertz weiterführend, den »äußeren Fotoeffekt« oder auch »äußeren lichtelektrischen Effekt« entdeckt: Licht kann aus einer Metalloberfläche elektrische Ladung freisetzen. Wenige Jahre später, 1895, fand ein weiterer Hertz-Schüler heraus, dass das Licht eine Mindestfrequenz mitbringen muss, um Elektronen aus dem Metall herauszuschlagen. Es handelte sich um Philipp Lenard (1862–1947), der später zweimal aus sehr verschiedenen Gründen prominent wurde: als Nobelpreisträger 1905 für seine Arbeiten über Kathodenstrahlen und Jahrzehnte später durch seinen Versuch,

rassistische Ideologien in die Physik zu mischen (»Deutsche Physik«).

Elektronen können an der Oberfläche eines Metalls mehr oder weniger fest gehalten werden. Als Maß dafür ist nicht die Kraft sinnvoll, sondern die Ablöseenergie. Die können wir uns wie ein Lösegeld vorstellen: Ein einzelnes Lichtteilchen (Photon) bringt eine Energieportion mit, um ein gefangenes Elektron zu befreien; diese Energieportion ist umso größer, je höher die Frequenz des Photons ist. Das Elektron kann die milden Gaben aber nicht ansparen, sondern muss von einem Photon auf einen Schlag genug Energie bekommen, um sich »freizukaufen«. Deswegen hilft es ihm nicht, wenn es insgesamt sehr viel Lichtenergie empfängt, aber jedes einzelne Photon zu wenig Energie mitbringt (Bild oben).

In seiner Lichtquantenhypothese von 1905 vermutete Albert Einstein nicht nur, dass das Licht in Energieportionen (»Quanten«) auftritt, sondern auch, dass deren Größe E der Frequenz f der Lichtwelle proportional ist: $E = hf$. Die Proportionalitätskonstante h (das »planck-

sche Wirkungsquantum«), heute die zentrale Größe der Quantenphysik, hatte Max Planck 1900 »in einem Akt der Verzweiflung« als Hilfsgröße (daher der Name h) in die Physik eingeführt, weil er nur so verschiedene Formeln für die Strahlungsverteilung schwarzer Körper in Einklang bringen konnte. Zu der Beziehung $E = hf$ gibt es in der klassischen Physik keinerlei Entsprechung.

Wir stellen uns heute vor, dass Licht sich gleichzeitig wie Teilchen und Wellen verhält: Jedes Lichtteilchen trägt eine Energiemenge $E = hf$ mit sich und zugleich einen Impuls des Betrags $p = hf/c$. Andererseits verhält es sich wie Wellen der Frequenz f und – zumindest im Vakuum – der Wellenlänge $\lambda = c/f = h/p$.

Nun ist die Unschärferelation nicht mehr weit. Wir setzen die quantenmechanische Beziehung $E = hf$ in die völlig klassische Ungenauigkeitsbeziehung $\Delta f = 1/\Delta t$ ein, indem wir beide Seiten mit h multiplizieren. Wir erhalten $\Delta E \Delta t = h$, die heisenbergsche Energie-Zeit-Beziehung: Das Produkt aus einer Energieungenauigkeit und der Dauer eines dazu

Wechselwirkung	Teilchen	Ruhemasse	Ruheenergie	Reichweite
Gravitation	Graviton	0	0	unendlich
elektromagnetisch	Photon	0	0	unendlich
starke	Gluonen	$1,5 \cdot 10^{-27}$ kg	1 GeV	1 fm = 10^{-15} m
schwache	W^+ , W^- , Z^0	$1,5 \cdot 10^{-25}$ kg	100 GeV	0,01 fm = 10^{-17} m

Je größer die Masse des Teilchens, das eine Fundamentalkraft vermittelt, desto geringer ist deren Reichweite.

gehörenden Vorgangs (zum Beispiel Anregung eines Atoms durch einen Quantensprung) oder der Dauer der Messung dieser Energie ist von der Größenordnung h . Meistens schreibt man diese Formel mit einem kleineren Wert als h und setzt ein Größerzeichen statt des Gleichheitszeichens: Eine Messung kann zwar noch aus anderen Gründen ungenau sein, aber niemals genauer.

Alphazerfall

Viele Atomkerne sind alpha-instabil, das heißt, aus ihnen entweichen Heliumatomkerne (»Alphateilchen«), wenn man nur hinreichend lange wartet. Je nach Art des Kerns beträgt die Halbwertszeit Mikrosekunden bis Jahrtausende. Wie kann man sich das vorstellen? Zwei Protonen und zwei Neutronen formieren schon einmal den zukünftigen Heliumkern und rennen pausenlos von innen gegen die Oberfläche des Kerns, in dem sie bisher wohnen. Diese Oberfläche wirkt auf sie wie ein Wall, für dessen Überwindung sie mehrere Megaelektronvolt (MeV) hochspringen müssten. (Ein MeV ist die Energie, die ein Elektron beim Durchlaufen einer Spannung von einer Million Volt aufnimmt beziehungsweise abgibt.)

Da die Heliumkerne diese Energie aber nicht haben, bleiben sie lange Zeit eingesperrt. Wie sie sich doch aus dem Kern befreien können, hat George Gamow (1904–1968) mit einem griffigen Bild beschrieben: Die Heliumkerne laufen in einem Tunnel durch den Wall. Daher die Bezeichnung Tunneleffekt für das Überwinden einer Barriere, die eigentlich zu hoch ist.

In einer Hinsicht ist das Bild vom Tunnel durchaus treffend: Es ist umso schwieriger, durch den Berg zu kommen, je breiter dieser ist. Andererseits ist es irreführend, denn für die ausbrechenden Heliumkerne kommt es im Gegensatz

zum echten Tunnel entscheidend darauf an, wie hoch der Berg ist!

Besser passt da eine andere Analogie, die ich von meinem Kollegen Franz Bader aus Ludwigsburg (dem Mitverfasser des Standardphysikschulbuchs »Dorn-Bader«) gehört habe: der Heisenberg-Kredit. Unsere Ausbrecher müssen sich Energie ausleihen, um von innen über den Atomkernwall zu springen. Die heisenbergsche Energie-Zeit-Beziehung setzt eine Obergrenze für das Produkt aus geliehener Energiemenge und Leihfrist. Wenn der Wall niedrig ist, brauchen die Alphateilchen nur wenig Energie, um dem Atomkern zu entkommen; dann wird die Leihfrist zum Springen reichen. Solche Atomkerne zerfallen schnell, haben also eine kurze Halbwertszeit. Ist der Wall dagegen hoch, ist die Zeit zu kurz zum »Tunneln«: Die Heliumkerne bleiben mit höherer Wahrscheinlichkeit im Kern gefangen, und es dauert länger, bis solche Atome zerfallen.

Die Alphateilchen, die aus dem Atomkern herauskommen, haben noch etwas Energie übrig, und zwar zwischen vier und neun MeV. Dabei kommen die mit niedriger Energie aus Kernen mit langer Halbwertszeit und umgekehrt. Wer hinter einem hohen Wall saß, musste sich halt sehr viel Energie ausleihen und nach dem Sprung wieder zurückzahlen; da bleibt fürs Davonlaufen nur noch ein kleiner Rest übrig.

Was hält die Welt zusammen?

Nach heutiger Auffassung werden die vier fundamentalen Kräfte von bestimmten Teilchen vermittelt (Tabelle oben). Wenn sich zwei Teilchen abstoßen, kann man sich das so vorstellen wie zwei Tennisspieler, die einzeln auf reibungsarmen Fahrzeugen stehen und sich gegenseitig einen Tennisball zuschlagen: Sie werden sich voneinander weg bewegen. Für die Anziehung von zwei Teil-

chen gibt es keine so anschauliche Analogie. Die starke Wechselwirkung, welche die Atomkerne zusammenhält, wird durch »Gluonen« vermittelt; in unserem Modell, das im Wesentlichen auf die Erklärung der Reichweiten abzielt, haben sie Ruhemassen der Größenordnung 10^{-27} kg, ein Gluon »wiegt« also ungefähr so viel wie ein ganzes Proton.

Die schwache Wechselwirkung wird durch drei Bosonen namens W^+ , W^- und Z^0 vermittelt. Diese haben Ruhemassen in der Größenordnung schwerer Atome, nämlich rund 80 beziehungsweise 90 Protonenmassen. Photonen und Gravitonen haben die Ruhemasse 0.

Heisenbergs Energie-Zeit-Beziehung liefert nun einen Zusammenhang zwischen den Reichweiten der Wechselwirkungen und den Ruhemassen der zugehörigen Teilchen beziehungsweise ihren Ruheenergien: Man kann ja dank Einsteins Formel $E=mc^2$ Masse direkt in Energie umrechnen. Ein Teilchen der Energie E kann per Heisenberg-Kredit sozusagen aus dem Nichts vorübergehend ins Leben gerufen werden, aber nur für die entsprechend kurze Zeit $\Delta t = h/\Delta E$. Der Weg, den das Teilchen in dieser Zeit zurücklegen kann, entspricht der Reichweite der Wechselwirkung. (In der Überschlagsrechnung rechnen wir dabei mit der Lichtgeschwindigkeit, auch wenn das Teilchen die wegen seiner Masse niemals annehmen kann.) Für Teilchen ohne Ruhemasse kann E beliebig klein sein, und folglich reichen die elektromagnetische und die Gravitationskraft unendlich weit. Die Energien der Kräfteilchen mit Ruhemasse (W^+ , W^- , Z^0 und die Gluonen) müssen aber mindestens ihren Ruheenergien entsprechen. Entsprechend kurz sind die Reichweiten. Die starke Kraft reicht nur von einem Nukleon zum anderen – genug, um Atomkerne zusammenzuhalten.

Bekannter als diese Energie-Zeit-Beziehung ist diejenige zwischen Orts- und Impulsunschärfe. Eine einfache Umrechnung macht aus der einen Beziehung die andere. Mehr dazu und einige Beispiele, insbesondere zu Farbstoffen, im nächsten Heft. <



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

Aufstieg und Fall der NANOBAKTERIEN

Bis vor Kurzem sahen viele Forscher Nanobakterien als die kleinsten bekannten Krankheitserreger an. Jetzt ist klar: Die winzigen Strukturen sind überhaupt keine Lebensformen. Dennoch spielen sie für unsere Gesundheit eine wichtige Rolle.

Von John D. Young und Jan Martel

In Kürze

► **Die Entdeckung vermeintlicher Minibakterien** sorgte für Aufregung, da sie auch in Meteoriten und Körpergewebe nachgewiesen und mit verschiedensten Erkrankungen in Zusammenhang gebracht wurden.

► Immer neue Behauptungen über die Eigenschaften der winzigen Teilchen eilten einer soliden wissenschaftlichen Überprüfung voraus. Die Autoren und andere Forscher wiesen jedoch schließlich nach, dass **die Partikel nicht leben**, sondern aus Mineralstoffen und organischen Molekülen entstehen.

► Die an der Bildung von Nanopartikeln mitwirkenden Vorgänge sind dennoch auch für unsere Gesundheit von Interesse, da sie **übermäßige Mineralablagerungen im Körper verhindern**. Daneben könnten sie Aufschluss geben, wie das Leben auf der Erde entstand.

Damit sei der Nachweis extraterrestrischen Lebens erbracht, erklärte der damalige US-Präsident Bill Clinton 1996 auf einer Pressekonferenz. Der Hintergrund: Ein Meteorit, der sich vor etwa 15 Millionen Jahren von der Marsoberfläche abgespalten hatte, schien fossile Überreste winziger Organismen – kleiner als alle bis dahin bekannten – zu enthalten. Manche Forscher spekulierten gar, es handle sich dabei um Zeugen der Entstehung des Lebens. Bald folgte die nächste Sensationsmeldung: Möglicherweise könnten diese rätselhaften Winzlinge immer noch unter uns weilen – in unseren Körpern, wo sie unter Umständen eine Reihe von Krankheiten verursachen.

Viele Experten reagierten höchst skeptisch auf diese Enthüllungen. Einiges deutete darauf hin, dass die Entdecker in ihrer Aufregung voreilige Schlüsse gezogen hatten, die einer soliden wissenschaftlichen Überprüfung nicht standhalten würden. Im Lauf der letzten zehn Jahre haben Forscher nun viel über diese winzigen Partikel und ihr Verhalten in Erfahrung gebracht. Wie sich zeigte, handelt es sich dabei keineswegs um exotische neue Krankheitserreger, ja nicht einmal um Lebensformen. Dennoch spielen sie eine wichtige Rolle für die menschliche Gesundheit – nur eben nicht jene, die man ihnen zunächst zugesprochen hatte.

Entdeckt hat die umstrittenen Strukturen Robert L. Folk von der University of Texas in Austin. Der amerikanische Geologe veröffentlichte 1993 eine Analyse von Gesteinsproben aus den heißen Quellen im italienischen Viterbo, in der er Objekte beschrieb, die er

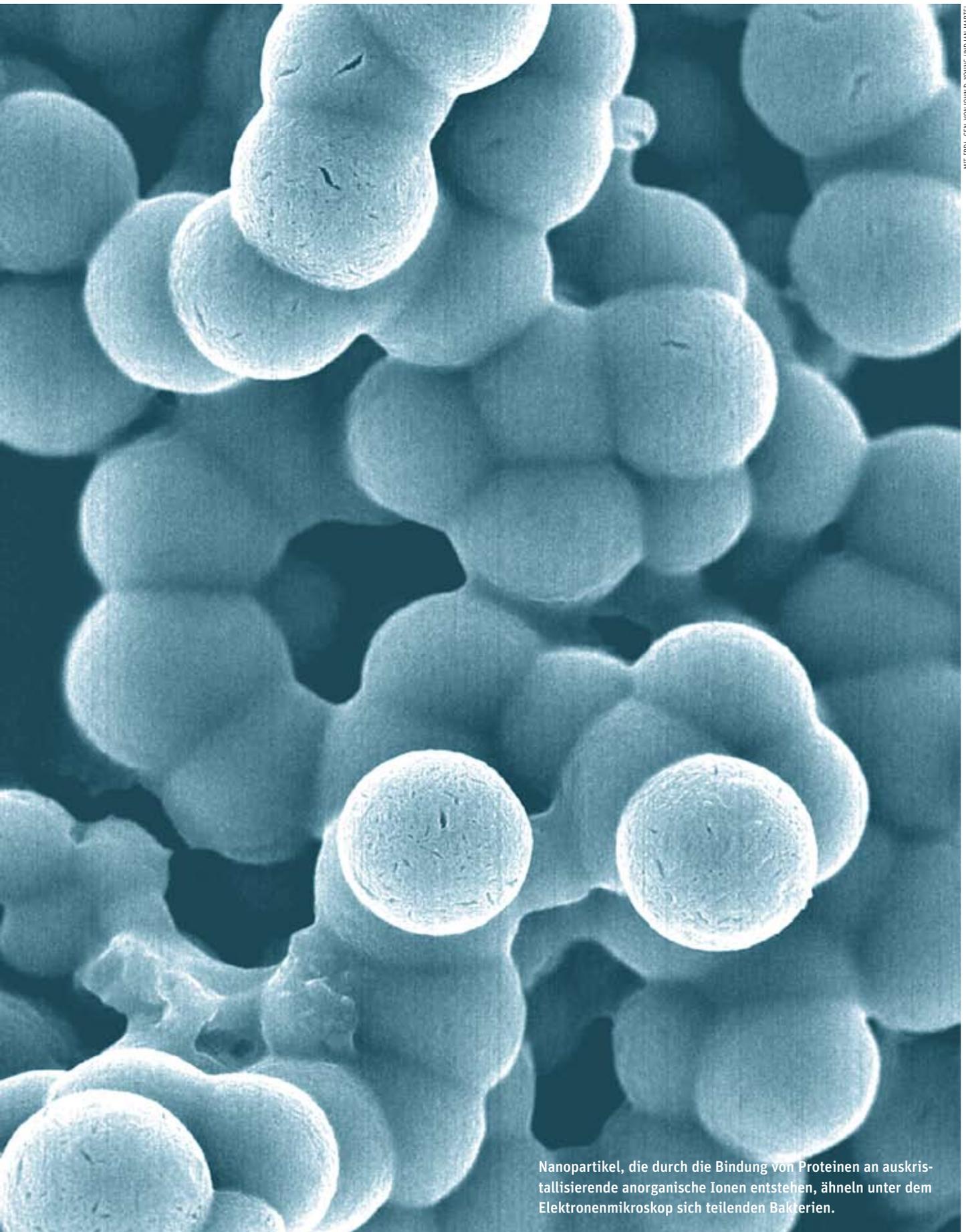
»nannobacteria« taufte – man beachte die Schreibweise. Bei der elektronenmikroskopischen Untersuchung seiner Proben waren Folk kleine Kugeln aufgefallen, die den versteinerten Überresten von Bakterien ähnelten. Wie diese schienen die Kügelchen Zellwände und fadenartige Auswüchse zu besitzen.

Die Strukturen waren allerdings ungeheuer winzig, erheblich kleiner als alle bisher bekannten Bakterien. Diese messen in der Regel mindestens rund einen Mikrometer (millionsstel Meter), etwa ein Hundertstel des Durchmesser eines menschlichen Haars. Die von Folk entdeckten Fossilien waren hingegen bis zu 100-mal kleiner, nämlich nur zwischen 10 und 200 Nanometer lang. Damit maßen sie sogar noch deutlich weniger als die kleinste bis dahin bekannte Lebensform *Mycoplasma*.

Uralte Gesteinsproben

Der Geologe hatte die mysteriösen Fossilien zumindest teilweise aus uralten Sedimentproben gewonnen, die aus Epochen stammen, in denen es nach landläufiger Meinung noch kein Leben auf der Erde gab. Daher vermutete er, dass die Organismen jene geologischen Schichten, in denen sie vorkamen, selbst aufgebaut haben könnten.

Folks Entdeckung fand zunächst wenig Beachtung, bis 1996 David S. McKay vom Lyndon B. Johnson Space Center der NASA Untersuchungsergebnisse veröffentlichte, denen zufolge der in der Antarktis gefundene Marsmeteorit ALH84001 ähnliche Nanofossilien zu enthalten schien. Dieser Meteorit entstand vermutlich vor etwa 4,5 Milliarden Jahren beim Erstarren flüssigen Gesteins; damit wäre er einer der ältesten bekannten Steinbrocken des Sonnensystems. McKay und seine Kollegen entdeckten in ihm nicht nur winzige Karbo-



MIT FROL. GEN. VON JOHN D. YOUNG UND JAN MARTEL

Nanopartikel, die durch die Bindung von Proteinen an auskristallisierende anorganische Ionen entstehen, ähneln unter dem Elektronenmikroskop sich teilenden Bakterien.

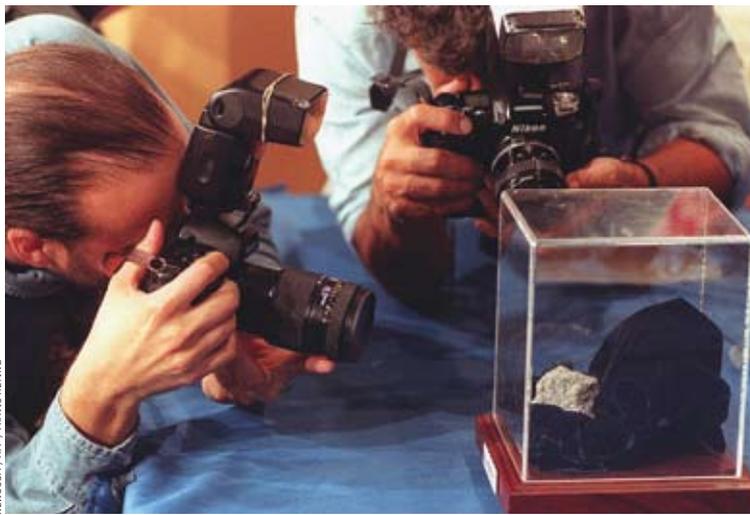


natkugeln, die stark an Folks »nannobacteria« erinnerten, sondern auch Magnetit (Eisenoxid)- und Eisensulfidpartikel sowie polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe: allesamt Substanzen, die an biologischen Prozessen beteiligt sind. Diese Befunde wurden anfänglich als bahnbrechende Indizien für die Möglichkeit früheren Lebens auf dem Mars und vielleicht auch an anderen Orten im Sonnensystem interpretiert.

Während die Medien den McKay-Bericht und nun auch die älteren Veröffentlichungen von Folk feierten, machten sich unter Wissen-

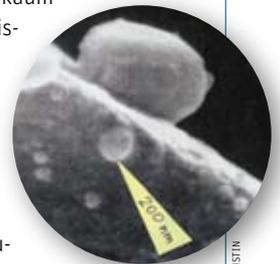
schaftlern Zweifel breit. Laut Kritikern sprach nur der äußere Augenschein dafür, dass es sich bei den Objekten um Überreste mikroskopischer Lebensformen handeln könnte. Nichts wies indes darauf hin, dass sie tatsächlich jemals lebendig gewesen waren. Darüber hinaus warfen die winzigen Fossilien die Frage auf, wie groß denn eine Zelle mindestens sein muss, um Lebensvorgänge aufrechterhalten zu können. Da eine DNA-Doppelhelix mehr als zwei Nanometer dick ist und die Ribosomen, die Proteinfabriken einer Zelle, gut 20 Nanometer messen, bezweifelten manche Forscher,

SENSATIONELLER FUND



Allan Hills 84001 (oben), ein in der Antarktis entdeckter Meteorit, weist karbonathaltige Kugeln und längliche Gebilde (links) im Nanometerbereich auf sowie Moleküle und Elemente, die als Rohmaterial für Lebensvorgänge dienen.

Strukturen, die Forscher für fossile Überreste von Bakterien im Nanometerbereich hielten, wurden erstmals 1993 beschrieben. Der Geologe Robert L. Folk identifizierte in Gesteinsproben aus Italien Kügelchen von 10 bis 200 Nanometer Größe (rechts). Sie erregten kaum Aufmerksamkeit, bis 1996 Wissenschaftler der NASA verkündeten, dass sie in einem Meteoriten, der vom Mars stammte (links), ähnliche Fossilien gefunden hätten. Dass in einem über vier Milliarden Jahre alten Stein Spuren außerirdischen Lebens entdeckt worden sein sollten, sorgte weltweit für Furore. Die potenzielle Bedeutung des Funds veranlasste den damaligen US-Präsidenten Bill Clinton zu der Aussage: »Heute spricht Stein 84001 zu uns, über all die Jahrtausende und Millionen von Meilen hinweg. Er spricht von der Möglichkeit des Lebens. Wenn sich diese Entdeckung erhärten sollte, ist das zweifellos einer der atemberaubendsten Einblicke in das Universum, den die Wissenschaft uns je gewährt hat.«



MIT FOLK, GEN. VON ROBERT L. FOLK, UNIVERSITY OF TEXAS, AUSTIN

Bakterium:
Staphylococcus aureus
(600 nm)

Die Existenz von Lebewesen im zweistelligen Nanometerbereich, die mehrere Gruppen in den 1990er Jahren glaubten nachgewiesen zu haben, erschien sehr unwahrscheinlich, ja sogar unmöglich. Fossile »nanobacteria« und Nanobakterien, die in Zellkulturen entdeckt worden waren, hatten Durchmesser von 10 bis 500 Nanometern (nm). Die meisten dieser Objekte waren so klein, dass man sich nicht vorstellen konnte, wie sie die für Leben nötige Maschinerie beherbergen sollten, wo doch bereits die für die Proteinherstellung zuständigen Ribosomen einen Durchmesser von gut 20 nm haben.



JEN CHRISTIANSEN

dass die Nanobakterien dieser Grundausstattung des Lebens überhaupt genug Platz bieten könnten.

Als die Kontroverse gerade ihren Höhepunkt erreicht hatte, entfachten E. Olavi Kajander und seine Kollegin Neva Çiftçioğlu von der Universität von Kuopio in Finnland eine noch weiter gehende Debatte: 1998 legten die beiden Forscher erste »Beweise« dafür vor, dass Nanobakterien lebende Organismen sind. Sie hatten in ihren Zellkulturen kleine »Verunreinigungen« entdeckt, die anscheinend nicht nur die kultivierten Zellen schädigten, sondern auch den üblichen Sterilisationstechniken wie Erhitzen oder Behandlung mit Detergenzien und Antibiotika widerstanden. Als Kajander und Çiftçioğlu die winzigen Objekte unter einem Elektronenmikroskop betrachteten, sahen sie Kugeln von 50 bis 500 Nanometer Durchmesser, die Folks »nannobacteria« wie ein Ei dem anderen ähnelten. Offenbar handelte es sich um ein und dasselbe Phänomen.

Eine nähere Untersuchung der kleinen Partikel brachte auch chemische Hinweise auf Leben an den Tag: Die beiden Forscher entdeckten in ihnen Nukleinsäuren und Proteine. Mit Hilfe der dort gefundenen DNA-Sequenzen ordneten sie ihre Entdeckung einer Bakterienuntergruppe zu, der unter anderem die Krankheitserreger *Brucella* und *Bartonella* angehören, und taufte sie *Nanobacterium sanguineum*.

Das Forscherteam beschrieb auch einige ungewöhnliche Eigenschaften der Nanobakterien, zum Beispiel die Fähigkeit, ihre Gestalt in Kultur zu verändern. Ein solcher so genannter Pleomorphismus kommt bei lebenden Organismen sehr selten vor. So schienen sich die kugelförmigen Nanobakterien allmählich in dünne Filme und Klumpen aus mineralisiertem Material zu verwandeln. Letzteres stellte sich als Hydroxylapatit heraus,

eine kristalline Verbindung aus Kalzium und Phosphat, der zum Beispiel in Säugetierknochen oder den Schalen verschiedener Wirbelloser vorkommt. Die kleinen, runden Nanobakterien verbargen sich laut den finnischen Forschern hinter »Mauern« aus Apatit oder gar in »igluartigen Burgen«.

Als Kajander und Çiftçioğlu versuchten, die Herkunft der Nanobakterien zu ergründen, erlebten sie eine Überraschung: Die rätselhaften Strukturen kamen in den meisten tierischen und menschlichen Körperflüssigkeiten wie Blut, Speichel und Urin vor, die sie untersuchten. Daher kamen die beiden Wissenschaftler zu dem Schluss, dass die Winzlinge Störungen verursachen können, die mit einem abnormen Mineralstoffhaushalt einhergehen, etwa Nierensteine.

Eine globale Gesundheitsbedrohung?

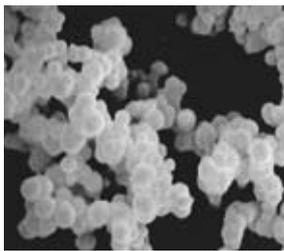
Später brachten verschiedene Forscher auch noch viele weitere Krankheiten mit Nanobakterien in Verbindung, darunter Krebs, Arteriosklerose sowie degenerative Erkrankungen wie Arthritis, Sklerodermie, multiple Sklerose, periphere Neuropathien, Alzheimerdemenz, ja sogar Virusinfektionen wie Aids. Den ersten Tests des finnischen Teams zufolge wiesen 14 Prozent der gesunden skandinavischen Erwachsenen Antikörper gegen Nanobakterien auf. Andere Wissenschaftler wie Andrei P. Sommer von der Universität Ulm vertraten später die Auffassung, dass Nanobakterien sich wie übertragbare Keime verhalten, und erklärten sie gar zu einer globalen Gesundheitsbedrohung.

Andererseits weckten ihre Einfachheit und ihre Allgegenwärtigkeit große Hoffnungen unter Forschern – etwa jene, mit ihrer Hilfe die Entstehung des Lebens im Universum aufzuklären. Auch stellten Nanobakterien möglicherweise einen gemeinsamen Faktor aller möglichen Krankheiten dar, da sie mit nahezu

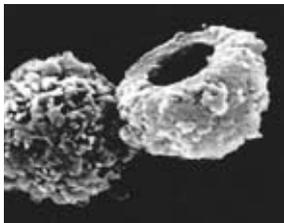
Die Geschichte der Nanobakterienforschung zeigt exemplarisch auf, wie Wissenschaft funktioniert – und wie sie in die Irre gehen kann

**LEBENDIG
ODER NICHT?**

Die finnischen Forscher E. Olavi Kajander und Neva Çiftçioglu behaupteten 1998, Bakterien im Nanometermaßstab entdeckt zu haben. Ihre Kalziumphosphathüllen würden mineralische Strukturen bilden, die auf die sich wandelnde Gestalt der sich teilenden Organismen zurückzuführen seien.



In den Versuchen des finnischen Teams vermehrten sich in Zellkulturgefäßen die mineralisierten Partikel langsam und wuchsen bis zu einer Größe von 20 bis 500 Nanometern heran.



Hohle Hydroxylapatitgebilde, die man in den Kulturen entdeckte, wurden als »Wohnstätten« interpretiert, welche die Nanobakterien aus Mineralstoffen aufbauten.

AUS: E. OLAVI KAJANDER UND NEVA ÇIFTÇIOĞLU: NANOBACTERIA: AN ALTERNATIVE MECHANISM FOR PATHOGENIC INTRA- AND EXTRACELLULAR CALCIFICATION AND STONE FORMATION, PNAS, BD. 95, NO. 14, 7. JULI 1998

jedem Erkrankungsprozess zusammenzuhängen schienen. Andere blieben skeptisch. So beharrte Jack Maniloff vom University of Rochester Medical Center darauf, die Gebilde seien schlicht zu klein, um lebendig zu sein, und bezeichnete sie als die »kalte Fusion der Mikrobiologie« – in Anspielung auf den Skandal um eine behauptete Kernfusion im Reagenzglas.

Im Jahr 2000 schlug John O. Cisar von den National Institutes of Health eine grundsätzlich andere Interpretation der mysteriösen Strukturen vor. Cisar hatte festgestellt, dass sich Phospholipide – einer der Hauptbestandteile von Zellmembranen – sowohl mit Kalzium- als auch mit Phosphationen verbinden und auf diesem Weg die Bildung von Kalziumphosphat-(Apatit-)kristallen fördern. Die so erzeugten kristallinen Bröckchen wiesen eine verblüffende Ähnlichkeit mit den Nanobakterien auf, die die finnische Arbeitsgruppe beschrieben hatte. Bemerkenswert war vor allem, wie diese Gebilde im Reagenzglas wuchsen und sich vermehrten, als wären sie lebendig. Auch für die Nukleinsäuresequenzen, die man für ein charakteristisches Kennzeichen der Nanobakterien gehalten hatte, boten Cisar und seine Mitarbeiter eine Erklärung an: Die Forscher wiesen nach, dass diese Molekülabschnitte in weit verbreiteten Bakterien vorkommen können, die häufig Laborgeräte und -gefäße verunreinigen.

Das Nanobakterien-Fieber klang damit zunächst ein wenig ab. Doch 2004 erfolgte der nächste Paukenschlag: Ein Team der US-amerikanischen Mayo-Klinik unter Virginia Miller und John C. Lieske behauptete, in »verkalkten« Blutgefäßen Nanopartikel nachgewiesen zu haben, die nicht nur DNA und Proteine enthielten, sondern auch RNA zu synthetisieren schienen – jene Mittlermoleküle, mit deren Hilfe Zellen DNA-Baupläne in Proteine übersetzen. Über Nacht flammte die Nanobakterien-Debatte wieder auf, und mit ihr die alten Konflikte sowie das Medieninteresse.

Nanobakterien galten nun als Bedrohung der Volksgesundheit und weckten damit auch kommerzielle Interessen. Mit Methoden zum Nachweis und zur Bekämpfung der winzigen Erreger würde sich viel Geld machen lassen. Die von den finnischen Nanobakterien-Entdeckern gegründete Firma Nanobac OY stieg zum Großlieferanten für diagnostische Reagenzien auf, darunter Antikörper, die Nanobakterien in menschlichem Gewebe aufspüren sollten.

Um den weit reichenden und widersprüchlichen Behauptungen über Nanobakterien auf den Grund zu gehen, begannen wir 2007, ihre chemischen und biologischen Eigenschaften

unter die Lupe zu nehmen. Denn bevor man sich über die Rolle streitet, die diese Partikel möglicherweise bei Erkrankungen spielen, wollten wir erst einmal klären, worum es sich dabei überhaupt handelt – insbesondere, ob sie lebendig sind oder nicht. Zu diesem Zweck setzten wir uns zum Ziel, Nanobakterien aus unbelebter Materie nachzubauen.

Wir verwendeten dazu einfache Kalziumverbindungen wie Kalziumkarbonat (Kalk) und -phosphat, die sich nach einem exakten Schema zu Kristallen zusammenlagern können. Kristalle sind hochgradig geordnete Gebilde mit ebenen Oberflächen und geraden Kanten. Wird ihr reguläres Wachstum jedoch gestört, ändern sie ihre Eigenschaften oft schlagartig. Wir vermuteten, dass Verunreinigen der mineralischen Lösungen mit Proteinen und anderen Stoffen eine normale Kristallisation verhindern und zu amorphen Aggregaten führen könnte. Die Moleküle würden sich dann eher zufällig und ungeordnet aneinanderlagern.

**Des Rätsels Lösung:
klebrige Kalziumminerale**

Zunächst erwarteten wir, eine solche Störung würde das weitere Wachstum von Mineralkristallen schlicht beenden. Zu unserer Überraschung wuchsen und vermehrten sich die Agglomerate aber in Form von Nanopartikeln weiter. Wir hatten nicht damit gerechnet, dass bereits so einfache Verbindungen ohne Weiteres Gestalten und Geometrien bilden würden, die den »Zellwänden« und »Zellteilungen« der Nanobakterien zum Verwechseln ähnelten. Sie waren der Ausgangspunkt unserer folgenden Bemühungen, die gesamte Biologie der Nanobakterien nachzubilden. Wir wollten herausfinden, ob sich all die exotischen Eigenschaften der Nanobakterien, die in der Fachliteratur beschrieben waren, durch Zusammenwirken einfacher organischer Moleküle und Mineralstoffe reproduzieren ließen.

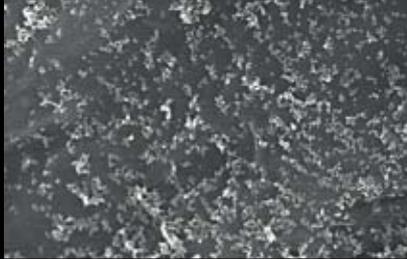
Bald stellte sich heraus, dass Nanopartikel aus einer Mischung von Kalziumkarbonat und Kalziumphosphat ziemlich klebrig sind. Sie haften sehr leicht an allen möglichen elektrisch geladenen Molekülen, seien es nun Ionen, Kohlenhydrate, Lipide oder auch DNA und andere Nukleinsäuren. Diese Bindung stabilisiert die Struktur der Partikel und fördert ihr weiteres Wachstum. Am Ende tritt immer eines von zwei Szenarien ein: Wenn die Mineralstoffe im Überschuss vorliegen, kristallisieren die Partikel zu Apatit aus. Sind jedoch mehr organische Verbindungen als anorganische Ionen verfügbar, stoppt die Kristallisation oder setzt sich zumindest nur sehr langsam fort, wobei die Strukturen zunehmend komplizierter werden.

NANOBAKTERIEN SELBST GEMACHT

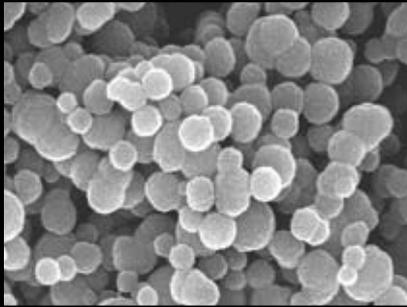
Laut den Experimenten der Autoren können Wechselwirkungen zwischen Mineralstoffen, Proteinen und anderen Verbindungen, die sich in Zellkulturmedien finden, Partikel mit dem Aussehen und Verhalten der vermeintlichen Nanobakterien hervorbringen (siehe die Mikroskopaufnahmen). Proteine greifen in die normale Kristallisation anorganischer Ionen ein und führen zu mineralischen Anhäufungen, die wie Lebewesen wachsen und ihre Form ändern.

1 Petrischalen für Zellkulturen enthalten Nährmedien wie fötales Kälberserum mit Proteinen und anderen organischen Molekülen. Meist fügten die Autoren anorganische Ionen wie Kalzium und Phosphat hinzu, um die Partikelbildung zu beschleunigen. Doch letztlich führen die im Kulturmedium enthaltenen Mineralstoffe zum gleichen Ergebnis.

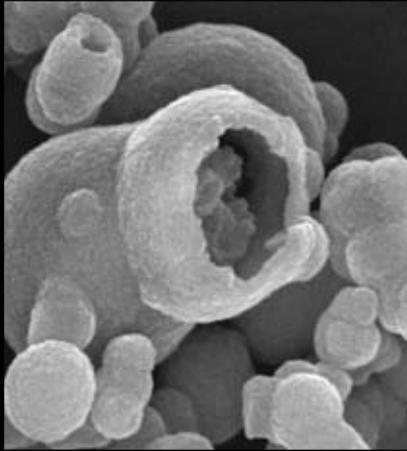
► Bereits wenige Stunden nach der Zugabe von Ionen zum Zellkulturmedium zeigt das Elektronenmikroskop Nanopartikel von 20 bis 50 Nanometer Durchmesser.



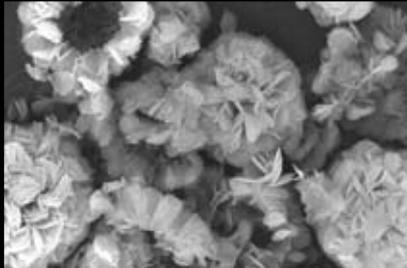
► Die rechts abgebildeten Partikel mit einer Größe von 100 bis 500 Nanometern gleichen auf Grund ihrer einheitlichen Form und Größe lebenden Zellen.



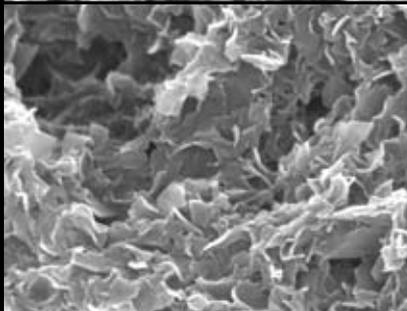
► Haben die Partikel Durchmesser von mehreren hundert Nanometern erreicht, sind sie oft zu seltsamen Formen verschmolzen, die manchmal an sich teilende Zellen erinnern.



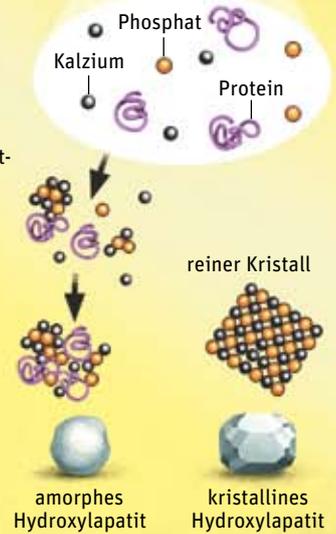
► Bei diesen Partikeln mit Durchmessern von 600 Nanometern entstehen durch Kristallisation scharfkantige mineralische »Blütenblätter«.



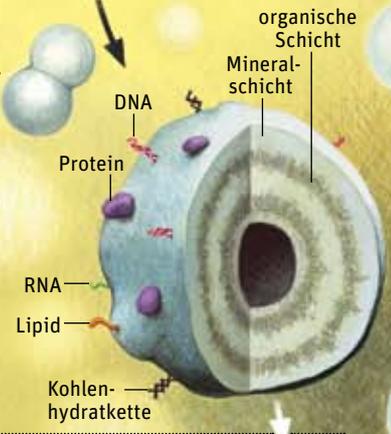
► Schließlich backen die mineralisierten Partikel zu festen Matten zusammen, die am Ende den gesamten Boden des Kulturgefäßes überziehen.



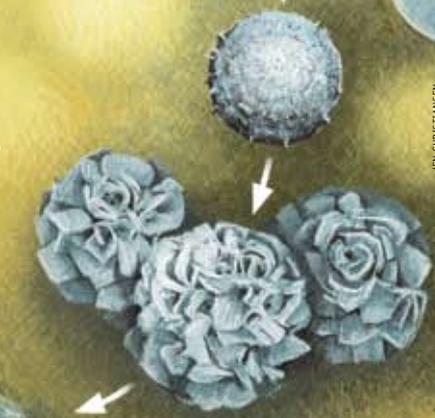
2 Kalzium- und Phosphationen lagern sich normalerweise zu größeren Kalziumphosphat- (Hydroxylapatit-)kristallen zusammen. Bestimmte Proteine binden jedoch Kalziumionen und stören die Kristallbildung. Statt eines regelmäßigen Hydroxylapatitkristallgitters (ganz rechts) entstehen Mineral-Protein-Komplexe mit amorpher Molekülstruktur und Gestalt.



3 Die Partikel wachsen durch Ablagerung weiterer Mineral-Protein-Schichten und können dabei zu größeren Gebilden unterschiedlicher Form verschmelzen. Neben Mineralstoffen und Proteinen werden auch alle möglichen anderen Moleküle aus dem Kulturmedium eingebaut. Dieses organische Material verleiht den wachsenden Partikeln Stabilität.



4 Sind die Proteine aus dem Medium verbraucht, gewinnt die Kristallisation die Oberhand. An der Oberfläche der Partikel entstehen haarartige Kristallnadeln, die dann zu größeren Spindeln oder fächerartigen Blättern verschmelzen. Mit fortgesetzter Kristallisation verbucken die Partikel schließlich zu zerklüfteten Mineralkrusten.



OBERE: OBERAUFNAHMEN MIT FOLIO. GEN. VON JOHN D. YOUNG UND JAN MARTEL

BEDE: AUFNAHMEN AUS: JOHN D. YOUNG ET AL., »PUTATIVE NANOBACTERIA REPRESENT PHYSIOLOGICAL REMAINS AND NOT LIFE«, JOURNAL OF CELLULAR PHYSIOLOGY, 183, 103-110, 2000. UNTER: CALCIUM HYDROXYAPATIT, PLOS ONE, BDL 4, NR. 2, 9. FEBR. 2009

JEN CHRISTIANSEN

Unter den von uns untersuchten geladenen Bindungsgruppen riefen die Proteine die interessantesten und vielschichtigsten Effekte hervor. Freie Proteine finden sich überall im Körper. Einige davon wie Serumalbumin oder Fetuin-A kommen in großen Mengen im Blut vor und besitzen eine hohe Affinität zu Kalziumionen. Allein Albumin bindet bereits rund die Hälfte dieses Mineralstoffs im Blutserum.

Fetuin-A ist noch ungewöhnlicher: Es haftet nicht nur an freien Kalziumionen, sondern auch besonders stark an gerade entstehendem Apatit, was eine weitere Kristallisation verhindert und so das Gewebe vor einer übermäßigen Mineralbildung bewahrt. Dieser Schutz ist äußerst wichtig, da alle Körperflüssigkeiten einschließlich Blut mit Kalzium- und Phosphationen übersättigt sind, welche ohne die Proteine spontan auskristallisierten. Dadurch

würden die Blutgefäßwände verhärten, und überall entstünde Knochengewebe.

Parallel zu unseren Untersuchungen beschäftigten sich auch Forscher um Didier Raoult von der Universität Aix-Marseille 2 in Frankreich mit der Zusammensetzung der Nanobakterien. Sie kamen zu dem Schluss, dass Fetuin-A das Hauptprotein der winzigen Strukturen bildet. Laut unseren eigenen, neueren Experimenten werden zusätzlich auch Albumin, Apolipoproteine, Bestandteile des Komplementsystems und andere Proteine in kalziumhaltige Nanoteilchen eingelagert. Im Grunde scheinen wachsende Nanopartikel so ziemlich jedes leicht verfügbare Protein aus ihrer Umgebung einzubauen, das im Stande ist, Kalziumionen und Apatit zu binden.

Wir fanden zudem heraus, dass sich die Antikörper, die Nanobac zum Nachweis von Nanobakterien vertrieb, in Wirklichkeit an Fetuin-A und Albumin banden. Jene Studien, die mit Hilfe der Nanobac-Antikörper angeblich Nanobakterien in menschlichen Gewebekulturen entdeckt hatten, hatten also nur gewöhnliche Blutproteine aufgespürt. Noch überraschender war zunächst allerdings die Beobachtung, dass sich die Antikörper spezifisch an die in Rindern vorkommenden Versionen der Proteine hefteten. Die simple Erklärung: Die in Labors verwendeten Zellkulturmedien enthalten als Nährstoffquelle Blutserum aus Kälberföten. Im Fall der Nanobakterien-Kulturen stellte das Serum auch jene Proteine zur Verfügung, die in die Partikel eingebaut wurden. Damit beinhalteten rückblickend wohl all die Studien, in denen mit Hilfe von Antikörpern angeblich Nanobakterien-Proteine nachgewiesen wurden, einen grundlegenden Fehler.

Mittlerweile dürfte also klar sein, dass Nanobakterien tatsächlich leblose Partikel aus gewöhnlichen Mineralstoffen und anderen Substanzen aus ihrer Umgebung darstellen. Die Vorstellung von den winzig kleinen, quasi universellen Krankheitserregern lässt sich demnach getrost ins Reich der Mythen und Legenden verweisen. Dennoch könnten diese Gebilde durchaus die menschliche Gesundheit beeinflussen. Denn die vermeintlichen Nanobakterien scheinen im Rahmen eines biologischen Prozesses zu entstehen, der den Körper normalerweise vor einem schädlichen Auskristallisieren von Mineralen bewahrt.

Viele Mineralstoffe lagern sich in der Natur spontan zusammen oder neigen sogar zur Kristallbildung. Kalzium verbindet sich zum Beispiel gern mit Karbonaten und Phosphaten und kristallisiert dann als Mineral aus: als Kalzit oder Apatit (zwei Modifikationen von Kalziumkarbonat). Jedes Molekül, das sich leicht

MINERALSTOFFHAUSHALT

Ansammlungen von nanobakterienähnlichen Partikeln können Kalkablagerungen in menschlichem Gewebe ähneln, weil beide durch jene natürlichen Wechselwirkungen zwischen Mineralstoffen und Proteinen entstehen, die für die Mineralisierung unserer Zähne und Knochen sorgen und schädliche Ablagerungen verhindern. Eine Gewebeverkalkung ist zunächst oft Symptom einer anderen Krankheit, kann jedoch bei weiterem Fortschreiten Krankheiten wie Nierensteine verursachen.



PHOTO RESEARCHERS / MEDICAL BODY SCANS

NORMALE MINERALISIERUNG

Bei der Knochenbildung verschmelzen Hydroxylapatitkugeln von zehn Nanometer Durchmesser zu Ketten von Mineralperlen, die in Kollagenfasern eingeflochten sind. Diese Apatitbausteine wachsen immer weiter zusammen und bilden mineralisierte Schichten, die das Kollagengerüst umhüllen und dem Knochen die nötige Zugfestigkeit verleihen.

HARTES HERZ

Kalziumreiche Ablagerungen (weiß) im Herzen und in den Arterien entstehen durch denselben Mineralisierungsmechanismus wie die Knochen und deuten auf eine Gefäßerkrankung hin. Sie gelten als Reaktion des Gewebes auf Verletzungen und lassen sich verhindern, indem die verursachende Erkrankung behandelt wird.

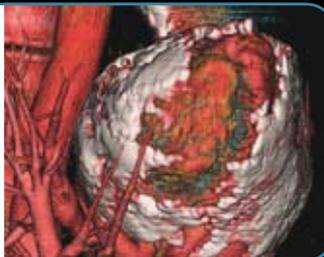
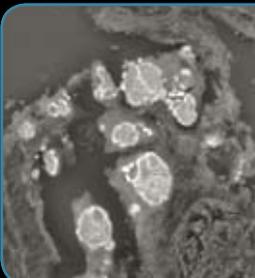


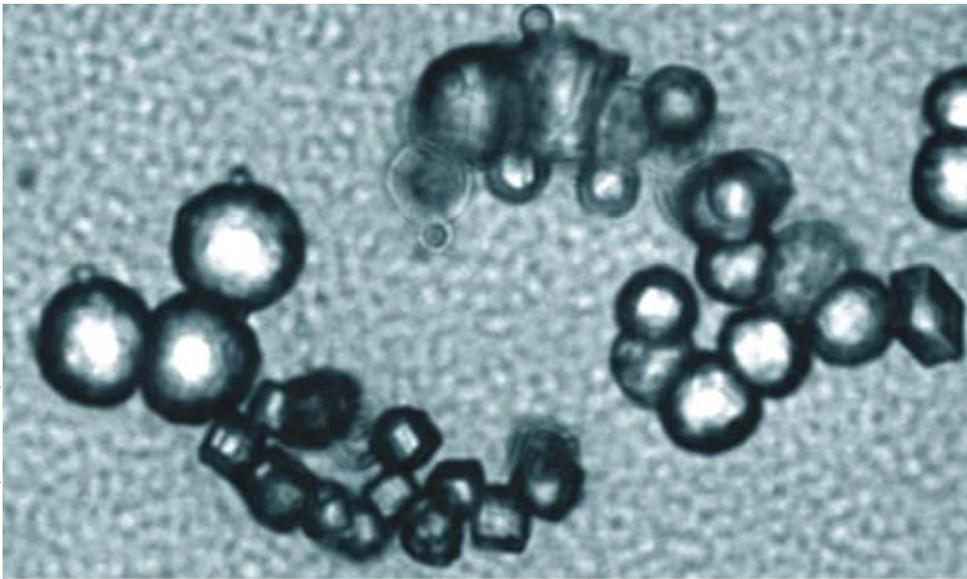
PHOTO RESEARCHERS / OLIVIER VOISIN



URSACHE ODER FOLGE?

Winzige Kalziummineralablagerungen werden auch in anderen Körperteilen beobachtet, hier etwa in gesundem Schilddrüsengewebe eines Krebspatienten. Die Kalziumphosphatgebilde können auf ein Versagen der normalen Mineralstoffentsorgung im erkrankten Gewebe hinweisen. Möglicherweise wirken auch Fremdkörper wie beispielsweise Schadstoffe als Kristallisationskeime. Diese Hypothese muss aber noch überprüft werden.

MIT FRDL. GEN. VON ANTONIETTA M. GATTI, UNIVERSITÀ DI MODENA E REGGIO EMILIA, UND STEFANO MONTANARI, NANODIAGNOSTICS SRL



MIT FRIEDL. GEM. VON JOHN D. YOUNG UND JAN MARTEL

an Kalziumionen oder entstehende Apatitkristalle anlagert, hemmt dadurch den Kristallisationsvorgang – gleichgültig, ob Protein, Lipid oder eine andere elektrisch geladene Verbindung. Im Körper markieren die bindenden Proteine zugleich die Mineralkomplexe, damit diese unschädlich gemacht werden.

Bitte nicht kristallisieren!

Das fortlaufende Beseitigen von Mineralstoffen verhindert übermäßige Ablagerungen von Kalziumverbindungen, die Krankheiten verursachen können. Dazu ist allerdings ein ständiger Nachschub an Proteinen nötig. Sollten mehr Mineralstoffe vorliegen, als die kristallisationshemmenden Proteine binden können, versagt der Schutzmechanismus. Haben die Mineralstoffe alle Bindungsstellen der Proteine besetzt, können diese Komplexe selbst zu Kristallisationskeimen werden und so einen unkontrollierten Prozess auslösen, der unter Umständen nicht nur zu den als Nanobakterien bekannt gewordenen Gebilden führt, sondern auch zu abnormen Ablagerungen, zum Beispiel in Form von Steinen oder »verkalkten Adern«.

Die hier beschriebenen Mechanismen der Mineral-Protein-Komplexbildung sind sicherlich auch an der normalen Knochenbildung beteiligt. Daher könnten die kalziumhaltigen Ablagerungen weniger die direkte Ursache der Beschwerden darstellen als vielmehr die Folge anderer Stoffwechselstörungen, die eine ordnungsgemäße Kristallisationshemmung beziehungsweise Mineralstoffentsorgung beeinträchtigen.

Unser Konzept dürfte sämtliche Phänomene erklären, die man bisher mit Nanobakterien in Verbindung gebracht hat, so auch den Pleomorphismus. Demnach wachsen die

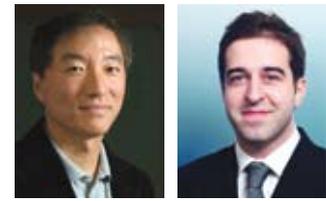
Mineral-Protein-Kugeln durch Verschmelzen und fließen so zu Spindeln und schließlich zu Filmen zusammen. Ein derartiger Gestaltwandel lässt sich mit der Wechselwirkung von Proteinen und Mineralstoffen erklären, bei der die Mineralisation schließlich die Oberhand gewinnt.

In Kulturgefäßen wiederum treten die Partikel auf, weil hier die Entsorgungsmechanismen des Körpers fehlen. Die »Nanobakterien« in Zellkulturen sind damit schlicht Nebenprodukte eines normalen Kalziumstoffwechsels unter diesen Bedingungen.

Alle bakterienähnlichen Nanopartikel, die wir aus Blut und anderen Körperflüssigkeiten isolierten, weisen eine einfache und vorher-sagbare chemische Zusammensetzung auf, die das Angebot an Bausteinen vor Ort widerspiegelt. Indem wir die Bestandteile des Mediums anpassen, können wir den Zustand der Teilchen beeinflussen und sogar Partikel mit einer bestimmten Zusammensetzung gezielt maßschneidern. Auf diese Weise erzeugten wir eine ganze Familie von strukturell ähnlichen Molekülkomplexen, die wir »Bionen« taufte. Bionen gibt es in allen Größen und Formen, und sie können Lebensformen erstaunlich äh-neln. Sie versprechen uns weitere Einblicke darüber, wie sich Nanobausteine in der Natur zu größeren Einheiten zusammenfügen.

Die weitere Erforschung solcher Partikel könnte auch das Entstehen des Lebens auf der Erde vor Milliarden von Jahren erhellen. Möglicherweise formten damals Komplexe aus Mineralstoffen und kleinen organischen Molekülen mittels Vermehrung wie beim Nanopartikel-Wachstum die ersten Bausteine des Lebens – die dann einen Weg fanden, sich selbst zu erhalten. ◀

Reine Kalziumkarbonatkristalle können unterschiedliche Formen annehmen. Je besser die Wissenschaftler begreifen, wie natürliche Nanopartikel entstehen und sich auf die menschliche Gesundheit auswirken, desto besser können riskante Eigenschaften künstlicher Nanopartikel bei deren Entwicklung vermieden werden.



John D. Young steht der Chang Gung University (CGU) sowie der Mingchi University of Technology in Taiwan vor und leitet das CGU-Labor für Nanomaterialien. Er interessiert sich vor allem für die Wechselwirkungen zwischen organischen und anorganischen Stoffen und wie sich diese auf die Gesundheit auswirken. Young war Leiter des Labors für molekulare Immunologie und Zellbiologie an der Rockefeller University, der er als Lehrbeauftragter verbunden bleibt.

Jan Martel ist Doktorand am Graduate Institute of Biomedical Sciences an der CGU. Er hat sich Youngs Gruppe in Taiwan angeschlossen, um Krankheitserreger im Blut und mögliche Grundlagen für alternative Therapien zu erforschen.

Folk, R. L.: SEM Imaging of Bacteria and Nanobacteria in Carbonate Sediments and Rocks. In: Journal of Sedimentary Petrology 63, S. 990–999, 1993.

Martel, J., Young, J. D.: Purported Nanobacteria in Human Blood as Calcium Carbonate Nanoparticles. In: Proceedings of the National Academy of Sciences USA 105(14), S. 5549–5554, 2008.

Young, J. D. et al.: Characterization of Granulations of Calcium and Apatite in Serum as Pleomorphic Mineral-Protein Complexes and as Precursors of Putative Nanobacteria. In: PLoS ONE 4(5), S. e5421, 2009.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/1044183.

Medikamente aus DNA

Eine neue Generation von Impfstoffen und Medikamenten wird derzeit in klinischen Studien getestet. Sie verspricht Heilung bei vielen schwer behandelbaren Erkrankungen wie Aids oder Influenza. Der Trick: Maßgeschneiderte DNA-Moleküle, so genannte Plasmide, werden direkt in Körperzellen eingebracht.

Von Mathew P. Morrow und David B. Weiner

In Kürze

- ▶ Impfstoffe und Medikamente **auf Basis ringförmiger DNA-Moleküle** (Plasmide) gelten schon lange als viel versprechender Ansatz zur Vorbeugung und Behandlung bedrohlicher Erkrankungen. Doch in ersten klinischen Studien zeigten die Plasmide kaum Wirkung.
- ▶ Im Lauf der letzten zehn Jahre optimierten Forscher die verwendeten DNA-Sequenzen und verbesserten die Verabreichungsmethoden. Diese und weitere Maßnahmen erhöhten die **Wirksamkeit der Plasmide** enorm.
- ▶ Inzwischen kommen Plasmidimpfstoffe und andere DNA-Medikamente in der Tiermedizin bereits routinemäßig zum Einsatz. Es laufen **mehrere klinische Studien beim Menschen**, von denen einige kurz vor dem Abschluss stehen.

Vor rund zehn Jahren verglichen Wissenschaftler der US-amerikanischen National Institutes of Health in einer Studie zwei viel versprechende Typen neuer Impfstoffe. Sie wollten herausfinden, welcher davon besser gegen die unbehandelt meist zum Tod führende Infektion mit dem Aidserreger HIV schützt. Einer der beiden Impfstoffe bestand aus Plasmiden – ringförmigen DNA-Molekülen –, die jeweils ein Gen für eines von fünf HIV-Proteinen enthielten. Er sollte die Zellen der geimpften Personen dazu bringen, Virusproteine herzustellen. Diese würden, so war die Hoffnung, Immunreaktionen hervorrufen, die vor einer Infektion schützen. Beim zweiten Impfstoff handelte es sich um Adenoviren, in deren Erbgut ein einzelnes HIV-Gen eingepflanzt wurde. Das – ungefährlichere – Adenovirus sollte die Aufmerksamkeit des Immunsystems wecken und auf das HIV-Protein richten.

Einer von uns (Weiner) hatte zu diesem Zeitpunkt schon acht Jahre lang Impfstoffe aus Plasmiden entwickelt und setzte große Hoffnung auf diese Studie. Sie sollte endlich den Beweis erbringen, dass die DNA-Ringe gegen gefürchtete Krankheitserreger immunisieren können. Doch die Ergebnisse erwiesen sich als herber Rückschlag: Die damit Behandelten reagierten nur wenig bis gar nicht auf die fünf HIV-Proteine. Die mit dem Adeno-

virus geimpften Probanden zeigten hingegen eine kräftige Immunantwort. Forschern an Universitäten und Pharmaunternehmen erschienen daher die Adenoviren als die grundsätzlich besseren Kandidaten für die weitere Entwicklung eines HIV-Impfstoffs.

Allzu sehr überraschten diese Ergebnisse nun allerdings auch nicht, da Plasmidimpfstoffe bereits in früheren Studien nur schwache Immunreaktionen hervorgerufen hatten. Dennoch waren einige Forscher weiterhin von ihrem Potenzial überzeugt, denn zumindest theoretisch sollte dieser Typ von Vakzinen sowohl sehr sicher als auch hochwirksam sein. In langjähriger Arbeit bemühten sie sich, die Effizienz solcher Pharmaka zu steigern. Mit Erfolg – eine neue Generation von Plasmiden beweist derzeit in zahlreichen Studien bei Menschen und Tieren, dass DNA-Impfstoffe die gewünschten Immunreaktionen erzielen können, und das bei gleichzeitiger guter Verträglichkeit. Zudem lässt sich die Technik auch auf andere Formen von Immuntherapie übertragen sowie für die direkte Verabreichung von Medikamenten nutzen.

Die Idee, mit DNA zu impfen, reifte um 1990. Das Prinzip ist simpel: Geimpft wird mit Plasmiden, die Gene für ein oder mehrere Proteine eines Krankheitserregers enthalten, nicht aber dessen gesamte genetische Information, so dass keine vermehrungsfähigen Erreger entstehen können.

Gelangt ein Plasmid in eine Zelle des Geimpften, liest die DNA-Dekodierungsmaschinerie das Gen ab und stellt das entspre-



Table 31.

functions

(1)

(2)

(3)

Nach Jahren voller Fehlversuche und Enttäuschungen stehen nun Impfstoffe und Medikamente auf DNA-Basis vor dem Durchbruch.

STUART BRADSHAW

chende Protein her, das daraufhin die Zelle verlässt (siehe Kasten unten). Das Immunsystem betrachtet das Erregerprotein als Fremdkörper, worauf es eine Infektion vermutet und verschiedene langfristig wirkende Maßnahmen gegen das Virusprotein in Gang setzt. Auf diese Weise hoffen Forscher, eine dauerhafte Immunität gegen Infektionen mit dem entsprechenden Erreger zu erreichen.

Neben der Sicherheit und Einfachheit bieten DNA-Impfstoffe viele Vorteile. So lassen sie sich wesentlich schneller herstellen als etwa konventionelle Impfstoffe gegen die saisonale Grippe, für den man mindestens vier bis sechs Monate lang infektiöse Viren kultivieren muss. Außerdem ist DNA bei Raumtemperatur chemisch stabil, so dass solche Vakzinen im Un-

terschied zu vielen anderen nicht gekühlt gelagert und transportiert werden müssen.

Schließlich und für Impfstoffentwickler besonders wichtig: Das Immunsystem betrachtet die Plasmide nicht als Fremdmaterial, da sie aus ganz normaler DNA bestehen. Die Vakzinen selbst rufen also keine Immunreaktion hervor; nur das auf dem Plasmid kodierte Protein zieht nach seiner Herstellung die Aufmerksamkeit der Immunpolizei auf sich. Daher können Ärzte ein und denselben Patienten immer wieder mit verschiedenen Plasmiden impfen, ohne die Gefahr, dass sein Körper diese angreift.

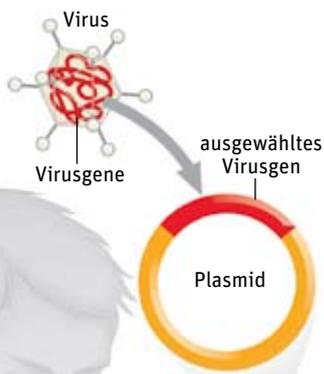
Problem: schwache Immunreaktion

Ein zentrales Problem der ersten Tests von DNA-Impfstoffen war – wie anfangs beschrieben – die nur schwach ausgeprägte Immunreaktion. Das hatte hauptsächlich zwei Gründe: Erstens gelangte die verabreichte DNA nicht in genügend Körperzellen, und zweitens produzierten jene Zellen, die Plasmide aufnahmen, zu wenig der darauf kodierten Proteine. Insgesamt wurde das Immunsystem daher nicht ausreichend stimuliert.

Das Konkurrenzverfahren sah sich jedoch letztlich mit einem noch größeren Problem konfrontiert. Im Jahr 2007 begann das Pharmaunternehmen Merck eine große Studie mit einem HIV-Impfstoff, in dem der Adenovirus AdHu5 als Vehikel für einige der Virusgene diente. Angesichts der starken Immunreaktionen in vorangegangenen Experimenten mit Adenoviren wurden die Ergebnisse dieser Studie mit Spannung erwartet. Insgesamt erhielten rund 3000 HIV-negative Personen entweder den echten Impfstoff oder – zur Kontrolle – ein Placebo.

In Lauf der Zeit kam eine irritierende Diskrepanz zwischen den beiden Gruppen zum Vorschein: Geimpfte Probanden schienen nicht besser vor einer HIV-Infektion geschützt zu sein als die Teilnehmer der Placebogruppe – im Gegenteil, sie waren offenbar sogar stärker gefährdet. Eine erste Auswertung ergab, dass 49 von 914 geimpften männlichen Teilnehmern und 33 von 922 Männern der Placebogruppe sich bis dahin mit HIV angesteckt hatten. Daher wurde die Studie im Sommer 2009 vorzeitig beendet. Die Analyse der Studiendaten deutet darauf hin, dass das Problem bei den als Genvehikel eingesetzten Adenoviren liegt. Bei Personen mit bereits bestehender Immunität gegen AdHu5, einen Erkältungsvirus, hatte das Immunsystem offenbar den Impfstoff angegriffen und neutralisiert. Deshalb manche Geimpfte sogar leichter infizierbar schienen als die Teilnehmer der Placebogruppe, ist allerdings noch unklar.

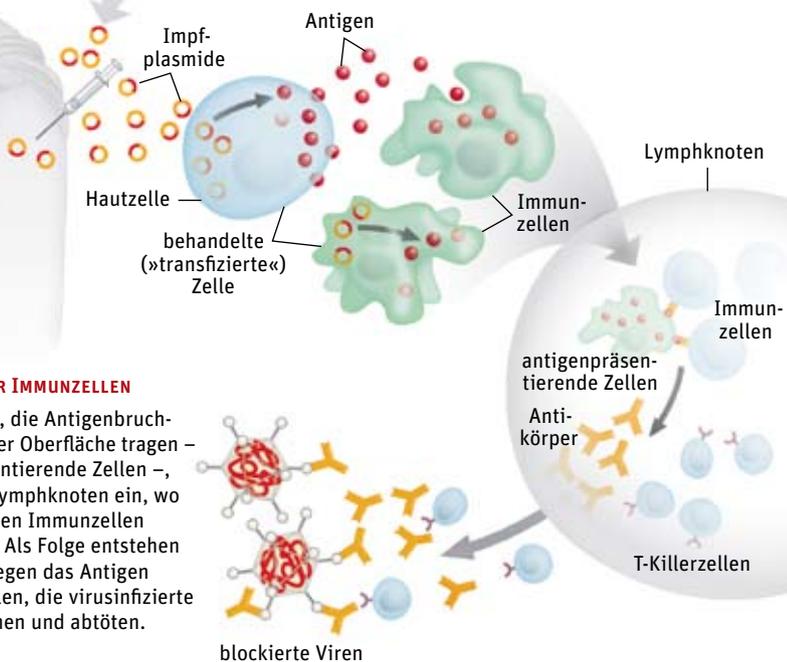
SO FUNKTIONIEREN DNA-MEDIKAMENTE



DNA-Impfstoffe und -Medikamente bestehen aus Plasmiden, kleinen DNA-Ringen. Sie transportieren ein Gen in Zellen des Empfängers, die das entsprechende therapeutisch oder präventiv wirksame Protein herstellen. Im Fall eines DNA-Impfstoffs gegen eine Virusinfektion (Bild) ruft das synthetisierte Virusprotein eine Immunantwort hervor, die den Geimpften vor einer Infektion mit dem Krankheitserreger schützt.

PRODUKTION DES IMPFPROTEINS

Das in die Haut eingebrachte Plasmid gelangt dort in einige Hautzellen und Immunzellen – man spricht von Transfektion. Die transfizierte Zelle produziert das auf dem Plasmid kodierte Virusprotein, das Antigen. Weitere Immunzellen nehmen freigesetzte Antigene auf.



REAKTION DER IMMUNZELLEN

Immunzellen, die Antigenbruchstücke an ihrer Oberfläche tragen – antigenpräsentierende Zellen –, wandern in Lymphknoten ein, wo sie mit anderen Immunzellen interagieren. Als Folge entstehen Antikörper gegen das Antigen und Killerzellen, die virusinfizierte Zellen erkennen und abtöten.

Währenddessen arbeiteten die Verfechter der DNA-Impfstoffe hart an deren Perfektionierung. Sie entwickelten neue Methoden, um die Plasmide in die Empfängerzellen einzuschleusen, steigerten die Produktion der Erregerproteine und testeten Zusatzstoffe, mit denen sich die Reaktion des Immunsystems auf die Proteine verstärken lässt – mit Erfolg.

Die neuen Verabreichungstechniken bringen die Impfpasmide nun in wesentlich mehr Zellen hinein, sogar in Immunzellen. Beispielsweise transportieren Pflaster oder Druckluftinjektionssysteme wie Gene Gun und Bioject die Plasmide in die Haut, wo besonders viele so genannte antigenpräsentierende Zellen als Polizisten des Immunsystems patrouillieren. Diese Techniken befördern zudem wesentlich mehr Plasmide ins Innere der Zellen als etwa Spritzen. Ähnlich gute Ergebnisse lassen sich aber auch nach konventioneller Injektion in die Muskulatur oder in die Haut erzielen, wenn danach eine so genannte Elektroporation vorgenommen wird. Hierbei öffnet eine Serie schwacher Stromstöße kurzzeitig Poren in den Zellmembranen, worauf bis zu 1000-mal mehr Plasmidmoleküle in die Zellen gelangen als ohne diese Zusatzbehandlung (siehe Kasten rechts).

Auch die Plasmide selbst verbesserten die Forscher, indem sie die DNA-Sequenz der eingebauten Gene modifizierten. Bei der so genannten Codonoptimierung zum Beispiel verändern sie die Abfolge der einzelnen »Buchstaben« (Nukleotide) der DNA so, dass die Zelle die Informationen möglichst leicht in Proteine übersetzen kann. »Wörter« aus drei Nukleotiden – die Codons – stehen jeweils für eine der 20 verschiedenen Aminosäuren, aus denen Proteine bestehen (siehe SdW 9/2010, S. 40). Für manche Aminosäuren gibt es mehrere Codons, wobei die Zellen meist eines davon effizienter umsetzen als die anderen. Verwendet man also die jeweils optimalen Codons, erhöht sich die Proteinproduktion. Auch die Genauigkeit und Stabilität der Boten-RNA-Kopien des Gens, jenes Zwischenschritts, der als direkte Vorlage für die Proteinsynthese dient, lässt sich durch Überarbeiten der DNA-Sequenz verbessern.

Export erwünscht!

Eine weitere Optimierungsmöglichkeit betrifft Bereiche im Anfangsteil des Gens, welche die Stabilität des fertigen Proteins erhöhen können oder auch dafür sorgen, dass das Protein aus der Zelle heraustransportiert wird. Letzteres ist bei Impfstoffen sehr erwünscht, weil die Immunabwehr auf diese Weise sowohl innerhalb als auch außerhalb von Körperzellen mit dem Fremdprotein konfrontiert

wird. Daraus resultieren unterschiedliche Arten von Abwehrreaktionen, deren Kombination die Effektivität der Immunantwort steigert.

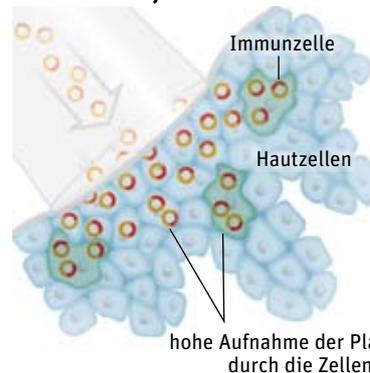
Schließlich nutzen Forscher auch so genannte Adjuvanzen – Hilfsstoffe, die herkömmlichen Impfstoffen oft zugesetzt werden, um ihre Wirkung zu erhöhen. Manche Adjuvanzen können sogar den Schwerpunkt der Abwehrreaktion beeinflussen: Einige kurbeln zum Beispiel selektiv die Produktion von T-Zellen an, die infizierte Zellen im Organismus aufspüren und töten. Andere wiederum erhöhen die Produktion von Antikörpern, die sich an Krankheitserreger anheften und so zum Beispiel verhindern, dass Viren Körperzellen befallen. Eine Substanz namens Vaxfectin etwa steigert die Antikörperproduktion

AUF DEM WEG ZUM OPTIMALEN WIRKSTOFF

Techniken zur Verbesserung von DNA-Impfstoffen und -Therapien umfassen eine verbesserte Aufnahme der Plasmide durch die Zellen, eine erhöhte Produktion der auf dem Plasmid kodierten Proteine sowie eine stärkere Immunantwort auf diese Proteine.

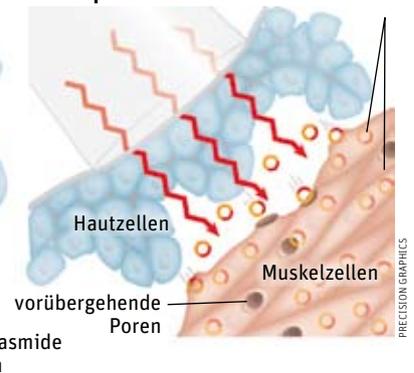
VERABREICHUNG

kanülfreie Injektion



Neue Methoden schießen den Impfstoff beispielsweise mittels Druckluft in die Haut, wo sich zahlreiche Immunzellen aufhalten. So gelangen mehr Plasmide in Haut- und Immunzellen als über konventionelle Spritzen.

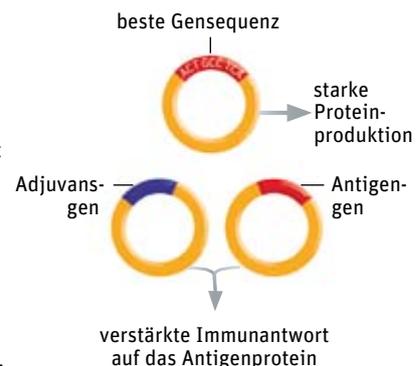
Elektroporation



Schwache elektrische Reizung verstärkt die Aufnahme von Plasmiden nach Injektion mittels Kanüle: Unter dem Einfluss der elektrischen Impulse bilden die Zellmembranen kurzzeitig Poren, durch die Plasmide ins Zellplasma gelangen.

PLASMIDDESIGN

Unterschiedliche DNA-Sequenzen können dasselbe therapeutisch wirksame Protein kodieren. Die Verwendung bestimmter optimaler Sequenzen erhöht die Proteinproduktion.



IMMUNSTIMULATION

Auf Plasmiden können auch Adjuvansproteine kodiert sein, die Immunzellen stimulieren. Werden sie gemeinsam mit dem Antigen produziert, verstärken sie die Immunreaktion auf die Impfproteine.

nach Impfung mit einem DNA-Impfstoff um das 200-Fache. Resiquimod hingegen lässt vermehrt sowohl T-Zellen als auch Antikörper entstehen.

DNA-Impfstoffe besitzen nun den großen Vorteil, dass Adjuvansmoleküle in Form des entsprechenden Gens ebenfalls auf einem Plasmid kodiert werden können, statt sie dem fertigen Präparat als Protein zuzusetzen, was die Stabilität des Impfstoffs beeinträchtigen kann. Zellen, die das Plasmid aufnehmen, produzieren dann das Adjuvans zugleich mit dem eigentlichen Impfstoff. So lässt sich die Immunreaktion noch einmal um mindestens das Fünffache steigern.

Solche hoch entwickelten Impfflasme haben nicht mehr viel mit den eher schlichten Konstrukten der 1990er Jahre zu tun. Etwa um 2007 waren DNA-Impfstoffe so weit ausgereift, dass ein Comeback möglich schien. Zudem zeichneten sich vielfältige weitere Einsatzmöglichkeiten für die Plasmide ab, etwa um Medikamente gezielt in den Körper einzubringen oder Tumoren zu behandeln.

Tatsächlich sind viele andere DNA-Therapien auf dem Weg zu einem breiten Einsatz beim Menschen schon deutlich weiter vorangekommen als die Plasmidimpfstoffe. Hierbei werden statt herkömmlicher Arzneimittel, deren Wirkstoffe meist kleine chemische Moleküle sind, Gene eingesetzt. Im Unterschied zur konventionellen Gentherapie integriert sich jedoch ein Plasmid nicht in das Genom der Empfängerzelle – es verbleibt noch nicht einmal auf Dauer in der Zelle. Damit vermeidet die neue Technik Komplikationen, welche

die Entwicklung von Gentherapien bisher behindert haben.

Bei Tieren wurden bereits erste Erfolge mit Plasmidtherapien erzielt, so zum Beispiel mit einem Medikament zur Vorbeugung gegen Frühaborte bei Schweinen. Nach Elektroporation gelangt das Plasmid in Zellen der trächtigen Sau. Diese produzieren dann ein Hormon (Wachstumshormon-Releasinghormon; GHRH), das das Überleben des heranwachsenden Fötus fördert. Erstaunlicherweise wirkt selbst bei einem so großen Tier schon eine einzige Injektion – ein gutes Zeichen für die künftige Anwendung therapeutischer Plasmide beim Menschen.

DNA-Therapien – kurz vor dem Einsatz beim Menschen

Zurzeit laufen verschiedene große klinische Studien zur DNA-Therapie menschlicher Patienten (siehe Tabelle rechts). Geprüft wird zum Beispiel ein Plasmid mit Genen für Wachstumsfaktoren, die Stammzellen mobilisieren sollen, um eine Form von Herzschwäche (kongestive Herzinsuffizienz, auch Herzdekompensation genannt) zu behandeln. Ein anderes Plasmid stellt einen Wachstumsfaktor namens IGF-1 her, der die Wachstumsverzögerung bei X-chromosomal schwerer Immundefizienz (X-SCID) korrigieren soll. In einer dritten Studie geht es um schwere Durchblutungsstörungen der Extremitäten (kritische Ischämie), die sich bislang kaum behandeln lassen. Die DNA-Therapie soll neue Blutgefäße hervorbringen, was eine Amputation der betroffenen Gliedmaße verhindern könnte.

Bei der DNA-basierten biologischen Immuntherapie kombiniert man schließlich die Vorteile von DNA-Therapien und -Impfstoffen. Dies soll Abwehrreaktionen gegen eine bereits bestehende Erkrankung auslösen, etwa einen Tumor oder eine chronische Virusinfektion. So setzt eine derzeit laufende klinische Studie Gene ein, die für Proteine des humanen Papillomvirus (HPV) kodieren. Sie sollen das Immunsystem dazu bringen, die von den Viren erzeugten Tumoren anzugreifen. Laut ersten Ergebnissen reagiert die Hälfte der behandelten Patienten mit T-Zell-Angriffen auf die HPV-Proteine, und mehr als 90 Prozent der Teilnehmer produzieren große Mengen an Antikörpern. Eine weitere aktuelle Studie untersucht eine DNA-Immuntherapie gegen Infektionen mit dem Hepatitis-C-Virus.

Auch auf diesem Gebiet sind tiermedizinische Anwendungen schon weiter fortgeschritten. Die erfolgreiche DNA-Therapie von Hautkrebs bei Hunden ließen Wissenschaftler aufhorchen, die menschliche Krebserkran-

Literaturhinweise

Hokey, D. A., Weiner, D. B.: DNA Vaccines for HIV: Challenges and Opportunities. In: Springer Seminars in Immunopathology 28(3), S. 267–279, 2006.

Laddy, D. J. et al.: Electroporation of Synthetic Antigens Offers Protection in Nonhuman Primates Challenged with Highly Pathogenic Avian Influenza Virus. In: Journal of Virology 83(9), S. 4624–4630, 2009.

Rice, J. et al.: DNA Vaccines: Precision Tools for Activating Effective Immunity against Cancer. In: Nature Reviews Cancer 8(2), S. 108–120, 2008.

Santra, S. et al.: Mosaic Vaccines Elicit CD8+ T Lymphocyte Responses that Confer Enhanced Immune Coverage of Diverse HIV Strains in Monkeys. In: Nature Medicine 16, S. 324–328, 2010.



DAS GROSSE POTENZIAL DER DNA-MEDIZIN

Plasmidimpfstoffe und DNA-Therapien für eine Vielzahl von Erkrankungen – hier eine Auswahl – werden in klinischen Studien beim Menschen erprobt; in der Tiermedizin sind einige bereits zugelassen.

PRODUKT	ERKRANKUNG MIT KLINISCHEN STUDIEN BEIM MENSCHEN	ERKRANKUNG BEI TIEREN
Impfstoffe	<ul style="list-style-type: none"> ■ HIV-Infektion (3 Impfstoffe) ■ Influenza (2 Impfstoffe) 	<ul style="list-style-type: none"> ■ West-Nil-Virus-Infektion (Pferde) ■ infektiöse hämatopoetische Nekrose (Zuchtlachse)
Immuntherapien	<ul style="list-style-type: none"> ■ Hepatitis C ■ HIV-Infektion ■ vom humanen Papillomvirus verursachte Tumoren ■ Leberkrebs ■ malignes Melanom 	<ul style="list-style-type: none"> ■ malignes Melanom (Hunde)
DNA-Medikamente	<ul style="list-style-type: none"> ■ kongestive Herzinsuffizienz ■ Wachstumsverzögerung bei X-chromosomaler schwerer Immundefizienz (X-SCID) ■ Durchblutungsstörungen der Extremitäten (3 Präparate) ■ malignes Melanom 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Frühabort (Schweine)

PHOTO RESEARCHERS / KLAUS BOLLER
PHOTO RESEARCHERS / JAMES CAVALLINI
PHOTO RESEARCHERS / STEVE GSCHEISSNER

kungen erforschen. Sie verlängert die mittlere Überlebenszeit von Hunden mit fortgeschrittenem Melanom gegenüber unbehandelten Tieren um das Sechsfache. DNA-basierte Therapieansätze können also dort erfolgreich sein, wo konventionelle Behandlungsformen bislang scheitern.

Neue Waffe gegen Virusgrippe

Ein besonders gutes Beispiel für die Leistungsfähigkeit von DNA-Impfungen ist die Virusgrippe. Ein Influenzaimpfstoff, den unsere Arbeitsgruppe entwickelt hat, stellte bereits in Tierexperimenten seine Wirkung unter Beweis und durchläuft zurzeit die ersten klinischen Studien beim Menschen. Er schützt sowohl gegen die saisonale Grippe als auch gegen den tödlichen Vogelgrippevirus H5N1, mit dem sich in den letzten Jahren mehrere hundert Menschen angesteckt haben. Da die Plasmide solche DNA-Sequenzen enthalten, die sich bei den verschiedenen Virusstämmen besonders ähneln, schützen die Impfpoteine gegen viele verschiedene Varianten des Grippevirus zugleich. So wird es in Zukunft vielleicht nicht mehr nötig sein, jedes Jahr neue, an die Virusstämme der kommenden Saison angepasste Impfstoffe herzustellen.

Die rasche Ausbreitung des neuen Influenzavirus vom Subtyp H1N1 (Schweinegrippe) im letzten Jahr verdeutlicht den dringenden Bedarf an neuen Impfstrategien. Die großen Mengen an benötigtem Impfstoff mit herkömmlichen Methoden zu erzeugen, belastete

die Produktionskapazitäten der Herstellerfirmen auf das Äußerste. Eine experimentelle DNA-Vakzine der Firma Vical hingegen war im Mai 2009 in nur zwei Wochen einsatzbereit. Wäre sie zugelassen worden, so hätte sie mindestens zwei Monate früher als die konventionellen Impfstoffe in großen Mengen bereitstehen können. Die ersten klinischen Studien mit dem Plasmid zeigen bereits viel versprechende Resultate.

Und auch DNA-Impfstoffe gegen Aids sind erneut im Gespräch. Pennvax-B enthält drei verschiedene Gene des HIV sowie Sequenzen, die Adjuvantien kodieren. Der Wirkstoff wird mittels Elektroporation verabreicht und durchläuft derzeit klinische Tests mit menschlichen Patienten. Zwei weitere Kandidaten nutzen eine Zweistufenstrategie: Zunächst sollen Plasmide Immunzellen dazu bringen, HIV-Proteine zu erkennen. Ein zweiter Impfstoff anderen Typs verstärkt dann die Abwehrreaktion. Die Firma GeoVax nutzt dafür einen veränderten Vacciniavirus vom Typ Ankara, und das Impfstoff-Forschungszentrum der National Institutes of Health testet einen HIV-Impfstoff auf Adenovirusbasis auf seine Eignung als Verstärker.

Diese neuen Entwicklungen zeigen eindrücklich, welche Fortschritte die Plasmidtechnologie in den letzten zehn Jahren erzielt hat. DNA-Therapien und -Impfungen haben die schwierigen Anfangsjahre nun endlich hinter sich gelassen und sehen einer erfolgreichen Zukunft entgegen. ◀



Matthew P. Morrow (links) und **David B. Weiner** arbeiten zusammen an der University of Pennsylvania, wo Morrow als Postdoc tätig ist. Fast zehn Jahre HIV-Forschung führten ihn zu seinem heutigen Spezialgebiet, den DNA-Impfstoffen und -Immuntherapien. Weiner ist Professor für Pathologie und Medizin; er leitet das Graduiertenprogramm für Gentherapie und Impfstoffe. Als Pionier auf dem Gebiet der DNA-Impfstoffe unternahm er die ersten klinischen Studien mit Plasmidvakzinen.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/1044184.

Warum Menschen nackt sind

Neue Forschungen beleuchten, wann und warum der Mensch vor Jahrmillionen sein Fell verlor. Offenbar verschaffte ihm seine Nacktheit zunächst eine bessere Kondition in einer veränderten Umwelt, später förderte sie seine weitere Evolution – vor allem die des Gehirns.

Von Nina G. Jablonski

In Kürze

- ▶ **Als einziger Primat** hat der Mensch sein Fell verloren – abgesehen von letzten Resten.
- ▶ Die Evolution nackter Haut erfolgte in **Anpassung an veränderte Klima- und damit Umweltbedingungen**. Unsere Vorfahren mussten zur Nahrungsbeschaffung viel unterwegs sein. Nur nackt konnten sie dabei unter glühender Sonne genug Körperwärme durch Schwitzen loswerden.
- ▶ **Fossilstudien und Genanalysen** liefern Hinweise darauf, wann der Mensch das Fell ablegte. Wahrscheinlich geschah es, als Hominiden einen modernen Körperbau erwarben und zu versierten Jägern wurden.
- ▶ Erst unter diesen Voraussetzungen entstanden unser **großes Gehirn** und **das symbolische Denken**.

Nur ein Primat trägt nackte Haut: der Mensch. All unseren Affenverwandten wächst wie den meisten Säugetieren ein Fell, ob der samtig schwarze Pelz der Brüllaffen oder das kupferrote wallende Kleid der Orang-Utans. Ganz verzichten zwar auch wir nicht auf Haare – doch abgesehen von wenigen Körperpartien sind sogar stark behaarte Individuen im Vergleich zu Affen ziemlich kahl.

Wieso und wann verlor der Mensch sein Fellkleid? Die Frage beschäftigt kluge Köpfe seit Langem. Aber immer noch fällt die Antwort darauf nicht leicht. An schon entdeckten Fossilien können Paläoanthropologen zwar die meisten entscheidenden Evolutionsschritte für den menschlichen Körperbau ganz gut ablesen, so auch das Auftreten des aufrechten Gangs. Hautabdrücke sind jedoch bisher bei keinem der Funde überliefert.

In letzter Zeit erkannten Forscher zumindest, dass ihnen die Hominidenfossilien wenigstens indirekt einigen Aufschluss über die Evolution unserer Haarlosigkeit geben. Auch Physiologen und Genomforscher liefern hierzu seit etwa zehn Jahren Anhaltspunkte. Diese Erkenntnisse haben einige Kollegen und ich zusammengetragen. Die verschiedenen Befunde erlauben bereits einen recht guten Einblick, warum – und wann ungefähr – Hominiden ihr Fell verloren. Das hier gezeichnete Szenario besagt jedoch noch mehr: Offenbar stellte nackte Haut geradezu eine entscheidende Voraussetzung für andere men-

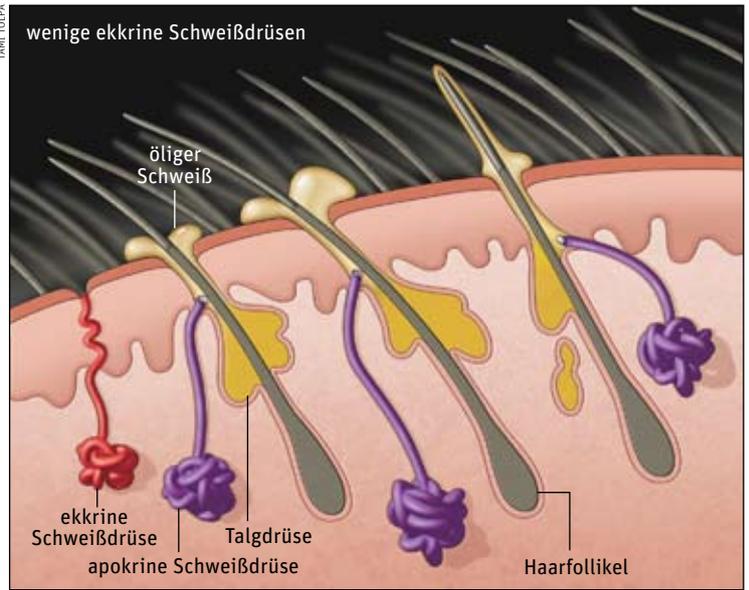
schentypische Errungenschaften dar: auch für unser großes Gehirn sowie die Sprache.

Wozu benötigen die anderen Primaten überhaupt ihr Haarkleid? Bekanntlich zählt ein Fell zu den besonderen Merkmalen der Säugetiere. Nirgends sonst im Tierreich kommt solch eine Hülle vor. Sogar den wenigen nackten Säugetieren wachsen zumindest einige Haare, die allermeisten Arten sind sogar reichlich damit ausgestattet. So ein Fell schützt seinen Besitzer in vieler Hinsicht: Es hält ihn warm, bewahrt seine Haut aber auch vor kleinen Verletzungen, Nässe und Sonnenschäden sowie vor mancherlei Parasiten und Krankheitserregern. Ein Fell kann auch tarnen und damit mehr oder weniger vor Raubfeinden und Plagegeistern schützen. Andererseits erkennen sich Artgenossen oft an ihrer Zeichnung oder ihren Flecken. Mittels ihres Fells signalisieren sie sogar Gefühlszustände. Sträuben sich etwa bei einem Hund die Nackenhaare, ist damit zu rechnen, dass er bereit ist, sich heftig zu verteidigen oder anzugreifen.

Trotz alledem verloren einige Säugerlinien das dichte Fell. Viele dieser Arten leben unterirdisch oder ganz im Wasser. Die Nacktmulle in Ostafrika bilden Gemeinschaften fast in der Art von Insektenstaaten (siehe SdW 10/1992, S. 90). Sie graben sich Gangsysteme und kommen nie ans Licht. Oft drängen sie sich eng zusammen. So könnten sie einander wärmen – obwohl ihre Gänge meist gut temperiert sind. Auch zur visuellen Kommunikation würde in ihrer dunklen Umgebung ein Fell nichts beitragen. Den Walen wiederum, die nie an Land kommen

DAS BESONDERE AN DER MENSCHLICHEN HAUT

Viele Säugetiere produzieren einen öligen Schweiß (links). Dazu tragen bei ihnen neben Talgdrüsen vor allem so genannte apokrine Drüsen bei, die an Haaren ausmünden und auch wesentlich zum Eigenduft beitragen. Menschen verfügen hingegen über besonders viele so genannte ekkrine Schweißdrüsen: Die liefern einen sehr wässrigen, leichten Schweiß (rechts). Bei fehlendem Fell kann der direkt und schnell auf der Haut verdunsten und den Körper auf diese Weise viel besser kühlen als mit einem Fell. Ein schweißnasses Haarkleid vermindert sogar die Wärmeabfuhr.



Gewebe und Organe, besonders das Gehirn, vertragen überhöhte Temperaturen nicht

und von denen die meisten reine Meeresbewohner sind, nützt ihre nackte Haut beim Langstreckenschwimmen und Tauchen wegen des dadurch geringeren Wasserwiderstands. Eine dicke Speckschicht, der Blubber, verhindert Wärmeverluste. Manche nur teilweise im nassen Element lebenden Säugetiere, etwa Otter, tragen dagegen einen Wasser abweisenden Pelz. Der hält die Tiere nicht nur warm und schützt an Land ihre Haut, sondern die Luft darin gibt ihnen auch Auftrieb beim Schwimmen. Die meisten Robben verlassen sich als Erwachsene allerdings weniger auf ein wärmendes Haarkleid als auf ihren Speck.

Dass heute die größten Landsäugetiere – Elefanten und Nashörner – ziemlich nackt daherkommen, dürfte eine Anpassung an die ständige Überhitzungsgefahr in ihren Verbreitungsgebieten sein. Gleiches mag für Flusspferde gelten, die sich nicht nur zum Abkühlen gern ins Wasser zurückziehen. Größeren Tieren steht im Verhältnis zu ihrer Masse weniger Oberfläche zur Verfügung, um überschüssige Körperwärme abzugeben. Dagegen müssen ganz kleine Säugetiere eher dafür sorgen, dass sie nicht zu sehr auskühlen. In früheren kalten Klimaphasen schützten sich auch weiter nördlich lebende Verwandte von Elefanten und Nashörnern, darunter Wollnashorn und Mammuts, mit einem isolierenden Fell. Bei geringeren Wärmeverlusten überstanden sie futterknappe Zeiten leichter.

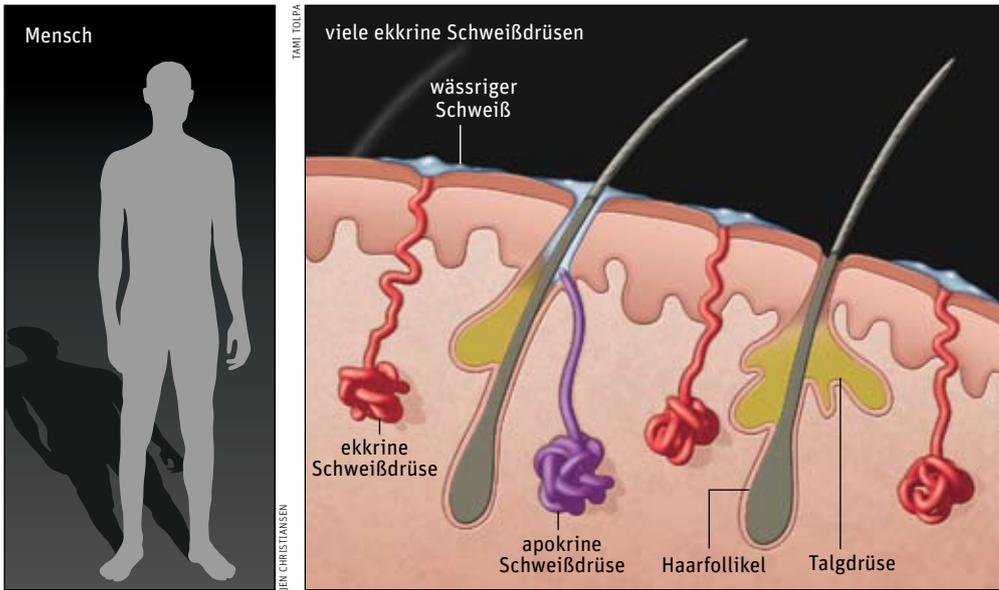
Keines dieser Erklärungsmuster trifft aber auf uns Menschen zu. Weder hausten unsere Vorfahren in der Erde noch lebten sie im Wasser (auch wenn manche Zeitgenossen Letzte-

res gern glauben würden). Wir gehören auch unter den Säugern nicht gerade zu den Riesen. Als unsere Hominidenvorfahren ihr Fell ablegten, stand allerdings wohl dennoch die Notwendigkeit der Kühlung im Vordergrund. Der Mensch ist quasi Weltmeister im Schwitzen, und das gelingt anscheinend mit einer nackten Haut am allerbesten.

Auch mittelgroße Säugetiere müssen dafür sorgen, dass sie nicht überhitzen, besonders, wenn sie in einer heißen Umwelt leben und sich viel bewegen müssen. Gehen und Laufen erzeugt schnell Wärme im Übermaß. Der Körper muss dann permanent dafür sorgen, dass seine Kerntemperatur nicht zu sehr ansteigt. Denn Gewebe und Organe, besonders das Gehirn, vertragen überhöhte Temperaturen nicht.

Zu dem Zweck nutzen verschiedene Säugetiere eine Reihe von Maßnahmen. Hunde hecheln, viele Katzenarten werden erst am Abend richtig munter. Antilopen leiten die Wärme von Arterienblut oft zu kleinen Venen ab, deren Blut in der Nase beim Atmen abgekühlt wurde. Primaten – auch wir Menschen – helfen sich hauptsächlich, indem sie schwitzen. Das kühlt, weil die von der Haut abgesonderte Flüssigkeit in der Luft verdunstet und dabei der Umgebung, auch der Körperoberfläche, Wärme entzieht. Dies funktioniert ähnlich wie ein Verdunstungskühler und wirkt hocheffektiv.

Allerdings ist Schweiß nicht gleich Schweiß. Vielmehr besitzen Säugetiere dafür drei verschiedene Drüsentypen, die miteinander zum Endprodukt beitragen: Talgdrüsen sowie zwei Sorten eigentlicher Schweißdrüsen, die bei den einzelnen Arten in verschiedenen Anteilen vor-



kommen. Bei den Schweißdrüsen im engeren Sinn unterscheiden Fachleute so genannte apokrine und ekkrine Drüsen (siehe Kasten oben).

Bei den meisten Säugetierarten dominieren Talg- und apokrine Drüsen. Beide sitzen beziehungsweise münden am Haarfollikel (sozusagen der Haarwurzel). Ihre Produkte ergeben zusammen ein ölig-fettiges, manchmal auch schaumiges Gemisch. Ein schwitzendes Rennpferd wirkt dadurch wie in Schaum gebadet. Diese Schweißsorte trägt zwar zur Kühlung des Tiers bei, hilft allerdings nur in begrenztem Umfang Wärme abzuführen.

Beim Schwitzen hinderlich: ein Fell

Denn wie G. Edgar Folk Jr. von der University of Iowa in Iowa City und seine Kollegen schon vor zwei Jahrzehnten nachwiesen, verringert sich die Kühlwirkung bei einem schweißnassen und -bedeckten Fell. Die Feuchtigkeit kann nun nicht auf der Haut selbst verdunsten, sondern nur außen auf den Haaren. Das erschwert die Abfuhr der Körperwärme. Muss das Tier an einem heißen Tag körperlich viel leisten oder sich länger anstrengen, gerät es bald an seine Grenzen. Gegen den Hitzestau müsste es zumindest sehr viel Wasser trinken. Deswegen erleiden fellbedeckte Tiere bei zu starker Anstrengung und warmem Wetter leicht einen Hitzschlag.

Menschen begegnen so einer Situation anders. Nicht nur besitzen sie kein Fell, sondern sie verfügen außerdem über besonders viele Schweißdrüsen der dritten Sorte: ekkrine Drüsen, die eine dünne Flüssigkeit absondern. Von denen hat ein Mensch zwischen zwei und fünf

Millionen. Unsere ekkrinen Drüsen können an einem Tag bis zu zwölf Liter wässrigen Schweiß produzieren. (Übrigens besitzen auch Tiere solche Drüsen, nur meist sehr viel weniger.) Dieser Drüsentyp sitzt nicht an den Haarfollikeln, sondern verteilt sich ziemlich dicht unter der Hautoberfläche an Stellen, wo kein Haar austritt. Seinen Schweiß gibt er durch winzige Poren ab. Mit viel wässrigem, dünnem Schweiß, der direkt auf seiner nackten Haut verdunstet, kann der Mensch überschüssige Wärme sehr wirksam loswerden. Deswegen könnte ein Läufer an einem heißen Tag ein Pferd im Marathon besiegen – behaupten Daniel E. Lieberman von der Harvard University in Cambridge (Massachusetts) und Dennis M. Bramble von der University of Utah in Salt Lake City.

Was aber bildete in unserer Evolution den Anlass, dass nackte Haut mit starker Schweißproduktion aus vielen ekkrinen Drüsen aufkam? Was begünstigte diesen Sonderweg, irgendwann nachdem unsere Vorfahren sich längst von der Schimpansenlinie getrennt hatten? Anthropologen vermuten, dass alles mit einer Klimaveränderung begann.

Über frühere ökologische Verhältnisse können Tier- und Pflanzenfossilien Auskunft geben. Die Forscher lernen daraus, dass die Erde vor rund drei Millionen Jahren in eine Abkühlungsphase eintrat – als in Afrika längst aufrecht gehende Hominiden lebten. Dadurch wurde das Klima in Ost- und Zentralafrika trockener. Niederschläge wurden seltener, und die bisherige locker bewaldete Landschaft, an die unsere Vorfahren gewöhnt waren, wich vielerorts offenen Grassavannen.

FALSCHER WASSERTHEORIE

Die Geschichte, dass der Mensch deswegen nackt sei, weil er von einem Wasseraffen abstamme, kam in den 1960er Jahren auf. Wissenschaftlich ist sie unhaltbar – schon weil viele im Wasser lebende Säugetiere dem postulierten Schema nicht entsprechen.

Die Australopithecinen, unsere Vormenschenvorfahren, trugen vermutlich noch ein Fell (linke Bilder). Sie dürften sich hauptsächlich in und nahe bei lichten Wäldern aufgehalten haben, wo sie genug Nahrung und Wasser fanden – ein recht ortsbeständiges Leben, das sich noch nicht so viel von dem der Schimpansen unterschied. Als sich dann klimabedingt Grasfluren ausbreiteten, mussten die Hominiden immer weiter umherstreifen (rechte Bilder). Sie verlegten sich jetzt wohl auch zunehmend auf Fleischkost. Wahrscheinlich besaß als Erster vor ungefähr 1,6 Millionen Jahren der Frühmensch *Homo ergaster* kein Fell mehr. Nur nackt, dank viel kühlendem Schweiß, war die neue Lebensweise möglich.

Das 3,2 Millionen Jahre alte Skelett von »Lucy« erweist: *Australopithecus afarensis* gehörte noch nicht zu den ausdauernden Läufern. Unter anderem besaßen diese Vormenschen noch recht kurze Beine.



VECTOR BEAK

ANNE DENIS FINNIN UND JACQUE BECKETT



Für die Vormenschen bedeutete das: Ihre bisherige Hauptnahrung – Früchte, Blätter, Knollen und Samen – wurde knapper und fand sich nur noch unregelmäßig verteilt. Auch hing das Angebot, ebenso wie die Wasserstellen, nun von der Jahreszeit ab.

Unsere Vorfahren mussten sich umstellen. Hatten sie sich bisher vergleichsweise mühelos ernähren können, galt es jetzt, mehr Aufwand zu betreiben. Zunehmend waren weitere Strecken zu bewältigen, allein um genügend zu trinken und ausreichend Energie aufzunehmen. Ungefähr zu dieser Zeit dürfte auch Fleisch für die Ernährung immer wichtiger ge-

worden sein. Nach bisherigen Erkenntnissen zerlegten die Hominiden offenbar schon vor 2,6 Millionen Jahren Tiere mit Steingeräten. Einem neuen Befund zufolge liegen die Anfänge davon vielleicht sogar über drei Millionen Jahre zurück. Tierische Nahrung liefert zwar deutlich mehr Energie als pflanzliche, aber sie ist rarer und mühsamer zu erlangen. Deswegen müssen Fleisch fressende Tiere größere Gebiete durchstreifen als Pflanzenfresser. Gelegentlich mag ein Raubtier auf einen Kadaver stoßen, doch an sich stellen Beutetiere bewegliche Ziele dar. Verfolgen, Anpirschen, Auflauern, Hinterherjagen – das alles verbraucht eine Menge Energie.

Der Körperbau der Hominiden veränderte sich damals (siehe Kasten oben, links). Vormenschen wie die berühmte »Lucy«, die zu den Australopithecinen zählen, besaßen unter anderem noch recht lange Arme und kurze Beine, was mehr den Proportionen bei Menschenaffen entsprach. Sicherlich konnten diese Primaten trotz des aufrechten Gangs noch recht passabel klettern und verbrachten vermutlich einen Teil ihrer Zeit auf Bäumen. Für lange Wanderungen waren sie dagegen weniger gut ausgestattet. Aber jetzt entwickelten sich langbeinige Primaten mit durchaus modernen Gliedmaßen: Frühmenschen, die somit der Gattung *Homo* zugerechnet werden. Mit ihren langen Beinen vermochten sie in der weiten Landschaft rasch und ausdauernd zu gehen oder zu laufen und bei Bedarf auch gut zu rennen, ob sie nun Beutetiere verfolgten oder selbst vor Raubtieren oder Feinden flüchten mussten.

TJA, PECH, MEIN LIEBER! FORTSCHRITT BERUHT NUN MAL AUF EIN PROZENT INSPIRATION UND NEUNUNDNEUNZIG PROZENT TRANSPIRATION!





Erst *Homo ergaster* war langbeinig und konnte gut ausschreiten. Das nutzten diese Frühmenschen, um in der Steppe weite Strecken gehend oder laufend zu bewältigen – erkennbar am 1,6 Millionen Jahre alten Skelett des »Turkana-Jungen«.

AMNH, DENIS FINNIN UND JACKIE BECKETT



Solches Verhalten steigerte natürlich stark die Hitzschlaggefahr. Peter Wheeler von der Liverpool John Moores University in England erstellt dazu seit den 1980er Jahren Simulationen. Führt man seine Berechnungen mit einer Studie zusammen, die Kollegen und ich 1994 veröffentlichten, so hätten jene frühen Menschen langes Gehen und Rennen in der Savanne ohne die Fähigkeit, ausgiebig zu schwitzen, nicht überstanden. Mit einem Fell und ohne zusätzliche ekkrine Schweißdrüsen hätte die starke, andauernde Muskelaktivität ihren Körper zu sehr aufgeheizt.

Indizien aus der Gengeschichte

Forscher versuchen enger einzugrenzen, wann sich die Hautbeschaffenheit in diesem Sinn verändert haben könnte. Nach unabhängigen Analysen von Lieberman und Christopher Ruff von der Johns Hopkins University in Baltimore (Maryland) besaß die Art *Homo ergaster* (manchmal auch afrikanischer *Homo erectus* genannt) im Wesentlichen moderne Körperproportionen. Das belegt ein rund 1,6 Millionen Jahre altes Skelett (Kasten oben, rechts). Damit konnte dieser Frühmensch ausgiebig ausschreiten und laufen. Belastungsspuren am Fuß-, Knie- und Hüftgelenk zeigen, dass er es tatsächlich tat. Demnach dürfte damals auch schon sein Schwitzvermögen ganz gut ausgeprägt gewesen sein.

In dem Zusammenhang sind genetische Berechnungen zur Entstehungszeit von dunkler Hautfarbe aufschlussreich. Forscher vermuten, dass die Hominiden anfangs wie

Schimpansen eine rosafarbene Haut bei dunklem Fell besaßen. Der Verlust des Haarkleids erforderte gegen die Sonnenstrahlung eine starke Hautpigmentierung. Alan R. Rogers von der University of Utah in Salt Lake City und seine Kollegen ermittelten das Alter von Varianten eines der hieran beteiligten Gene, *MC1R* genannt. Wie sie feststellten, dürfte ein bestimmtes Sequenzmuster dieses Gens, das alle dunkelhäutigen Afrikaner tragen, 1,2 Millionen Jahre alt sein. Rogers schätzt, dass unsere Körperbehaarung spätestens damals schon merklich dünner geworden war.

Während sich die äußeren Umstände für den Fellverlust und sein Zeitpunkt somit recht gut herleiten und eingrenzen lassen, sind die genetischen Vorgänge dabei weniger klar. Denn eine ganze Menge Erbsequenzen tragen zum Aussehen und den Funktionen der menschlichen Haut bei. Vergleiche des menschlichen und des Schimpansengenoms zeigten, dass wir uns von unseren nächsten Verwandten gerade auch in jenen Genen deutlich unterscheiden, deren Proteine über Hauteigenschaften bestimmen. Manche dieser Gene erscheinen beim Menschen in einer Version, deren Genprodukt für eine widerstandsfähigere, besser gegen Wasser und Abschürfungen geschützte Haut sorgt – was bei fehlendem Fell besonders nötig ist. Diese Gene dürften demnach im Zuge des Fellverlusts aufgetreten sein.

Die Schutzigenschaften unserer Haut verdanken wir der verhornten Oberhaut, der so genannten Epidermis, genauer gesagt der äußeren Hornschicht, dem Stratum corneum.

LANGE GLIED- MASSEN GEGEN HITZESTAU

Gegen Überhitzung halfen unseren Vorfahren in der afrikanischen Savanne auch die langen Extremitäten. Dadurch erhöhte sich das Verhältnis der Körperoberfläche zum Körpervolumen, was die Wärmeabgabe begünstigte. Solche Anpassungen finden offenbar auch jetzt noch statt, etwa bei den langbeinigen Dinka des Südsudan, einer extrem heißen Region. Als der moderne Mensch in kühlere Gebiete der Welt vordrang, verlor sich offenbar dieser Selektionsdruck.



GETTY IMAGES / HEINRICH VAN DEN BERG



Tiere signalisieren Artgenossen vieles über ihr Fell. An dessen Mustern erkennen sie einander. Menschen benutzen stattdessen gern Tattoos, Bemalung oder Schmuck. Unsere Mimik ist besonders ausdrucksstark, aber wir teilen uns auch über Sprache mit.

LÄUSETHEORIE

Vor ein paar Jahren entwarfen Mark Pagel von der University of Reading (England) und Walter Bodmer vom John Radcliffe Hospital in Oxford ein Gegenmodell zu der Vorstellung, unsere nackte Haut sei entstanden, weil unsere Vorfahren so besser schwitzen konnten. Die beiden Forscher meinten, wer kein Fell trug, wurde auch weniger von Läusen und dergleichen geplagt – und konnte das anderen mit Nacktheit signalisieren, vor allem potenziellen Geschlechtspartnern.

Andere Forscher entdeckten, dass die Kleiderlaus sich vor wohl höchstens 50 000 bis 100 000 Jahren von der Kopflaus abspaltete. Vielleicht trägt der Mensch erst seit damals Kleidung.

Deren Aufbau vergleichen manche mit einer Wand aus Steinen und Mörtel. Flache, abgestorbene, voll verhornte Zellen – die Korneozyten – entsprechen den Steinen. Sie bilden eine Anzahl Schichten und enthalten unter anderem das Protein Keratin. Als Mörtel umgeben diese toten Zellen sehr dünne Lipidschichten.

Die meisten an der Entwicklung der Hornschicht beteiligten Gene sind evolutionär ural, und ihre Gensequenzen haben sich bei den Wirbeltieren sonst kaum verändert. Dass sie beim Menschen so stark von der Norm abweichen, zeigt, wie wichtig diese Mutationen zum Überleben der Hominiden waren. Die betreffenden Genversionen sorgen für eine einzigartige Kombination von Proteinen, die nur in der Epidermis vorkommen, darunter neuartige Formen von Keratin und Involucrin, das entscheidend zu der verhornten Barriere beiträgt. Verschiedene Forscherteams untersuchen derzeit die Regulation dieser Proteine.

Andere Wissenschaftler kümmern sich um die Evolution der Keratine von Körperhaar. Sie möchten wissen, wodurch dieses Haar beim Menschen so fein und spärlich gerät. Der Mediziner Roland Moll vom Universitätsklinikum Gießen und Marburg wies mit seinen Kollegen nach, dass unser Körperhaar äußerst empfindliche Keratine enthält. Dadurch brechen diese Härchen besonders leicht.

Und was könnte der genetische Hintergrund für die große Anzahl an ekkrinen Schweißdrüsen sein? Fast mit Sicherheit veränderten sich Gene, die beim Embryo über das Schicksal der – noch nicht spezialisierten – Epidermistammzellen bestimmen. Solche Stammzellen in der Oberhaut interagieren in der frühen Entwicklung an bestimmten Orten mit Zellen der darunterliegenden so genannten Unter-

oder Lederhaut. Mittels genetisch gesteuerter chemischer Signale differenzieren sich die Stammzellen nun lokal so, dass Haarfollikel, ekkrine, apokrine oder Talgdrüsen entstehen beziehungsweise stellenweise eine ganz glatte Hautoberfläche. Viele Forscher interessieren sich dafür, wie solche lokalen Unterschiede zu Stande kommen. Vielleicht verstehen wir bald genauer, was die Oberhautstammzellen auf ihre verschiedenen Entwicklungswege bringt und wieso der Mensch so viel mehr ekkrine Schweißdrüsen ausbildet als Tiere.

Warum die Evolution einige Körperpartien des Menschen von der Nacktheit aussparte, verlangt ebenso nach einer Erklärung. Die Behaarung von Achseln und Scham dürfte die Haut an diesen Stellen zum einen vor Bewegungsreibung schützen. Zum anderen dient sie sicherlich dazu, individuelle Geruchsstoffe mit sozialem Signalcharakter, so genannte Pheromone, besser zur Geltung zu bringen.

Lockenkopf als Sonnenschild

Das Kopfhaar hält hingegen zu warme Sonnenstrahlen vom Schädel fern. Den vorangegangenen Überlegungen widerspricht das nicht. Dichtes Haar auf dem Kopf sorgt an heißen Sonnentagen für kühlere Luft zwischen der schwitzenden Kopfhaut und der heißen Haaraußenschicht. Nur das Haar erhitzt sich, während der Kopfschweiß in den kühleren Luftraum hinein verdunstet. Sicherlich stellen dichte Locken in der Hinsicht die denkbar beste Kopfbedeckung dar. Sie erhöhen die Dicke dieser Luftschicht und erlauben zugleich eine Ventilation. Wie es sich damit in der menschlichen Evolution verhielt, das wissen wir noch kaum. Womöglich trugen die frühen modernen Menschen Afrikas kräftige Locken, und andere Haarsorten kamen erst später auf, als



GETTY IMAGES / MARK WILSON



deren Nachfahren sich von heißen afrikanischen Gegenden her in andere Teile der Welt verbreiteten.

Auch die Körperbehaarung variiert zwischen einzelnen Menschengruppen erstaunlich stark. Manche Populationen besitzen kaum eine, andere weisen einen recht kräftigen Flaum auf. Zumindest tendenziell leben sehr schwach behaarte Menschen eher in heißen Regionen, vergleichsweise stark behaarte in kühleren Gegenden. Letzteren bietet die Wolle an Rumpf und Gliedern dennoch keinen nennenswerten Kälteschutz. Wie stark das Körperhaar wächst, dürfte teilweise mit Testosteron zusammenhängen. Bei allen Menschen sind Männer tendenziell stärker behaart als Frauen. Manche Anthropologen führen das auf sexuelle Selektion zurück. Demnach bevorzugen Frauen Männer mit vollem Bart und stärkerer Körperbehaarung, da dies mit Manneskraft und sonstiger Stärke assoziiert werde. Einer anderen These zufolge besitzen Frauen wenig Körperhaar, weil Männer eine Vorliebe für jugendlich wirkende Partnerinnen entwickelten und das weibliche Geschlecht sich daran mit der Zeit anpasste. Diese verschiedenen Deutungen sind zwar interessant, doch hat sie bisher niemand bei heutigen Bevölkerungen überprüft. So steht es keineswegs fest, dass stärker behaarte Männer besonders energiegeladener oder fruchtbarer sind. Solange gründliche Studien dazu fehlen, kann jeder seine eigenen Vermutungen anstellen.

Der Verlust des Fells hatte auf die weitere Evolution des Menschen beträchtliche Auswirkungen. Das Gehirn ist unser temperaturempfindlichstes Organ. Wohl erst als unsere Vorfahren überschüssige Körperwärme leicht loswerden konnten, indem sie kräftig schwitzten, vermochte es sich stark zu vergrößern. Maß es bei den Australopithecinen durchschnittlich

noch 400 Kubikzentimeter, also kaum mehr als bei Schimpansen, konnte ein *Homo ergaster* bereits mit dem Doppelten aufwarten. In den nächsten eine Million Jahren legte das menschliche Gehirn nochmals gut 400 Kubikzentimeter zu und erreichte seine heutige Größe. Unzweifelhaft beeinflussten weitere Faktoren diesen enormen Zuwachs. Dazu gehörte mit Sicherheit gehaltvollere Nahrung, die dem anspruchsvollen Gehirn genügend Energie lieferte (siehe SdW 5/2003, S. 30). Der Verzicht auf Behaarung war allerdings bei all dem ein ganz entscheidender Schritt.

Nicht zuletzt forderte die viele nackte Haut Umstellungen im sozialen Miteinander. Zwar ist es uns durchaus möglich, bei Angst oder Wut etwa die Nacken- und Rückenhaare zu sträuben. Die kleinen Haarbalgmuskeln dazu besitzen wir noch. Allerdings dürfte unser Erscheinungsbild dabei Mitmenschen kaum beeindrucken oder gar einschüchtern. Ein Raubtier oder ein Schimpanse mit gesträubtem Fell kann dagegen wirklich Furcht auslösen. Ein Fell kann sowohl tarnen als auch durch die Muster und Flecken Signalwirkung haben. Vielleicht legten wir uns, um den Verlust zu kompensieren, das Erröten und ein komplexes Mienenspiel zu. Zudem erfanden die verschiedenen Kulturen eine Palette von speziellen künstlichen Ausdrucksmöglichkeiten, von Körper- und Gesichtsbemalungen und Schmuckstücken bis zu Tätowierungen, nicht zu vergessen die Kleidung. Damit drücken wir unsere soziale Zugehörigkeit, unseren Status und vieles mehr aus. Wie wir uns fühlen und was wir vorhaben, zeigen wir außerdem durch Haltung und Gestik. Ganz wichtig ist die Sprache, mit der wir andere an unseren Gedanken teilhaben lassen. Die nackte Haut machte uns zu Menschen. ◀



Nina G. Jablonski leitet an der Pennsylvania State University in University Park das Institut für Anthropologie. Feldforschungen führten die Professorin nach China, Kenia und Nepal. Unter anderem untersucht sie die Evolution der menschlichen Haut, die Herkunft des aufrechten Gangs, die Verbreitungsgeschichte der Altweltaffen und die Paläoökologie von Säugetieren in den vergangenen zwei Millionen Jahren.

Jablonski, N. G., Chaplin, G.:

Die Evolution der Hautfarben. In: *Spektrum der Wissenschaft* 6/2003, S. 38 – enthalten im Dossier 1/2004: Evolution des Menschen II.

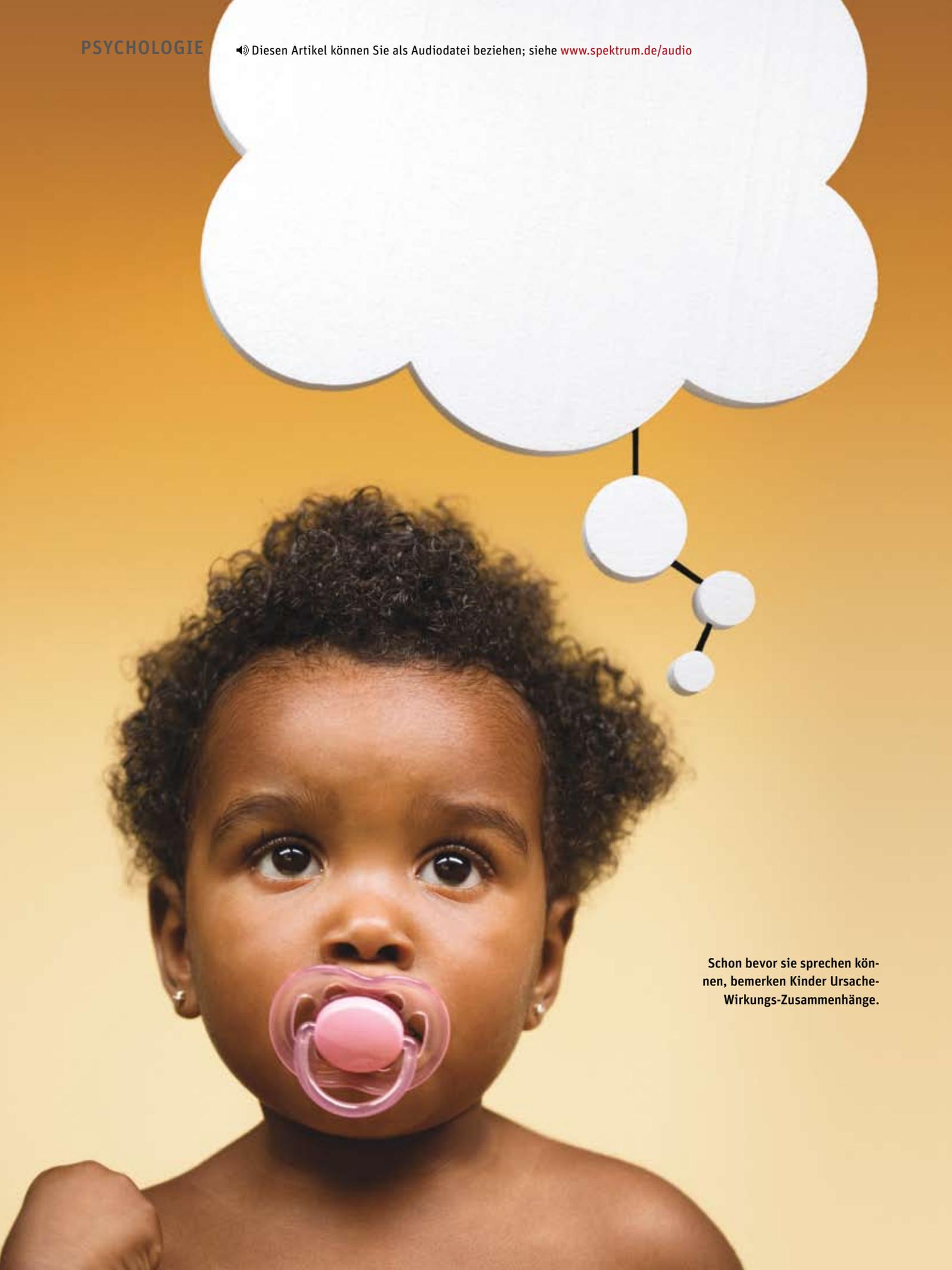
Jablonski, N. G.: *Skin: A Natural History*. University of California Press, 2006.

Lieberman, D. E., Bramble, D. M.:

The Evolution of Marathon Running: Capabilities in Humans. In: *Sports Medicine*, 37(4–5), S. 288 – 290, 2007.

Rogers, A. R. et al.: Genetic Variation at the MC1R Locus and the Time since Loss of Human Body Hair. In: *Current Anthropology*, 45(1), S. 105 – 108, Februar 2004.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/1044186.



Schon bevor sie sprechen können, bemerken Kinder Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge.

Kleinkinder begreifen mehr

Kleinkinder, sogar schon Babys, ergründen die Welt durchaus in der Art von Wissenschaftlern. Zum Beispiel schließen sie aus beobachteten Häufigkeiten auf Zusammenhänge.

Von Alison Gopnik
Fotos: Timothy Archibald

Bis vor wenigen Jahrzehnten dominierte noch die Meinung, Babys und Kleinkinder könnten die Welt nicht logisch-rational begreifen. Die meisten Psychologen, Philosophen und Psychiater waren davon überzeugt, in den ersten Lebensjahren nähme das Hier und Jetzt ein Kind völlig gefangen. Es sei egozentrisch und amoralisch. Die Kleinen verstünden weder das Prinzip von Ursache und Wirkung noch könnten sie sich in andere hineinversetzen oder Wirklichkeit von Fantasie trennen. Auch heute noch halten viele Leute Kinder für unzulängliche, unfertige Erwachsene.

Doch in den letzten 30 Jahren erkannten Forscher: Selbst die jüngsten Kinder begreifen die Welt besser, als Experten ihnen früher zutrauten. Noch erstaunlicher: Offenbar ergründet und erfasst ein so junger Mensch die Dinge gar nicht viel anders als ein erwachsener Wissenschaftler. Ein Kind experimentiert, arbeitet mit Statistiken und stellt intuitive physikalische, biologische und psychologische Theorien auf. Seit etwa zehn Jahren verstehen wir auch langsam, welche Mechanismen diesen erstaunlich frühen Leistungen rechnerisch, evolutionär und neurologisch zu Grunde liegen. Das sind revolutionäre Befunde, die nicht nur unser Bild des kleinen Kindes verändern, sondern sogar das unserer menschlichen Natur überhaupt.

Warum haben sich so viele Experten früher dermaßen getäuscht? Wer Kinder von bis zu vier Jahren beobachtet – also der Altersgruppe, mit der sich dieser Artikel befasst –, mag leicht meinen, dass diese nicht

sonderlich viel verstehen und auch nicht klar denken können. Den ganz Kleinen mangelt es an Sprechvermögen. In der Kindergartenzeit fällt es ihnen noch schwer, Gedanken einigermaßen geordnet auszudrücken. Man stelle einem Dreijährigen eine Frage, die eine längere Antwort erfordert. Meist produziert das Kind einen wunderschönen, aber ziemlich unklaren Redestrom. Frühere Forscher auf dem Gebiet, etwa der Schweizer Entwicklungspsychologe Jean Piaget (1896–1980), schlossen daraus, kleine Kinder lebten noch in einer irrationalen, logikfreien Welt. Ihr Denken sei egozentrisch und vorkausal, ohne eine Vorstellung von Ursache und Wirkung.

In den späten 1970er Jahren begann eine neue Forschungsepisode. Die Psychologen stellten nicht mehr Sprachäußerungen in den Vordergrund, sondern achteten vor allem darauf, was ihre jungen Versuchspersonen taten. Sie bemerkten, dass Babys und Kleinkinder Neues und Überraschendes länger anschauen als Bekanntes. Das nutzen die Forscher, um zu erkennen, was sie erwarten und was nicht. Die besten Befunde liefern allerdings Studien, bei denen die Kinder auch selbst agieren dürfen: bei denen sie zum Beispiel nach etwas greifen, auf etwas zukrabbeln oder ein Verhalten nachahmen können.

Bei entsprechend konzipierten Studien liefern auch Sprachäußerungen Aufschluss. Henry Wellman von der University of Michigan in Ann Arbor beispielsweise untersuchte spontane Gespräche von Kindern auf Hinweise ihres Denkens. Des Weiteren eignen sich dazu Fragen mit lediglich zwei eindeutigen Antwortmöglichkeiten.

Dank solcher Vorgehensweisen deckten Forscher auf, dass schon Krabbelkinder eine

In Kürze

- Psychologen haben **die kognitiven Fähigkeiten kleiner Kinder** lange völlig unterschätzt. Kindern gelingt es schon in recht frühem Alter, sich zum Beispiel in andere Personen hineinzuversetzen oder Ursachen und Wirkungen zu verknüpfen.
- **Kinder** eignen sich die Welt in ganz ähnlicher Weise an **wie Naturwissenschaftler**: Sie experimentieren gezielt, bewerten gewonnene statistische Muster und stellen anhand ihrer Beobachtungen Theorien auf.
- Vermutlich entstand die lange Hilflosigkeit und Abhängigkeit unserer Kinder als **evolutionärer Kompromiss**, denn das gibt dem jungen Gehirn viel Zeit, passende Schaltkreise einzurichten – Zeit für Lernen und Kreativität.

DIE KLEINEN PHILOSOPHEN

Kleine Kinder finden zu Theorien über Zusammenhänge in ganz ähnlicher Weise wie erwachsene Forscher, vielfach indem sie Wahrscheinlichkeiten erkennen. Oft gelingt ihnen das beim freien Herumprobieren am leichtesten. Was man ihnen genau vormacht, finden sie schnell langweilig. Doch überraschende Effekte bestaunen sie – und merken sie sich.

Menge von der Welt um sich herum wissen. Das reicht weit über die augenblicklichen Eindrücke hinaus. Renée Baillargeon von der University of Illinois in Urbana-Champaign und Elizabeth S. Spelke von der Harvard University in Cambridge (Massachusetts) etwa bemerkten ein Verständnis junger Kinder für grundlegende physikalische Zusammenhänge, zum Beispiel für Flugbahnen, Schwerkraft oder Raumbegrenzungen. Fährt ein Spielauto durch eine massive Wand, starren Kinder es länger an, als wenn alles mit rechten Dingen zugeht.

Drei- und Vierjährige zeigen bereits ein Verständnis für biologische Zusammenhänge. In ersten Ansätzen begreifen sie Wachstum, Vererbung und Krankheit. Kommentieren sie Dinge oder Geschehnisse, beachten sie nicht nur den oberflächlichen Anschein. Wie Susan A. Gelman entdeckte, die ebenfalls an der University of Michigan forscht, schreiben Kinder dieses Alters Tieren und Pflanzen eine Wesenheit zu, eine Essenz, die gleich bleibt, auch wenn sich die äußerliche Erscheinung verändert. Am wichtigsten ist schon für einen Säugling das Wissen über andere Personen. Nach Andrew N. Meltzoff von der University of Washington in Seattle verstehen selbst Neugeborene, dass Menschen etwas Eigenes, Besonderes darstellen, und ahmen Gesichtsausdrücke nach.

Betty Repacholi, heute auch an der University of Washington, wies mit mir zusammen im Jahr 1996 bei 18 Monate alten Kindern ein Verständnis dafür nach, dass die eigenen Vorlieben von denen anderer Personen abweichen können. Die Versuchsleiterin zeigte Kindern zwei Schälchen, von denen eines Goldfisch-Kracker enthielt, das andere rohe Brokkolistücke. Dann kostete sie aus jedem Schälchen ein wenig und machte dazu entweder ein angewidertes oder ein zufriedenes Gesicht. Nun

hielt sie dem Kind die offene Hand hin und bat: »Gibst du mir etwas?« Und das Kleine bot ihr Kohl an, wenn sie vorher daran Gefallen gezeigt hatte – auch wenn es selbst das Gemüse verschmähte. Dagegen wählten 14 Monate alte Kinder beim gleichen Test stets die beliebten Salzkracker. Folglich benehmen sich Eineinhalbjährige nicht mehr völlig selbstbezogen. Zumindest auf einer einfachen Ebene können sie sich in andere hineinversetzen. Vierjährige sind in ihrem psychologischen Alltagsverständnis noch weiter. Wenn jemand etwas Eigenartiges tut, können sie erklären, dass derjenige etwas falsch verstanden hat.

Mit Statistik die Welt begreifen

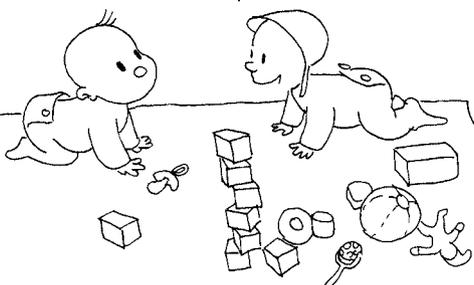
Mit solchen Studien hatten die Forscher zum Ende des letzten Jahrhunderts viel über das erstaunlich abstrakte und differenzierte Wissen von Babys und dessen beträchtlichen Zuwachs in den Folgejahren zusammengetragen. Nach Ansicht mancher Experten ist einiges davon nur erklärlich, wenn Kinder mit einer Menge Vorwissen über Objekte und Menschen auf die Welt kommen. Sicher ist ein Neugeborenes kein unbeschriebenes Blatt – im Gegenteil. Doch so wie sich das Verständnis eines Kindes ständig wandelt, darf man annehmen, dass es die Welt auch durch seine Erfahrungen zunehmend begreift.

Wie wir Menschen bei den ungeheuren auf uns einströmenden Sinnesempfindungen überhaupt Zusammenhänge erkennen, gehört zu den größten Rätseln von Psychologie und Philosophie. Allmählich verstehen wir zumindest immer besser, wie kleine Kinder in kurzer Zeit so viel genaues Wissen erwerben. Bemerkenswert ist dabei vor allem, wie sie mit Wahrscheinlichkeiten umgehen.

Zuerst erkannten das 1996 Jenny R. Saffran, Richard N. Aslin und Elissa L. Newport, die damals alle an der University of Rochester arbeiteten. Sie untersuchten die Auffassung von sprachlichen Klangmustern. Acht Monate alten Kindern spielten sie Silbenfolgen von bestimmter Regelmäßigkeit vor. Zum Beispiel folgte auf die Silbe »ro« jedes dritte Mal »bi«; aber auf »bi« folgte jedes Mal »da«. Als Nächstes hörten die Kinder andere Silbenfolgen, die nach demselben Muster gebaut waren – oder nicht. Tatsächlich lauschten die kleinen Teilnehmer ungewohnten Mustern stärker. Neuere Studien zeigen, dass Babys auch in Tonfolgen statistische Muster erkennen. Das gelingt ihnen ebenfalls mit Bildszenen und selbst mit abstrakteren grammatikalischen Strukturen.

Sogar den Zusammenhang zwischen einer Teilmenge und einer Gesamtheit verstehen ganz kleine Kinder schon. Meine Kollegin Fei Xu an der University of California in Berkeley

WENN WIR VORHABEN, WEITER ZU EXPERIMENTIEREN, SOLLTEN WIR FORSCHUNGSGELDER BEANTRAGEN!



erprobte das im Jahr 2008 mit acht Monate alten Kindern und verschiedenfarbigen Tischtennisbällen. Eine Kiste enthielt zum Beispiel weiße und rote Bälle im Verhältnis 80 zu 20 (Bild rechts). Die Forscherin nahm sich davon, scheinbar beliebig, fünf Bälle. Hatte sie vier rote und nur einen weißen erwischt, was statistisch unwahrscheinlich war, wunderten sich die Kinder mehr als im umgekehrten Fall: Sie schauten länger und genauer hin.

Statistische Muster zu bemerken stellt bei wissenschaftlichen Entdeckungen nur den ersten Schritt dar. Forscher ziehen daraus Rückschlüsse über die Welt – und auch das gelingt schon Kleinkindern. In einer Folgestudie arbeitete Fei Xu mit 20 Monate alten Probanden. Statt Tischtennisbällen legte sie Spielzeugtiere in den Kasten: grüne Frösche und gelbe Enten. Sie nahm fünf Tiere heraus, stellte sie vor das Kind auf den Tisch und bat es, ihr eines davon zu geben. Waren in der Kiste überwiegend Frösche und hatte die Forscherin auch hauptsächlich Frösche herausgenommen, dann wählten die Kinder keine Sorte bevorzugt. Doch im anderen Fall, wenn aus der Kiste mit vielen Fröschen und wenigen Enten mehr Enten vor ihnen landeten, dann gaben sie der Frau gezielt eine Ente. Das sah aus, als hätten sie begriffen, dass ihr Gegenüber Enten lieber mochte und extra herausgesucht hatte.

Mein eigenes Team erforscht, wie kleine Kinder anhand statistischer Muster und eigener Experimente Ursache und Wirkung erschließen. Ihre Art zu denken, erscheint dabei keineswegs vorkausal. Wir verwenden einen Blicket-Detektor, ein Gerät, das sich Psychologen vor zehn Jahren ausdachten, um das kindliche Verständnis von kausalen Zusammenhängen zu untersuchen. Das Gerät leuchtet auf und spielt Musik, wenn man bestimmte Objekte drauflegt. Bei anderen geschieht nichts (Bild S. 73). Ein »Blicket« ist das Objekt, welches das Gerät »anwirft«. Wir wollten wissen, ob Kleinkinder das wirksame Objekt ausfindig machen, also praktisch Kausalschlüsse ziehen, wenn wir ihnen die Reaktionen der Maschine vorführen.

Im Jahr 2007 wiesen Tamar Kushnir (heute an der Cornell University in Ithaca, New York) und ich nach, dass Kindergartenkinder bei solchen Aufgaben Wahrscheinlichkeiten bewerten können. Bei einer Vorführung gab es zum Beispiel einen gelben und einen blauen Klotz. Die Versuchsleiterin nahm einen davon und platzierte ihn immer wieder auf dem Gerät. Dann tat sie dasselbe mit dem anderen. Beim Drauflegen des gelben Klotzes leuchtete der Detektor zwei- von dreimal, beim blauen nur zwei- von sechsmal. Anschließend durfte das Kind es selbst versuchen. Unsere kleinen Sta-

tistiker, die noch nicht addieren oder subtrahieren konnten, versuchten ihr Glück vorwiegend mit dem gelben Würfel.

Sie entschieden sich sogar dann für den richtigen Klotz, wenn wir die Würfel nur in der Luft über dem Gerät bewegten. So eine Wirkung hatten sie zwar vorher für unmöglich gehalten, als wir sie fragten – doch waren sie schnell bereit, den merkwürdigen Effekt zu akzeptieren, quasi eine Fernbedienung des Geräts. Offenbar entdecken sie so mit Hilfe von statistischer Bewertung in ihrem Alltag neue und überraschende Zusammenhänge.

Eine andere Studie mit Vierjährigen führte ich zusammen mit Laura Schulz durch, die heute am Massachusetts Institute of Technology in Cambridge arbeitet. Zum Einsatz kam ein elektrischer Kasten mit einem Schalter an der Seite. Oben auf dem Kasten saßen zwei Getrieberräder (Bild S. 72), sagen wir ein blaues und ein rotes. Damit konnten wir verschiedene Funktionsvarianten erstellen. Bei Betätigung des Schalters konnten sich zum Beispiel sofort beide Räder drehen. Oder zuerst drehte sich nur das blaue Rad, das dann das rote antrieb, und dergleichen mehr.

Abläufe in Bilder umsetzen

Wir zeigten den Kindern Bilder mit den verschiedenen Anordnungen – etwa ein Schema, auf dem das rote Rad das blaue antrieb. Anschließend führten wir ihnen eines der entsprechenden Geräte direkt in allen möglichen Aspekten vor. War die Kausalkette eingerichtet, bei der Rot Blau antrieb, dann demonstrierten wir ihnen, was passierte, wenn man das blaue Rad fortnahm und dann einschaltete: Das rote Rad drehte sich auch jetzt. Nahmen wir bei derselben Konstruktion aber das rote Rad weg, drehte sich das blaue nicht. Am Ende sollten die Kinder das Bild mit der passenden Funktionszeichnung heraussuchen. Wir konnten nur darüber staunen, wie gut sie den Zusammenhang erkannten. Im Übrigen entdecken Kinder solche Verbindungen auch selbst, wenn man sie mit dem Spielzeug allein herumprobieren lässt – wie kleine Forscher.

Ein anderes Gerät, das Laura Schulz Vorschulkindern zeigte, hatte zwei Hebel. Damit konnte man eine Ente sowie eine Puppe herauschnellen lassen. Ein Teil der Kinder durfte zusehen, wie die Ente bei Bedienung des einen Hebels herauskam und die Puppe, wenn man den anderen wählte. Der zweiten Gruppe wurde nur vorgeführt, dass beide Geschöpfe gleichzeitig erschienen, denn wir bedienten beide Hebel auf einmal. Die Zuordnung blieb unklar. Dann durften die Kinder mit dem Gerät spielen. Die der ersten Gruppe interessierten sich dafür viel weniger als die der zweiten.



Acht Monate alte Kinder erweisen sich als Statistiker: Zieht jemand aus einer Box mit vielen weißen und wenigen roten Bällen hauptsächlich rote heraus, wundern sie sich sichtlich.

Kinder akzeptieren schnell merkwürdige Effekte wie eine Fernbedienung eines Geräts, wenn beobachtete Wahrscheinlichkeiten für einen Ursache-Wirkungs-Zusammenhang sprechen

Wenn Kinder Dinge auseinandernehmen, erkunden sie **Zusammenhänge von Ursachen und Wirkungen** und experimentieren damit

Wie funktioniert der Kasten? Ein Vierjähriger ergründet die Beziehungen zwischen den Funktionselementen. Das erkannte richtige Prinzip finden Kinder in diesem Alter sogar auf Bildern wieder.



Erstere wussten ja schon, wie es funktionierte. Darum fanden sie es wohl nicht weiter spannend. Doch für die Teilnehmer der zweiten Gruppe war dieser Kasten ein Wunderwerk, das sie nun eifrig ergründeten. Es dauerte gar nicht lange, bis sie den Zusammenhang herausbekamen.

Der Computer im Kinderkopf

Wenn Kinder im spontanen Spiel in die Einzelheiten vordringen, auch gern alles auseinandernehmen, erkunden sie Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge und experimentieren damit. Das dürfte der effektivste Weg sein, herauszufinden, wie die Welt funktioniert. Offenbar machen sich Kinder, die etwas ausprobieren und Wahrscheinlichkeiten bewerten, ihr Tun nicht wie Erwachsene bewusst. Doch unbewusst dürfte ihr Gehirn Informationen nach ähnlichen Prinzipien bearbeiten wie das von Forschern. Nach einem Grundkonzept der Kognitionswissenschaften stellt das Gehirn eine Art Computer dar, der von der Evolution gestaltet wurde und den Erfahrungen programmieren.

Um zu ergründen, wie Wissenschaftler – oder auch Kinder – lernen, benutzen Informatiker und Philosophen inzwischen auch mathematische Wahrscheinlichkeitsmodelle: die sogenannten bayesschen Netze oder bayesschen Modelle – benannt nach dem englischen Mathematiker und Statistiker Thomas Bayes (1702–1761). Sie werden für selbstlernende Software eingesetzt. Damit untersuchen Forscher komplexe Zusammenhänge etwa der Genexpression oder des Klimawandels. Dieser Ansatz verhalf auch schon zu neuen Konzepten über den Computer im Kopf unserer Kinder.

Die Modelle vereinen zwei Grundideen. Zum einen beschreiben sie mit mathematischen Mitteln die Hypothesen, die ein Kind vielleicht über Dinge, Menschen oder Wörter hat. Sein Kausalwissen lässt sich etwa grafisch in einem Plan aufzeichnen, bei dem zusammenhängende Ereignisse mit Pfeilen verbunden sind. Für das Spiel mit der Ente und der Puppe führte dann ein Pfeil von dem Feld »blauen Hebel drücken« zu dem Feld »Ente taucht auf«.

Diese Computerprogramme leisten es zum anderen, die Hypothesen auf Ereigniswahrscheinlichkeiten und deren verschiedene Muster zu beziehen, so wie sie sich beim Experimentieren ergeben oder bei wissenschaftlichen statistischen Analysen. Passendere Hypothesen gewinnen dabei an Gewicht. Ich glaube, dass im Gehirn von Kindern im Prinzip Ähnliches abläuft: Auch sie gleichen Hypothesen mit Wahrscheinlichkeitsmustern ab. Das bedeutet, Kinder denken und schlussfolgern

durchaus komplex und scharfsinnig. Sie begnügen sich nicht mit einfachen Regeln und schlichten Assoziationen.

Tatsächlich erfassen Kinder merkwürdige Vorgänge und eigenartige Zusammenhänge mit ihrer unbewussten Statistikanalyse wohl manchmal leichter als Erwachsene. Kürzlich haben meine Kollegen und ich sowohl Vierjährige wie Erwachsene mit einem Blicker-Detektor konfrontiert, der sich sonderbar verhielt: Er ging nur an, wenn man zwei Klötze gleichzeitig drauflegte. Die Kinder begriffen das schneller. Den Erwachsenen war vermutlich ihr Vorwissen im Weg, dass Geräte so normalerweise nicht funktionieren. Da half es auch nicht, dass die Beobachtung dagegen sprach.

Den Forscherdrang und das Statistiktalent von Kindern können andererseits allzu viele Erklärungen hemmen, wenn sie glauben, der Erwachsene zeige ihnen eine Sache ganz genau. Das wiesen wir neulich in einer weiteren Studie bei Vierjährigen nach. Ein Gerät machte Musik, wenn man mehrere Bedienungsschritte in der richtigen Reihenfolge ausführte, wie einen Griff ziehen und dann auf einen Ballon drücken. Zu einigen Kindern sagte die Versuchsleiterin: »Ich weiß nicht, wie das geht. Wir probieren es mal aus.« Dann machte sie mehrere längere Bedienungsfolgen vor. Bei einigen tat sie am Ende die zwei oder drei richtigen Schritte, bei anderen nicht. Als die Kinder dann selbst ans Gerät durften, versuchten viele es gleich mit der richtigen kurzen Folge. Offenbar hatten sie den statistischen Zusammenhang bemerkt und ließen Überflüssiges weg.

Anders ging es jenen Kindern, zu denen die Versuchsleiterin sagte, sie würde ihnen zeigen, wie das Ding funktioniert. Sie würde ihnen falsche und richtige Bedienungssequenzen vormachen. Dann tat sie genau die gleichen Schritte wie im ersten Versuchsteil. Keines dieser Kinder probierte die korrekte kurze Folge. Alle versuchten, ganze lange Sequenzen nachzuahmen. Missachteten sie die Wahrscheinlichkeitsmuster, die sie gesehen hatten? Möglicherweise nicht – denn auch ihre Reaktion beschreibt ein bayessches Modell. Demnach verhält man sich genau so, wenn man glaubt, der andere würde die lehrreichsten Bedienungsfolgen vorführen – nach dem Motto: Hätte die Lehrerin eine kürzere Lösung gekannt, dann hätte sie die vielen umständlichen Handgriffe nicht vorgemacht.

Wenn das Gehirn einen von der Evolution geformten Computer darstellt, sollten wir auch fragen, welchen evolutionären Sinn dieses große Lernvermögen sehr junger Kinder hat und was die neuronale Grundlage dafür ist. Hier passen neuere Konzepte der Biologie gut zu unseren psychologischen Befunden.

Zu den auffälligsten biologischen Besonderheiten des Menschen zählt die extrem lange Kindheit. Warum aber ist unser Nachwuchs so lange dermaßen hilflos und warum müssen wir so viel Mühe und Sorge aufwenden, damit er am Leben bleibt?

Bei vielen Tierarten korrelieren Intelligenz und geistige Beweglichkeit der Erwachsenen mit dem Grad von Unreife der Jungen. Auf der einen Seite verfügen beispielsweise die Küken von so genannten nestflüchtenden Vögeln, etwa Hühnern, über Anlagen, dank deren sie sich in ihrer spezifischen Umwelt zurechtfinden. Die Jungen solcher Arten kommen relativ weit entwickelt zur Welt und werden oft rasch selbstständig. Auf der anderen Seite setzen viele Nesthockerarten, die ihre Jungen lange füttern und betreuen müssen, verstärkt auf Lernen – wie etwa Krähen, die mit ihrer Erfindungsgabe schon oft überrascht haben, zum Beispiel wenn sie sich aus einem Draht ein Werkzeug herstellen.

Arbeitsteilung zwischen Jung und Alt

In der Jugend ausgiebig zu lernen, hat als Lebensstrategie zwar viele Vorteile. Allerdings ist bei solchen Arten ein unerfahrenes Junges eben deswegen noch hilflos und gegenüber Gefahren besonders gefährdet. Als Lösung entstand in der Evolution eine Arbeitsteilung zwischen Eltern und Nachwuchs. Sie gewährt den Kindern eine beschützte Zeit, in der sie die Welt um sich her kennen lernen dürfen, ohne schon Alltagsaufgaben meistern zu müssen. Später können sie das Gelernte zum eigenen Überleben und zur Fortpflanzung nutzen – und es auch bei der Versorgung der nächsten Generation anwenden. In diesem Sinn sind Menschenkinder geradezu zum Lernen geboren.

Manche der Gehirnmechanismen hinter dieser hohen Lernkompetenz verstehen Neurowissenschaftler langsam. Das Gehirn eines kleinen Kindes ist plastischer als das eines Erwachsenen. Es weist zunächst deutlich mehr Verbindungen zwischen Nervenzellen auf. Zwar wirken diese Kontakte meist nicht besonders effizient. Aber mit der Zeit werden ungenutzte Anschlüsse verworfen und viel genutzte Bahnen verstärkt. Das Kleinkindgehirn ist zudem reich an Molekülen zum Umstrukturieren von Neuronenverschaltungen.

Auffallend langsam reift beim Menschen eine bei ihm besonders ausgeprägte Partie des Stirnhirns, der so genannte präfrontale Kortex, also die Großhirnrinde im Stirnbereich. Sich auf etwas konzentrieren, Handlungen planen und effizient durchführen, überhaupt höhere kognitive Leistungen gehen von dort aus. Die Grundlage dafür schafft die lange Lernphase in Kindheit und Jugend. Vielleicht sind die



Verschaltungen in diesem Hirnteil erst im Alter von Mitte 20 einigermaßen komplett.

Die mangelhafte Kontrolle durch den präfrontalen Kortex bei jungen Kindern mag als ein großes Manko erscheinen. Doch dieses Handicap dürfte dem Lernen immens zugutekommen. Schließlich hat das genannte Stirnhirngewebe später auch die Aufgabe, gerade unwichtige und nebensächliche Gedanken oder Handlungen zu unterdrücken. Ohne derartige Hemmungen erforscht sich die Welt vermutlich viel unvoreingenommener.

Somit muss das Gehirn zwischen zwei Kompetenzen lavieren, die anscheinend schlecht zusammenpassen: Einerseits muss unser Denkorgan gute Voraussetzungen für kreatives Forschen und Flexibilität beim Lernen bieten, andererseits kluges Planen und erfolgreiches Handeln gewährleisten. Ersteres können Kinder, Letzteres Erwachsene besser. Effizientes Handeln erfordert unter anderem eine rasche automatisierte Verarbeitung durch eingespielte Netzwerke. Dass dies der für leichtes Lernen nötigen Flexibilität offenbar im Weg steht, mag intrinsische Gründe haben.

Die Studien der letzten zehn Jahre zeichnen ein neues Bild von Kindheit und Natur des Menschen. Babys und Kleinkinder sind durchaus nicht unvollkommene Erwachsene. Vielmehr hat die Evolution gerade sie bestens mit Ideenreichtum, Forscherdrang und Lernbereitschaft ausgestattet sowie mit einem hohen Talent, sich auf neue Gegebenheiten rasch einzustellen. Diese genuin menschlichen Eigenschaften treten bei Kindern in ihrer reinsten Form auf. Die kostbarsten menschlichen Errungenschaften kamen nicht trotz unserer hilflosen Abhängigkeit in den ersten Lebensjahren auf, sondern gerade wegen ihr. Kindheit und elterliche Fürsorge bilden das Fundament des Menschseins. ◀

In einem so genannten Blicket-Detektor blinken die Lampen bei manchen Farbkombinationen der Würfel öfter auf als bei anderen. Vierjährige durchschauen solche statistischen Zusammenhänge oft leichter als Erwachsene, besonders bei ungewohnten Erscheinungen.



Alison Gopnik hat an der University of California in Berkeley eine Professur für Psychologie und eine außerordentliche Professur für Philosophie inne.

Gopnik, A. et al.: Forschergeist in Windeln. Wie Ihr Kind die Welt begreift. Ariston, München 2000.

Gopnik, A.: Kleine Philosophen. Was wir von unseren Kindern über Liebe, Wahrheit und den Sinn des Lebens lernen können. Ullstein, Berlin 2009.

Gopnik, A., Shulz, L. (Hg.): Causal Learning: Psychology, Philosophy and Computation. Oxford University Press, 2007.

Bayesian Networks, Bayesian Learning and Cognitive Development. Sonderteil in: Developmental Science 10(3), S. 281–364, Mai 2007.

Babys verstehen und fördern. Gehirn&Geist-Serie Kindesentwicklung 1/2007.

Was Kleinkinder brauchen. Gehirn&Geist-Serie Kindesentwicklung 2/2008.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/1044187.

1960

Vom Maser zum Laser

»Seit einigen Jahren hat der sogenannte Maser (Abkürzung für: microwave amplification by stimulated emission of radiation) eine stürmische Entwicklung erlebt. Mit der Pumpfrequenz wird Strahlungsenergie in den Kristall hi-

neingepumpt, die dann diesen befähigt, eine Welle der eigentlichen Arbeitsfrequenz zu verstärken. Diese Versuche konnten zu immer kürzeren Wellen ausgedehnt werden, bis es jetzt gelang, ins Infrarot und sogar zum roten Licht (Wellenlänge weniger als 1/1000 mm) vorzudringen. Auch hier erwiesen sich künstliche Rubine als besonders geeignete Kristalle. Als Hilfs-Strahlenquelle verwendet man grünes Licht. Man bezeichnet diese Vorrichtung als Laser.« *Kosmos*, 57. Jg., Hefi 10, Oktober 1960, S. 374

Technik ist an Neurosen schuld

»An einer Neurose leiden heute in den hochindustrialisierten Staaten ungefähr zehn Prozent der Bevölkerung. Wenn hinsichtlich der Entwicklungsländer auch zuverlässige statistische Daten fehlen, so spricht doch alles dafür, daß neurotische Entwicklungen noch häufiger auftreten, ganz ähnlich wie in Europa mit dem Eindringen der Technik in den Alltag, und der Entstehung der Großstädte, Hysterien und andere Erkrankungen auftraten.« *Deutsche Medizinische Wochenschrift*, 85. Jg., Nr. 44, 28. Okt. 1960, S. 1950

Metallisieren ohne Grenzen

»Ein neues Verfahren, Gegenstände mit Metallüberzügen zu versehen, hat Schoop ausgebildet. Das als dünner Faden aus einem Haarröhrchen austretende geschmolzene Metall wird in einem Strom auf 20 Atm. gespannten Gases geführt, zerstäubt und auf eine beliebig gestaltete Fläche geschleudert. Der so hergestellte Metallüberzug hat höhere Zugfestigkeit als ein gegossener und ist vollständig dicht. Das Verfahren bietet dem Galvanisieren gegenüber den Vorteil, daß der zu überziehende Körper nicht leitend und beliebig groß sein kann. Die Schichtstärke läßt sich von 1/50 mm bis zu mehreren Millimetern variieren.« *Haustechnische Rundschau*, 15. Oktober 1910, Heft 8, S. 88

Der Schweizer Ingenieur M. U. Schoop erfand das Basisverfahren des thermischen Spritzens von Oberflächen (die Red.).

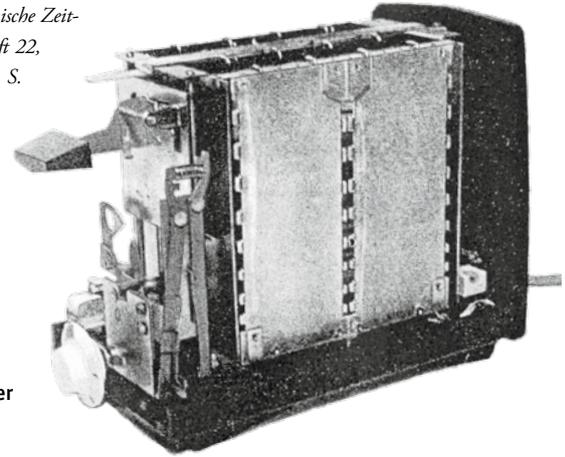
Neue alte Rechtschreibung

»Die Anatomen schreiben Skelet mit einem ›t‹ und erklären dies für allein richtig, da das Wort in seiner griechischen Heimatsprache so geschrieben werde. Doch ist das Wort längst im Deutschen eingebürgert und zeigt gerade durch sein Doppel-›t‹, daß es sich unserer Gewohnheit, solche Endungen zu schreiben, anbequem hat. Unter diesen Umständen ist das Verlangen, man solle jetzt wieder zu der gelehrten Schreibweise zurückkehren, genau so unberechtigt, wie wenn man uns die französische und englische Schreibweise ›theatre‹ aufdrängen wollte, weil es so dem Griechischen und Lateinischen näher kommt.« *Die Umschau*, 14. Jg., Nr. 41, 8. Oktober 1910, S. 818

Brotrösten leicht gemacht

»Auch in Deutschland gewinnen immer mehr Menschen Geschmack an geröstetem Weißbrot. Zum Rösten verwendet man vorwiegend elektrisch beheizte Geräte, wobei die einfachen Ausführungen mit handbetätigtem Wender einige Aufmerksamkeit verlangen. Jeder weiß aus eigener Erfahrung, wie leicht die Scheiben verkohlen, wenn man den Röster auch nur kurze Zeit zu beobachten vergißt. Die Rowenta-Metallwarenfabrik GmbH, Ofenbach a. M. entwickelte einen formschönen Röst-Automaten. (Er) toastet zwei Scheiben Brot von beiden Seiten hell-, mittel- bis dunkelbraun, je nach Einstellung des Drehknopfes, der auf fünf Stufen eingestellt werden

kann.« *Elektrotechnische Zeitschrift B*, Bd. 12, Hefi 22, 31. Oktober. 1960, S. 551



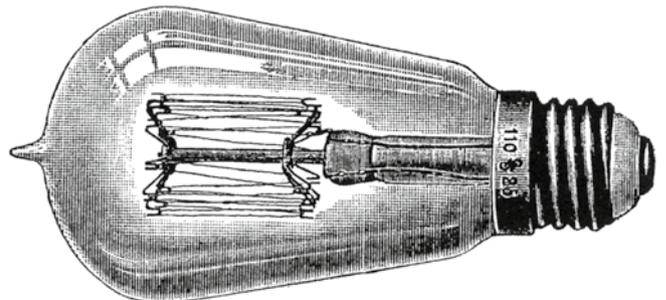
Nie mehr verkohlter Toast: der neue Brotröst-Automat

Es werde Licht

»Die Tatsache, daß das Wolfram als Lichtträger in der Lampe infolge seines höheren Schmelzpunktes höher belastet werden darf als Tantal, gab der Firma Siemens & Halske A.-G. Veranlassung, sofort zu versuchen, ob es nicht möglich sei, auch ziehbares Wolfram herzustellen. Erst im Herbst 1908 gelang es nach eifrigen Versuchsarbeiten, eine Wolframlampe herzustellen, deren Leuchtfaden wie bei der

1910

Tantallampe aus einem einzigen gezogenen Draht besteht. Diese neue Wolframdrahtlampe kommt nunmehr unter dem Namen: ›Wotan-Lampe‹ neben der Kohlefadenlampe und der Tantallampe auf den Markt. Bezüglich der Stromersparnis ist (sie) der Tantallampe überlegen.« *Der Mechaniker*, Nr. 19, 5. Oktober 1910, S. 223–223



Frühe Energiesparlampe – eine Glühbirne mit Wolframwendel

EXPONAT DES MONATS

Sixtinische Kapelle der Steinzeit

Die Höhle von Altamira im Deutschen Museum

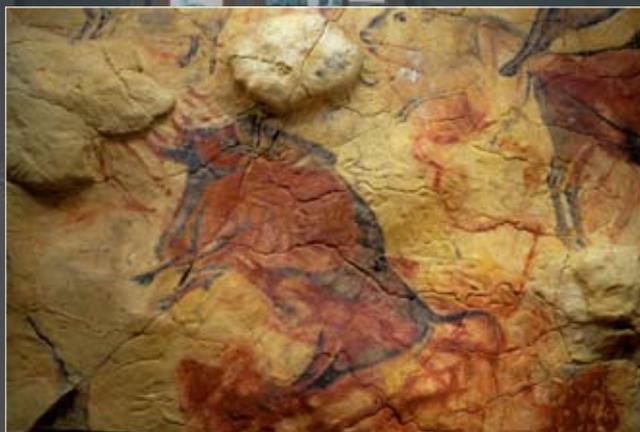
Wer den schmalen Gang betritt, wird jäh verschluckt von der Dunkelheit. Wasser tropft irgendwo, die Luft fühlt sich feucht und kühl an. Sekunden später findet sich der Besucher in einer Höhle wieder, es braucht nur ein wenig Fantasie.

Aus dem Dunkel schälen sich Farben – Rottöne vor allem, über das ganze Dachgewölbe verteilt. Es dauert eine Weile, bis das Auge sich an das Dämmerlicht gewöhnt hat. Bisons treten allmählich hervor, ein Pferd und auch andere Tiere, die am Ende der letzten Eiszeit vor 15 000 Jahren in unseren Breiten lebten. Sicher nicht, um Kunst in unserem Sinn zu schaffen, sondern vermutlich im Zuge schamanistischer Rituale haben die Jäger jener Zeit sie an die Decken von Höhlen gemalt.

Vor 50 Jahren wurde dieses Replikat steinzeitlicher Deckenmalerei im Deutschen Museum angefertigt. Die Originale befinden sich in der Höhle von Altamira nahe der Stadt Santillana del Mar (Spanien). Entdeckt hat sie 1879 die achtjährige Tochter des Privatgelehrten Marcelino Sanz de Sautuola, dem der Grund und Boden gehörte, auf dem sich die Höhle befand. Obwohl man bis dahin noch keine Felsmalerei dieser Art kannte, datierte er sie recht genau in das Ende der Altsteinzeit. Doch erst nach 1895, als in anderen, vorwiegend französischen Höhlen weitere Bilder gefunden wurden, schlossen sich Experten dieser Meinung an.

Die Atemluft der zahlreichen Besucher setzten den Bildwerken zu, so dass die Höhle von Altamira 1979 für die Allgemeinheit geschlossen wurde. Ab 2011 soll sie wieder geöffnet werden – eine umstrittene Entscheidung, zumal es Alternativen gibt: Kopien des Deckengewölbes. Die erste wurde 1962 im Deutschen Museum ausgestellt, sie zeigt einen Ausschnitt der so genannten Vorhalle. Ein Abguss davon ging zwei Jahre

Vor 15 000 Jahren bannten Menschen ihre Lebenswelt auf die Decke der Höhle von Altamira (Spanien). Zu den häufigsten Motiven gehören die Bisons. Für das Deutsche Museum wurde ein Teil der Decke berührungsfrei vermessen und nachgebildet.



BEI DER FOTOS: DEUTSCHES MUSEUM

später an das Archäologische Museum in Madrid. Und seit 2002 ist etwa 500 Meter von der Originalhöhle entfernt eine Kopie der gesamten Vorhalle zu besichtigen.

Da ein direkter Abguss die empfindlichen Farbschichten beschädigt hätte, wurde die Decke fotogrammetrisch vermessen: Anhand von Aufnahmen aus mehreren Blickwinkeln entstand eine Art Karte mit Höhenlinien. Diesen haben die Museumstechniker in ein Gipsmodell umgesetzt, davon eine Negativform in Silikonkautschuk gegossen und damit das Deckenrelief in Steinguss hergestellt.

Das wurde dann originalgetreu mit Ockererden und Kohleschwarz bemalt. Wer Schaukästen und andere Informations-elemente um sich herum vergisst und ganz in der Betrachtung der Decke versinkt, kann nur staunen, wie kunstfertig unsere Vorfahren ihre Lebenswelt darstellten. Manche Tiere wurden in das Gestein geritzt, andere einfarbig gemalt, die meisten Bisons durch Abstufungen von Ockertönen und Schwarz plastisch modelliert. Indem sie manche Tiere auf Hervorwölbungen des Gesteins malten, verliehen ihnen die steinzeitlichen »Künstler« zusätzliche Körperlichkeit.

Die Autorin **Sabrina Landes** leitet die Redaktion der Zeitschrift »Kultur & Technik« des Deutschen Museums.

Der UNERKANNTE BAUSTEIN der Erde

Die Entdeckung eines neuen Minerals mit hoher Dichte lässt den Erdmantel weitaus unruhiger erscheinen als bislang vermutet. Daraus ergeben sich aufregende Schlussfolgerungen für die Erdgeschichte.

Von Kei Hirose

Das tiefste jemals von Menschen gebohrte Loch reicht auf der russischen Halbinsel Kola zwölf Kilometer hinab. Während sich ein Raumfahrzeug auf dem Weg zum rund sechs Milliarden Kilometer von der Sonne entfernten Pluto befindet, können wir immer noch keine Sonde ins Erdinnere schicken. De facto ist das nur 6380 Kilometer unter unseren Füßen gelegene Zentrum unseres Planeten also weiter entfernt als der Rand des Sonnensystems. Bezeichnenderweise wurde die Existenz des inneren Erdkerns anhand seismischer Wellen erst 1930 bewiesen – sechs Jahre nach der Entdeckung Plutos.

Dennoch haben die Geowissenschaftler eine erstaunliche Fülle von Erkenntnissen über das Innere unseres Planeten zusammengetragen. Aufgebaut ist er ähnlich wie eine Zwiebel, wobei Kern, Mantel und Kruste Kugelschalen bilden. Auf die mittlere davon, den Erdmantel, entfallen etwa 85 Prozent des Volumens. Mit seinen langsamen Umwälzbewegungen – Physiker sprechen von Konvektionsströmen – staucht und dehnt er die Kruste, drückt sie empor und zieht sie an anderen Stellen nach unten, legt sie in Falten und zerbricht sie. Chemisch besteht er aus Silizium, Eisen, Sauerstoff und Magnesium, die in annähernd konstantem Mengenverhältnis im gesamten Mantel vorkommen – gemeinsam mit geringeren Mengen anderer Elemente. Je nach der Tiefe bilden sie allerdings unterschiedliche Mineralarten. So ist der Mantel selbst wiederum in mehrere konzentrische Schalen unterteilt, in denen jeweils andere Minerale vorherrschen.

Von den meisten sind Eigenschaften und Zusammensetzung seit Jahrzehnten recht gut

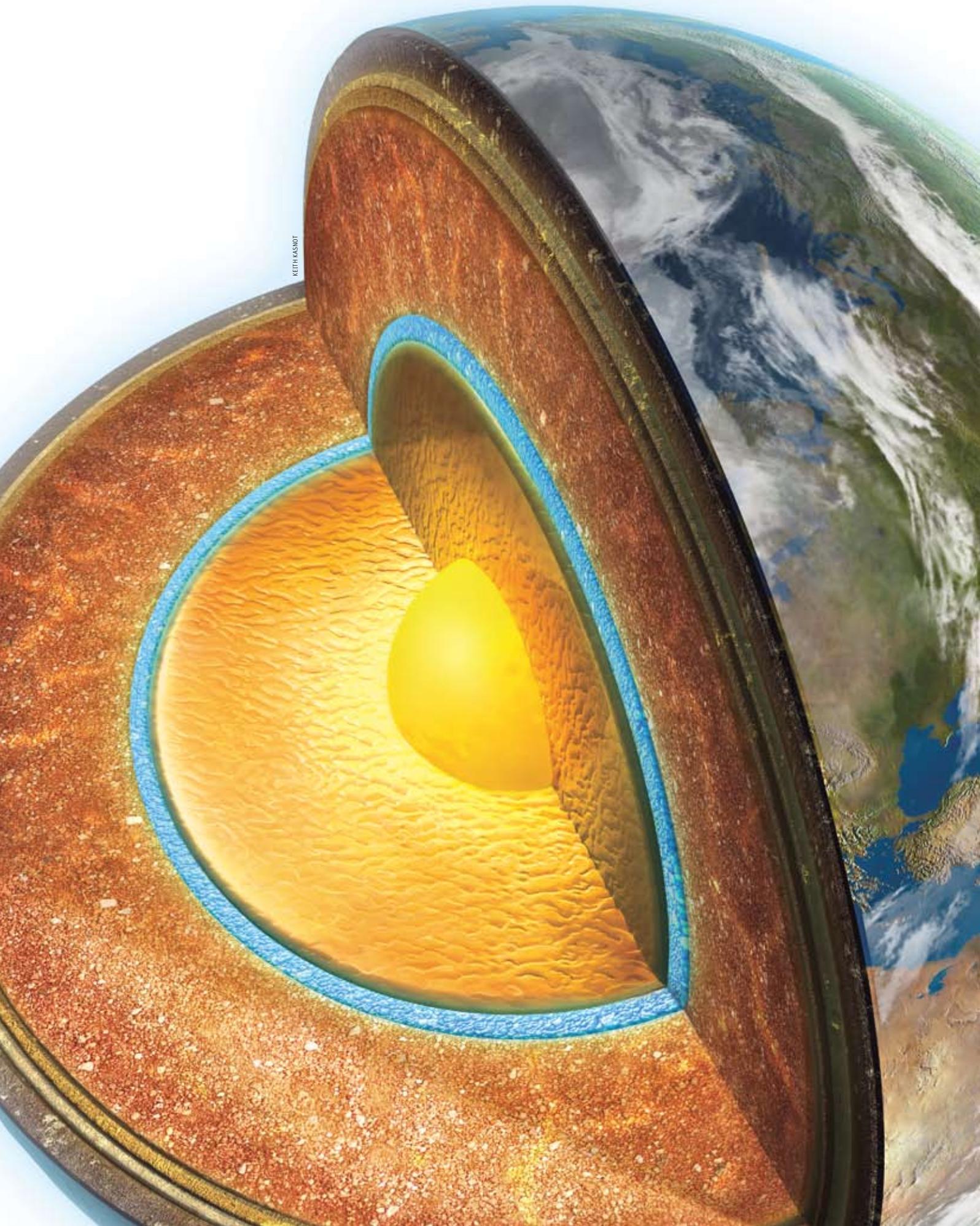
bekannt. Nur die tiefste Schicht gab bis vor Kurzem Rätsel auf. Erst 2002 löstete die Synthese eines neuen, extrem dichten Minerals, das sich bei den Temperaturen und Drücken in den untersten 300 Kilometern des Mantels bildet, das Geheimnis. Untersuchungen seither zeigten, dass dieses Mineral – der so genannte Postperowskit – die Dynamik der Erde entscheidend beeinflusst. Seine Existenz spricht für kräftigere Konvektionsströme im Mantel, mit denen kälteres Gestein in die Tiefe wandert, während heißes aufsteigt. Dadurch wird mehr Wärme aus dem Erdinneren abgeführt als zuvor gedacht. Ohne Postperowskit wären die Kontinente langsamer gewachsen, und es hätte weniger Vulkanismus gegeben. Seine Bildung dürfte auch die Entstehung des Erdmagnetfelds beschleunigt haben, das die Erdoberfläche gegen kosmische Strahlung und Solarwind abschirmte und so erst das Leben an Land ermöglichte. Der Postperowskit bildet demnach einen entscheidenden Mosaikstein im Gesamtbild der Erdentwicklung und trägt wesentlich zu ihrem Verständnis bei.

Einblicke in die Tiefe

Geophysiker ermitteln die innere Struktur der Erde, indem sie seismische Wellen vermessen. Diese laufen nach einem Erdbeben quer durch den Globus und lassen sich mit empfindlichen Instrumenten auf der gegenüberliegenden Seite registrieren. Stoßen Erdbebenwellen an eine Materialgrenze, werden sie gebrochen oder reflektiert, wodurch sich ihre Ausbreitungsgeschwindigkeit und

In Kürze

- ▶ **Der häufigste Mineraltyp** des unteren Erdmantels ändert bei hohem Druck, wie er nahe der Grenze zum Erdkern vorliegt, seine Struktur und wird dichter.
- ▶ Aus der Existenz dieser dichteren Phase ergibt sich, dass **der Erdmantel** dynamischer ist und Wärme effizienter transportiert als lange angenommen.
- ▶ **Der raschere Wärmetransport** hilft zu erklären, warum Kontinente so schnell gewachsen sind und sich das Erdmagnetfeld sehr früh schon so verstärkte, dass es den Sonnenwind und die kosmische Strahlung abschirmte, was dem Leben erlaubte, an Land zu gehen.



KETH KASNOT

EIN KOMPLEXERER PLANET

Die Erde hat eine Zwiebelstruktur mit Schalen, die aus jeweils anderen Stoffen aufgebaut sind. Mit der Entdeckung eines neuen, äußerst dichten Materials im Labor des Autors lässt sich die Natur einer bislang rätselhaften Schicht dieser Zwiebel erklären, deren Existenz aus Messungen der Fortpflanzung von Erdbebenwellen durch den Globus erschlossen worden war.

KRUSTE (BIS 35 KILOMETER TIEFE)

Die Kontinente bestehen aus verschiedenen Gesteinen, die bis zu mehrere Jahrmilliarden alt und relativ leicht sind. Daher schwimmen sie auf dem dichteren, darunterliegenden Mantel. Bei dem gleichförmigen, basaltischen Gestein der ozeanischen Kruste handelt es sich hingegen um Mantelmaterial, das an untermeerischen Bergrücken austritt, zum Rand eines Kontinents wandert und dort – in der Regel nach spätestens 200 Millionen Jahren – in den Mantel zurücksinkt.

MANTEL

Mantelgestein setzt sich vorwiegend aus Verbindungen der Elemente Sauerstoff, Silizium und Magnesium zusammen. Zwar ist es großenteils fest, doch verformt es sich innerhalb geologischer Zeiträume. Dabei fließt es langsam in Form von so genannten Konvektionsströmen, die den gesamten Mantel umwälzen. Diese Ströme führen Wärme aus dem Erdinneren ab und treiben die Kontinentaldrift an.

OBERER MANTEL (35 – 660 KILOMETER)

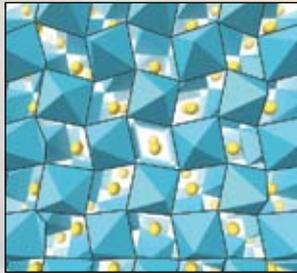
Da Druck und Temperatur mit der Tiefe zunehmen, entstehen Schalen, in denen die atomaren Bestandteile des Mantels unterschiedlich arrangiert sind, also jeweils andere kristalline Verbindungen bilden. Die Schichten des oberen Mantels sind nach den dort vorherrschenden Mineralen – Olivin, Wadsleyit und Spinell – benannt.

UNTERER MANTEL (660 – 2900 KILOMETER)

Der untere Mantel wurde jahrzehntelang für relativ einheitlich strukturiert gehalten. Seismologische Daten deuteten allerdings darauf hin, dass sich an seiner Basis eine gesonderte Schicht befindet.

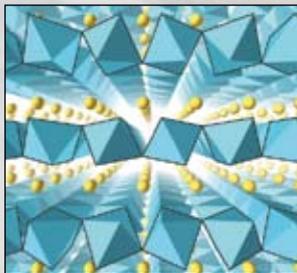
•PEROWSKIT-SCHICHT

Sie besteht zu 70 Prozent aus Magnesiumsilikat ($MgSiO_3$), das in einer sehr kompakten Kristallstruktur vorliegt, die für Minerale vom Perowskit-Typ charakteristisch ist. Darin sind die Magnesiumionen (gelb) von oktaedrischen Silizium-Sauerstoff-Gruppen (blaue Doppelpyramiden) umgeben. Bis vor Kurzem hielten Wissenschaftler eine dichtere kristalline Packung dieser Elemente für unmöglich.



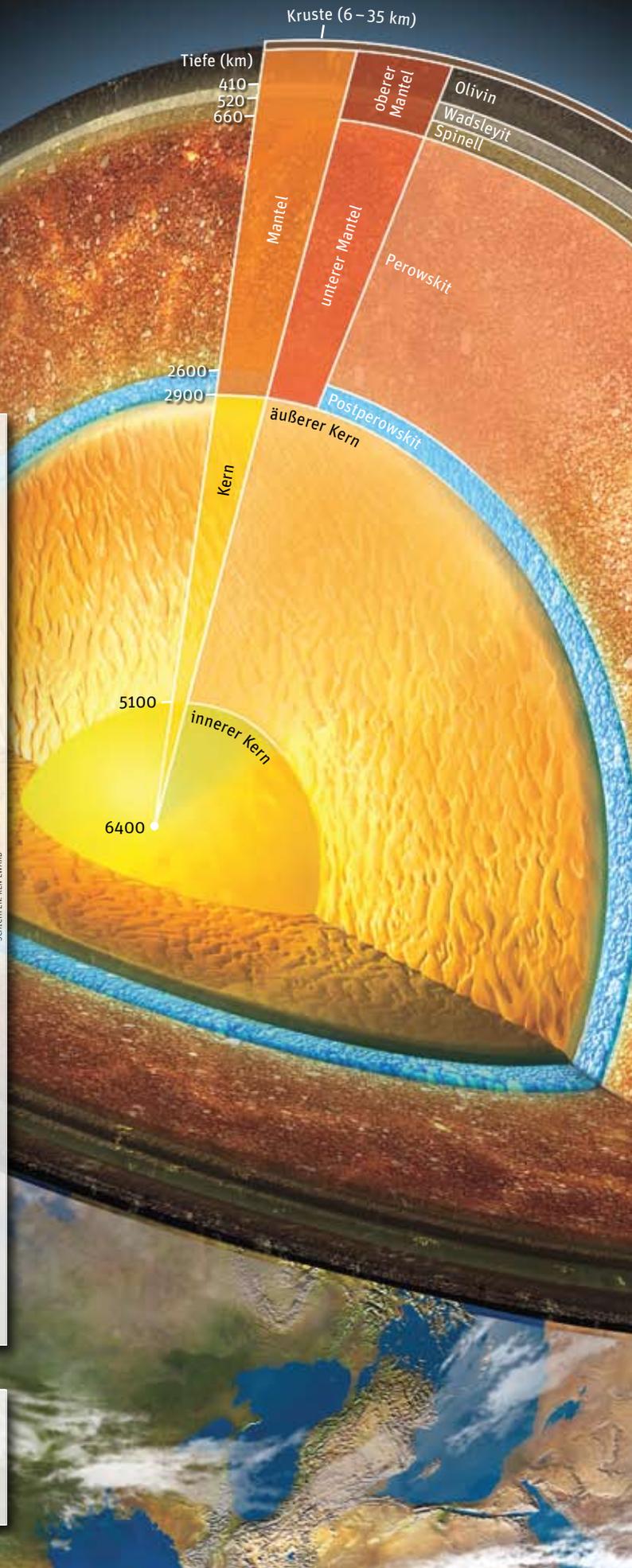
•POSTPEROWSKIT-SCHICHT

Bei Drücken und Temperaturen, wie sie in den untersten 300 Kilometern des Mantels herrschen, verwandelt sich Perowskit in ein Material mit anderer Struktur. Darin sind die Magnesiumionen und die Silizium-Sauerstoff-Gruppen in getrennten Schichten angeordnet. Der Übergang ist mit der Abgabe von Wärme verbunden und reduziert das Volumen um etwa 1,5 Prozent – ein geringfügiger Unterschied, der aber erhebliche Auswirkungen auf den gesamten Planeten hat.



KERN (2900 – 6400 KILOMETER)

Die tiefste Region der Erde enthält vorwiegend Eisen, das ein viel höheres spezifisches Gewicht hat als das Mantelgestein. Es ist im äußeren Kern flüssig und im inneren fest. Durch Konvektionsströmungen wird der äußere Kern genauso umgewälzt wie der Mantel – allerdings wesentlich schneller. Diese Konvektion erzeugt nach allgemeiner Ansicht über einen Dynamoeffekt das Erdmagnetfeld.



-richtung sprunghaft ändern. Durch weltumspannende Messungen ihrer Laufzeiten ließen sich so im Mantel fünf Schalen nachweisen, deren Gestein wegen der höheren Drücke und Temperaturen in zunehmender Tiefe jeweils anders aufgebaut ist.

Gesteine bestehen aus verschiedenen Mineralen. Diese haben charakteristische Kristallstrukturen, in denen die Atome in einem festen geometrischen Muster angeordnet sind. Minerale eines Typs stimmen deshalb in Zusammensetzung, Farbe und physikalischen Eigenschaften überein. Im Erdmantel zwingen steigende Drücke und Temperaturen die Elemente, sich unterhalb gewisser Tiefen jeweils in neuen Kristallstrukturen anzuordnen. Physiker sprechen von Phasenumwandlungen.

Da Geologen keine Proben aus dem Erdinneren entnehmen können, mussten sie früher, um Informationen über die dortigen Materialien und Strukturen zu erhalten, nach Brocken von Mantelgesteinen suchen, die aufsteigendes Magma aus großen Tiefen an die Oberfläche befördert hatten. Diese enthalten oft Diamanten, die sich nur unter Drücken und Temperaturen bilden, wie sie in mindestens 150 Kilometer Tiefe herrschen. Deshalb sind ihre Muttergesteine in einem ähnlichen Tiefenbereich zu vermuten und liefern wertvolle Aufschlüsse über den obersten Teil des Mantels. Die vorherrschenden Minerale dort sind demnach Olivin, Wadsleyit (»modifizierter Spinell«) und Spinell. Nach ihnen wurden die betreffenden Schichten benannt.

Gesteinsmaterial aus mehr als 200 Kilometer Tiefe erreicht die Oberfläche nur selten. Als es aber vor über 40 Jahren gelang, auch im Labor extrem hohe Temperaturen und Drücke zu erzeugen, konnten die Forscher endlich diejenigen Minerale künstlich herstellen, die sie in den unteren Bereichen des Mantels vermuteten. Demnach bildet ab einer Tiefe von 660 Kilometern eine dichte Form von Magnesiumsilikat (MgSiO_3) den Hauptbestandteil des Gesteins. Es gehört zur großen Kristallfamilie der Perowskite. Darin werden negativ geladene Sauerstoffatome und zwei Typen positiv geladener Ionen – in diesem Fall Magnesium und Silizium – durch elektrostatische Anziehung in einem geometrisch recht einfachen Gitter zusammengehalten. Pe-

rowskite können in ihrer chemischen Zusammensetzung stark variieren. Supraleiter gehören ebenso dazu wie Materialien, die in vielen Bereichen der Elektronik Verwendung finden, etwa in piezoelektrischen Antrieben oder in Kondensatoren.

Magnesium-Silikat-Perowskit wurde erstmals 1974 synthetisiert – bei einem Druck von 30 Gigapascal. (Ein Gigapascal entspricht etwa dem 10 000-fachen Atmosphärendruck in Meereshöhe.) In den folgenden drei Jahrzehnten glaubten alle Experten, dieses Mineral sei bis zur Basis des Mantels in 2900 Kilometer Tiefe vorhanden. Eine weitere Phasenumwandlung finde nicht mehr statt.

Eine rätselhafte Anomalie

Doch schon in den 1960er Jahren war eine seismische Anomalie in rund 2600 Kilometer Tiefe entdeckt worden. Sie unterteilt den unteren Mantel, auch D-Schicht genannt, in zwei Schalen: D' und D'' (gesprochen: D-Strich und D-zwei-Strich). Dabei reicht die D''-Schicht von 2600 bis 2900 Kilometer, wo sich die Grenze zum äußeren Erdkern befindet. Im Jahr 1983 wurde diese Anomalie als Diskontinuität erkannt, an der sich die Eigenschaften des Gesteins sprunghaft ändern. Doch sahen Geologen darin keine Phasengrenze, sondern erklärten sie mit einer Veränderung des relativen Anteils der Elemente im Gestein.

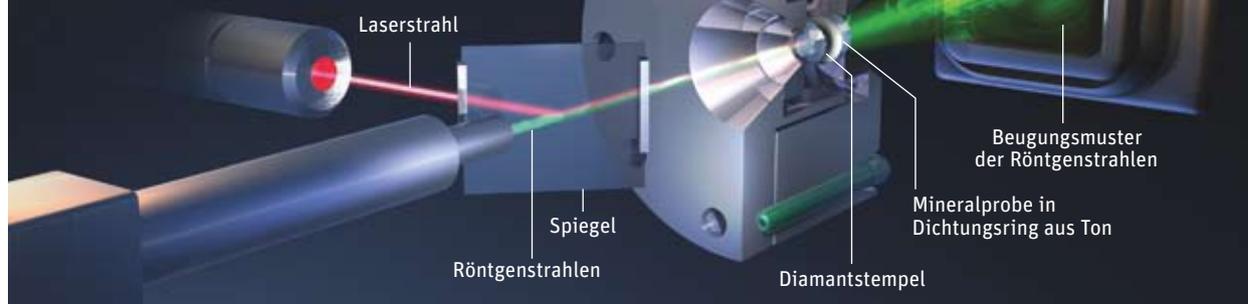
Ein Grund dafür war die »ideale« Kristallstruktur von Perowskit, in dem die Atome geometrisch so dicht gepackt sind, dass die maximal mögliche Masse pro Volumeneinheit erreicht scheint. Nach Meinung der Experten sollte sich dieses Material unmöglich zu einer noch dichteren Struktur zusammenpressen lassen. Allerdings wirkte auch eine sprunghafte Änderung der chemischen Zusammensetzung nicht überzeugend. Durch Konvektion würde der untere Mantel ständig aufgewühlt, wodurch sich seine Bestandteile mit denjenigen der darüberliegenden Schichten vermischen sollten. Eine gleichmäßige Verteilung der verschiedenen Elemente müsste die Folge sein.

Die experimentelle Klärung dieser Frage erforderte Drücke von über 120 Gigapascal und Temperaturen von mehr als 2500 Kelvin. Mitte der 1990er Jahre begann ich mich für das Problem zu interessieren. Später startete ich Laborexperimente mit einer Diamantstempel-Zelle, in der mantelähnliches Material unter hohem Druck zwischen zwei Naturdiamanten von Edelsteinqualität (etwa zwei zehntel Karat) gepresst und dann per Laser erhitzt werden kann (siehe Kasten S. 84).

Oberhalb von 80 Gigapascal beginnt sich aber selbst Diamant – das härteste bekannte Material – deutlich zu verformen. Um den

DAS ERDINNERE IM LABOR

Das Team des Autors hat die Bedingungen im unteren Mantel mit einer Diamantstempel-Zelle nachgeahmt. In dieser zylindrischen Stahlapparatur konzentriert sich der Druck beim Anziehen der Schrauben – was gewöhnlich von Hand geschieht – auf die nur wenige Mikrometer breite Fläche zwischen den Spitzen zweier Diamanten. Der Autor und seine Mitarbeiter erhitzen die dort platzierten Proben per Laser und beobachteten mit einem Röntgenstrahl, wie sich ihre Kristallstruktur veränderte, während Druck und Temperatur auf Werte im unteren Mantel gesteigert wurden.



ALFRED T. KRAMER

Druck weiter zu erhöhen, muss man versuchen, die Spitzen der Diamantstempel so zu formen, dass der Edelstein nicht zerbricht. Dabei erlitten meine Kollegen und ich zahlreiche Fehlschläge, die nicht nur unseren Forschungssetat strapazierten, sondern auch unseren Enthusiasmus hin und wieder auf eine harte Probe stellten. Doch schließlich konnten wir 2001 mit abgeschrägten Diamantstempeln den Grenzwert von 120 Gigapascal überschreiten. Wir waren eines der ersten Forscherteams auf der Welt, denen dies gelang, und das erste, das die Auswirkungen solcher Drücke auf Perowskit untersuchte.

Kristallklare Befunde

Um zu verstehen, was im Inneren unserer Proben passierte, bauten wir unsere Versuchsanordnung im SPring-8 auf. Dieser ringförmige Teilchenbeschleuniger westlich von Osaka (Japan) beherbergt die intensivste Röntgenquelle weltweit. Seit 100 Jahren dienen Röntgenstrahlen dazu, die innere Struktur von Materialien zu ermitteln, da sie an deren Kristallgitter gebeugt werden. Der Grund dafür ist, dass ihre Wellenlänge den Abständen zwischen benachbarten Atomen in Festkörpern entspricht. Die haarfeinen, intensiven Röntgenstrahlen von SPring-8 ermöglichten es uns, qualitativ hochwertige Aufnahmen in Abständen von jeweils nur einer Sekunde anzufertigen – eine große Hilfe, um Veränderungen in der Kristallstruktur bei derart hohen Temperaturen und Drücken festzustellen.

Im Winter 2002 berichtete mir mein Mitarbeiter Motohiko Murakami am SPring-8, dass sich das Beugungsmuster von Magnesi-

um-Silikat-Perowskit stark veränderte, wenn er das Mineral bei einem Druck von 125 Gigapascal erhitze. So etwas deutet gewöhnlich auf einen Phasenübergang hin, bei dem sich eine neue Kristallstruktur bildet – genau das, was ich erhofft hatte. Wenn sich die Beobachtung meines Mitarbeiters bestätigte, wäre es die bedeutendste Entdeckung in der Hochdruck-Mineralogie – und vielleicht in der gesamten Forschung über das Erdinnere – seit 1974, als Magnesium-Silikat-Perowskit selbst erstmals synthetisiert wurde.

Zunächst nahm ich die Sache allerdings nicht allzu ernst, denn es gibt viele Gründe, warum sich Beugungsmuster verändern. So können Proben chemisch mit dem Material reagieren, das sie im Stempel hält – in der Regel Ton. Auch als ich einige Tage später im engsten Kollegenkreis von der Beobachtung berichtete, war die Reaktion eher skeptisch. »Ihr müsst etwas falsch machen«, meinte ein Kristallograf. Schließlich habe Perowskit ein ideales, dicht gepacktes Kristallgitter, und keine Phasenumwandlung in eine kompaktere Struktur sei jemals zuvor festgestellt worden.

Wir wiederholten die Experimente viele Male, wobei wir – was uns ermutigte – stets das neu entdeckte Beugungsmuster beobachteten. Auch stellten wir fest, dass sich dieses Muster wieder in das von Perowskit verwandelte, wenn wir die Probe bei niedrigem Druck erneut erhitzen. Also war der Übergang reversibel, was eine Änderung in der chemischen Zusammensetzung der Probe ausschloss. Von diesem Zeitpunkt an glaubte ich fest daran, dass wir Magnesium-Silikat-Perowskit in eine neue Struktur umgewandelt hatten.

Von da an glaubte ich fest daran, dass wir Perowskit in eine neue Struktur umgewandelt hatten

Als Nächstes fanden wir heraus, dass der Übergang bei einer Temperatur von 2500 Kelvin nicht erst bei 125, sondern schon bei 120 Gigapascal stattfindet – also exakt unter dem Druck, der in 2600 Kilometer Tiefe herrscht, wo die mysteriöse Diskontinuität in der Ausbreitungsgeschwindigkeit seismischer Wellen festgestellt wurde. Das alte Rätsel schien damit endlich gelöst: Wir hatten eine bisher unbekannte Phasenumwandlung entdeckt und ein neues Material gefunden, aus dem die D''-Schicht hauptsächlich bestehen musste. Dessen Eigenschaften könnten, wie ich sogleich spekulierte, auch bedeutende Konsequenzen für die Dynamik des Erdmantels haben.

Doch bevor wir unsere Arbeit fortsetzten, mussten wir erst die Kristallstruktur der neuen Phase bestimmen. Dies war eine Herausforderung, weil damals noch keine Erkenntnisse über einen druckabhängigen Übergang von Kristallen des Perowskit-Typs vorlagen. Fast ein Jahr lang durchforsteten wir Kristallografiekataloge, um analoge Muster zu unseren Beugungsdaten zu finden – die Suche nach der berühmten Nadel im Heuhaufen angesichts der Existenz von Zehntausenden in Frage kommender Kristallstrukturen. Schließlich ließ ein Kollege von mir, der Chemiker Katsuyuki Kawamura, Ende 2003 während der Weihnachtsferien eine Computersimulation laufen, in der er Magnesium-, Silizium- und Sauerstoffatome hohem Druck aussetzte. Er begann mit zufällig verteilten Atomen bei einer sehr hohen Temperatur. Als er seine virtuelle Probe abkühlte, fing das Material zu kristallisieren an. Daraufhin berechnete Kawamura das Beugungsmuster, das diese Kristallstruktur erzeugen würde. Und siehe da: Es stimmte perfekt mit dem von uns im Experiment beobachteten überein.

Wir wählten den Namen Postperowskit für die neue Phase (von einem Mineral darf man streng genommen erst sprechen, wenn klar ist, dass es auch in der Natur vorkommt). Die gefundene Struktur entspricht im Wesentlichen derjenigen zweier bekannter Kristalle: Uran-eisensulfid (UFeS_3) und Kalziumiridiumoxid (CaIrO_3). Beide sind unter Umgebungsbedingungen stabil. Unseren direkten Messungen zufolge hat Postperowskit eine um 1 bis 1,5 Prozent höhere Dichte als Perowskit.

Seit der Veröffentlichung unserer Ergebnisse im Jahr 2004 haben Forscher auf verschiedenen Gebieten daraus ein faszinierendes neues Bild der vielfältigen Vorgänge im Erdinneren abgeleitet. Unter anderem warf unsere Entdeckung ein neues Licht auf den Wärmestrom vom Erdkern zum Mantel. Der Kern besteht vorwiegend aus Eisen, womit er doppelt so dicht ist wie der Mantel. Deshalb findet an der Grenze zwischen beiden praktisch

keine Vermischung statt. Wärmeübertragung erfolgt also vorwiegend durch Leitung. Während der Mantel reich an radioaktiven Elementen oder Isotopen wie Uran, Thorium und Kalium-40 ist, enthält der Kern wahrscheinlich nur geringe Mengen davon. Seine heutige Temperatur von etwa 4000 bis 5000 Kelvin verdankt er also vorwiegend der Resthitze aus der Entstehungszeit der Erde. Seit er hat er sich durch Abgabe von Wärme an den Mantel allmählich abgekühlt.

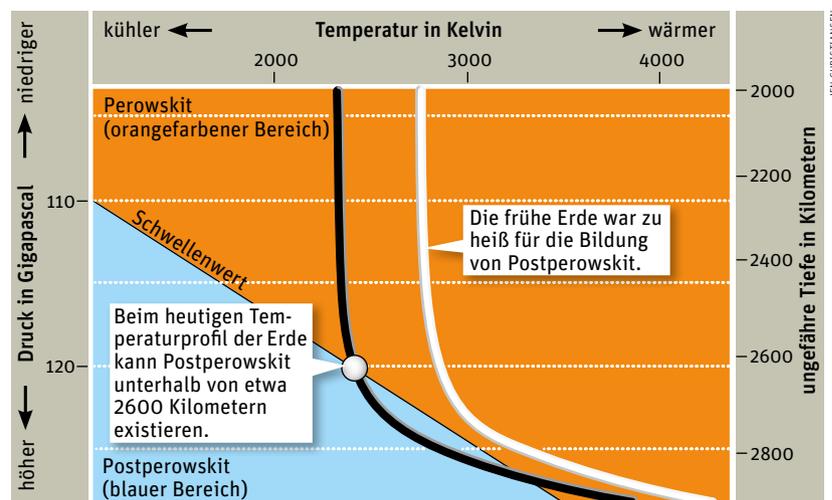
Schnellere Abkühlung des Erdkerns

Mit plausiblen Annahmen über die Wärmeleitfähigkeit des Postperowskits an der Untergrenze des Mantels konnten meine Kollegen und ich den globalen Wärmestrom vom Erdkern in den Erdmantel auf fünf bis zehn Terawatt schätzen. Dieser Wert ist vergleichbar mit der gesamten durchschnittlichen Produktion aller Elektrizitätswerke weltweit. Der Energiefluss wäre damit größer als zuvor angenommen, und der Kern hätte sich schneller abgekühlt. Um seine gegenwärtige Temperatur zu erreichen, muss er folglich anfangs heißer gewesen sein als bisher vermutet.

Der Kern der frühen Erde war durchweg flüssig. Doch irgendwann begann er im Zentrum zu kristallisieren. Dadurch ist er heute zweigeteilt: in einen inneren, festen und einen äußeren, flüssigen Bereich. Die schnellere Abkühlung lässt darauf schließen, dass sich der feste innere Kern erst vor weniger als einer Milliarde Jahren zu bilden begann; denn sonst müsste er viel größer sein, als er heute ist. Er wäre also jung im Vergleich zur Erde selbst, die vor 4,6 Milliarden Jahren entstand.

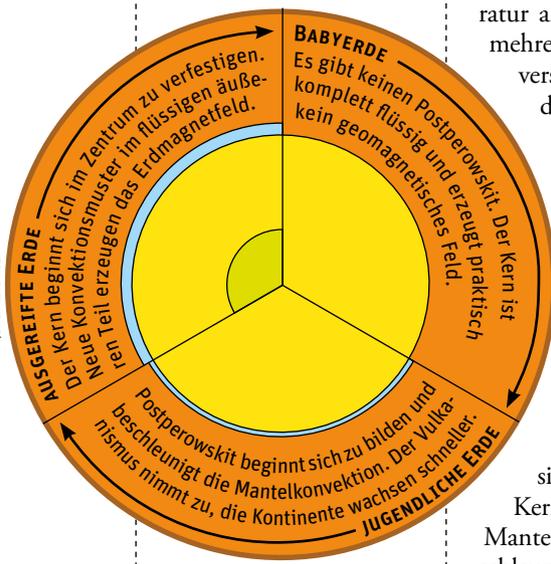
Wann sich der innere Kern entwickelte, hat Folgen für den Geomagnetismus, der sich seinerseits auf das Leben auswirkte. Nach Ansicht der Erdwissenschaftler beruht das Erdmagnetfeld darauf, dass das flüssige Eisen im

Experimentell ließ sich ermitteln, bei welchen Drücken und Temperaturen Perowskit sich in Postperowskit umwandelt (Schwellenwert-Linie). Demnach sind die Temperaturverhältnisse im Erdinneren (schwarze Kurve) heute gerade so, dass Postperowskit an der Untergrenze des Mantels in Tiefen zwischen 2600 und 2900 Metern vorkommt. Die frühe Erde war dagegen zu heiß (weiße Linie) für die Bildung des Minerals.



EVOLUTION VON MANTEL UND KERN

Als sich die Erde bildete, gab es an der Grenze zum heißen, eisenreichen Kern, der vollkommen flüssig war, noch keinen Postperowskit. Da der Mantel wegen ungenügender Konvektion die Hitze nicht effizient abführen konnte, kühlte das Erdinnere nur langsam ab (Babyerde). Die Entstehung von Postperowskit an der Mantelbasis vor etwa 2,3 Milliarden Jahren beschleunigte die Umwälzung des Erdmantels. Das dürfte den Vulkanismus verstärkt haben – und mit ihm das Wachstum der Kontinente (jugendliche Erde). Durch den resultierenden beschleunigten Wärmetransport kühlte der Kern genügend ab, um vor rund einer Milliarde Jahren im Zentrum zu erstarren (ausgereifte Erde). Dadurch wurden die Konvektionsmuster in seiner flüssigen äußeren Schale regelmäßiger und begannen das Erdmagnetfeld zu erzeugen, das die Erdoberfläche vor dem Sonnenwind und kosmischer Strahlung mit ihren schädlichen Auswirkungen auf das Erbgut von Organismen abschirmt – vermutlich die Voraussetzung für den Übertritt des Lebens vom Meer aufs Festland.



geschmolzenen äußeren Kern durch seine konvektive Umwälzbewegung wie ein Dynamo wirkt. Ein fester innerer Kern sorgt für eine gleichmäßigere Konvektion, die ein stärkeres Magnetfeld hervorruft. Dieses Feld schirmt die Erde vor dem Sonnenwind und der kosmischen Strahlung ab, die genetische Mutationen verursachen können und dadurch vor allem für Organismen an Land ausgesprochen gefährlich wären. Vielleicht hat also erst die Verstärkung des Erdmagnetfelds vor rund einer Milliarde Jahren dem Leben die Ausbreitung von den Meeren auf die Kontinente erlaubt.

Postperowskit beeinflusst aber nicht nur den Übergang von Wärme an der Außenseite des Kerns, sondern auch ihren anschließenden Transport durch den Mantel nach oben. Daraus ergeben sich weitere Erkenntnisse zur Erdgeschichte. Unmittelbar oberhalb der Kern-Mantel-Grenze bilden sich so genannte Mantelplumes, in denen Material, das heißer und damit weniger dicht ist als das Umgebungsgestein, unter der Wirkung von Auftriebskräften säulenartig aufsteigt. Dabei gelangt der besonders heiße Postperowskit in Zonen geringeren Drucks und wandelt sich wegen seiner höheren Temperatur schon vor Erreichen der D'-Schicht in Perowskit um. Da dieser weniger dicht ist, gibt das den Plumes zusätzlichen Auftrieb und beschleunigt ihren weiteren Weg nach oben. Computersimulationen zufolge bilden sich, wenn die D"-Schicht aus Postperowskit besteht, mehr Plumes, die stärker mäandrieren, was den Wärmefluss durch den Erdmantel um 20 Prozent steigert.

Aufwühlende Befunde

Durch die Beschleunigung der Konvektion im Mantel erhöht Postperowskit die Temperatur an der Oberseite dieser Erdschicht um mehrere hundert Grad. Das äußert sich in verstärktem Vulkanismus. In der Frühzeit der Erde, als der Kern heißer war, herrschte auch im untersten Teil des Mantels eine höhere Temperatur. Dadurch konnte dort kein Postperowskit entstehen, was den Wärmestrom verringerte. Der obere Mantel war deshalb paradoxerweise kühler als heute. Als die Erde langsam abkühlte, wandelte sich – wahrscheinlich vor etwa 2,3 Milliarden Jahren – ein Teil des Perowskits in Postperowskit um. Dadurch intensivierte sich der Wärmefluss aus dem Kern, und die Temperaturen im gesamten Mantel stiegen, was die Plattenbewegung beschleunigte und den Vulkanismus verstärkte.

Als Folge davon dürften nach Schätzungen einiger Forscher die Kontinente während der letzten 2,3 Milliarden Jahre doppelt so schnell gewachsen sein wie die meiste Zeit davor. Allerdings ist diese Schlussfolgerung durchaus umstritten.

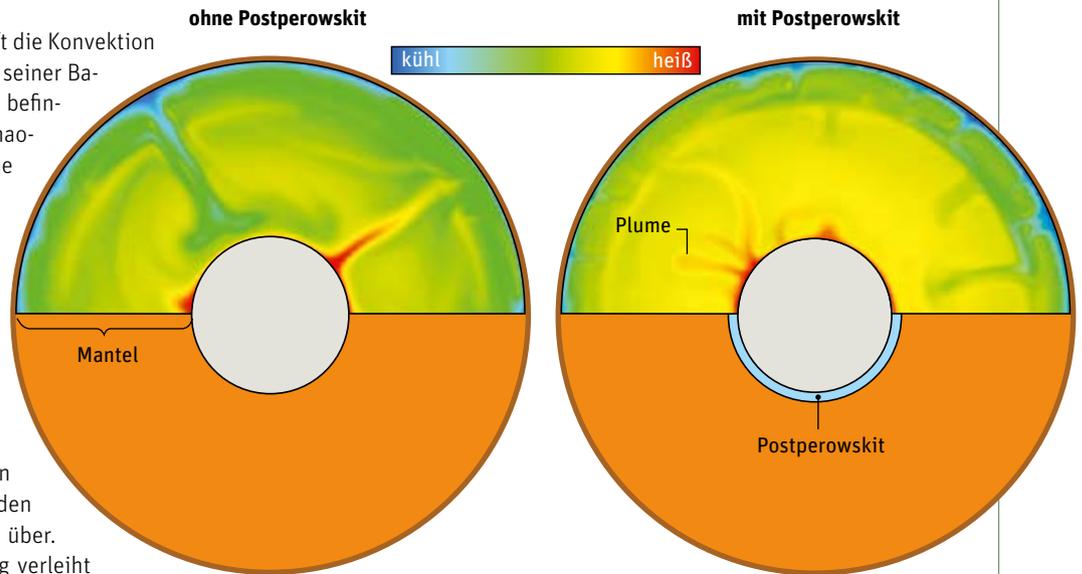
Die physikalischen Eigenschaften der D"-Schicht könnten beträchtlich von denjenigen des darüberliegenden Mantels abweichen. Nach jüngsten Messungen ist zum Beispiel die elektrische Leitfähigkeit von Postperowskit um einige Größenordnungen höher als die von Perowskit. Eine hochleitfähige Schicht im untersten Teil des Mantels würde – als Folge der so genannten Lorentzkraft – bei jeder Änderung des Strömungsmusters im äußeren Kern den Austausch von Drehimpuls zwischen beiden verstärken. Simulationen anderer Forscher zufolge sollte dieser Austausch die Rotationsgeschwindigkeit der Erde um Beträge verändern, die gut mit jenen Schwankungen der Tageslänge im Bereich von Millisekunden übereinstimmen, die auf Zeitskalen von Jahrzehnten zu beobachten sind. Die elektrische Leitfähigkeit von Postperowskit und der resultierende verstärkte Austausch von Drehmoment könnte zum Teil auch erklären, warum die Richtung der Erdrotationsachse mit Perioden unter 20 Jahren schwankt – ein als Nutation bekanntes Phänomen.

Zwar kommt Postperowskit auf der Erde nur in der wenige hundert Kilometer mächtigen Basis des Mantels vor. Bei anderen Planeten aber könnte er größeren Raum einnehmen. Theoretisch ist MgSiO₃-Postperowskit bis zu Drücken von 1000 Gigapascal und Temperaturen von 10 000 Kelvin stabil, bevor er in ein Gemisch aus Siliziumdioxid und Magnesiumoxid zerfällt. Daher sollte er ein Hauptbestandteil der festen Kerne von Uranus und Neptun sein. Bei den Kernen der Riesenplaneten Jupiter und Saturn sorgt dagegen eine dicke Wasserstoffhülle für so hohe Drücke und Temperaturen, dass Postperowskit nicht beständig wäre.

Wie steht es mit anderen Sonnensystemen? Alle bislang beobachteten Exoplaneten sind größer als die Erde. Diejenigen mit weniger als zehn Erdmassen werden für erdähnliche Gesteinskörper gehalten und Supererden genannt. Die Zusammensetzung von Exoplaneten lässt sich aus der Beobachtung der Sterne, um die sie kreisen, erschließen. So zeigen die Absorptionslinien im optischen Sonnenspektrum, dass die Atmosphäre der Sonne in ihrer chemischen Zusammensetzung den Planeten ähnelt. Analog haben Astronomen ermittelt, dass zahlreiche Supererden wahrscheinlich aus ähnlichen Elementen und Verbindungen bestehen wie unsere eigene Erde.

GESTEIGERTE KONVEKTION

Simulationen zufolge verläuft die Konvektion des Erdmantels, wenn sich an seiner Basis eine Postperowskitschicht befindet (rechts), schneller und chaotischer als ohne solch eine Schicht, die bei der frühen Erde fehlte. So wie Luft über heißem Asphalt schlierenartig aufsteigt, bilden sich über dem heißen Erdkern so genannte Plumes aus säulenförmig empordringendem Mantelgestein. Bei ihrem Aufstieg gelangt Postperowskit in Zonen niedrigeren Drucks und geht deshalb in den weniger dichten Perowskit über. Die resultierende Ausdehnung verleiht den Plumes weiteren Auftrieb.



AUS: TAKASHI NAKAGAWA & PAUL J. TACKLEY, »EFFECTS OF A PEROVSKITE-POST PEROVSKITE PHASE CHANGE NEAR CORE-MANTLE BOUNDARY IN COMPRESSIBLE MANTLE CONVECTION«, IN: GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL. 31, L16611, 2004

Bedenkt man die Druck- und Temperaturverhältnisse in ihrem Inneren, könnte bei vielen von ihnen Postperowskit der häufigste Bestandteil sein.

Fortsetzung folgt

Der unterste Bereich des Erdmantels gab lange Zeit Rätsel auf. Seit der Entdeckung von Postperowskit sind viele seiner Eigenschaften gut erklärbar. Dennoch bleiben offene Fragen. So deuten seismische Daten schon seit Langem darauf hin, dass die D"-Schicht nicht einheitlich ist. Vielmehr weist sie zwei markante Verdickungen auf, eine etwa unter Afrika und die andere unter dem Pazifischen Ozean. Handelt es sich vielleicht um zwei Massen, die spezifisch schwerer sind als die Umgebung, aber immer noch leicht genug, um auf dem äußeren Erdkern zu driften – ähnlich wie die Kontinente auf dem äußeren Mantel? Diese »verborgenen Kontinente« könnten die Strömungen an der Mantelbasis und indirekt das Konvektionsmuster im gesamten Mantel beeinflussen – und damit sogar die Plattentektonik an der Erdoberfläche. Wie sind diese Massen entstanden? Wachsen sie derzeit? Hängt diejenige unter dem Pazifik mit dem Mantelplume zusammen, der die Inselgruppe von Hawaii entstehen ließ? Antworten auf diese und ähnliche Fragen lassen sich eventuell schon in naher Zukunft finden.

Dagegen stellt uns der eisenreiche Metallkern immer noch vor Rätsel, die sich wohl nicht so bald lösen lassen. Bis vor Kurzem war er viel schwieriger zu erforschen als der Man-

tel, weil sich die dort herrschenden Drücke und Temperaturen nicht mit der Diamantstempel-Technik reproduzieren ließen. Forscher konnten die hohen Drücke zwar kurzfristig mit der Stoßwellenkompression erzeugen, doch bei dieser Holzhammermethode treten zu hohe Temperaturen auf.

Immerhin ist seit 1952 bekannt, dass die Dichte des flüssigen äußeren Kerns etwa zehn Prozent unter der von reinem Eisen oder einer Eisen-Nickel-Legierung liegt. Es müssen also auch leichtere Elemente wie Schwefel, Silizium, Sauerstoff, Kohlenstoff oder Wasserstoff vorhanden sein. Doch wie soll man sie nachweisen? Die zuverlässigsten Schätzungen der Temperatur im Kern beruhen auf dem Schmelzpunkt von Eisenlegierungen bei einem Druck, wie er an der Grenze zwischen festem und flüssigem Kern herrscht. Sie sind aber mit einer Ungewissheit von mehr als 2000 Kelvin behaftet, weil die Schmelztemperatur stark von der genauen Zusammensetzung abhängt – und die ist bis heute unbekannt. Unklar ist auch noch, welche Kristallstruktur Eisen unter den Bedingungen im inneren Kern hat. Das macht es schwer, seismologische Beobachtungen zu interpretieren.

Jüngst konnten wir aber Diamantstempel herstellen, die den gesamten Druck- und Temperaturbereich des Erdkerns abdecken. Damit ist eine Tür geöffnet, die uns der Lösung der alten Rätsel über den tiefsten Teil unseres Planeten näherbringt. Es wird ein wenig wie eine Reise zum Mittelpunkt der Erde werden, wenn auch nur in unserer Fantasie. ◀



Kei Hirose ist Professor für Hochdruckgeologie an der Technischen Hochschule Tokio. Das Studium der Erdwissenschaft

wählte er einst in der Hoffnung, dass sein Beruf ihn in die Antarktis führen würde oder ihm die Chance gäbe, die Tiefsee per Tauchboot zu erkunden. Heute arbeitet Hirose an der Erzeugung ultrahoher Drücke und Temperaturen im Labor, um so Aufschluss über Materialien im Inneren der Erde und anderer Planeten zu erhalten. Doch seine Reiseträume hat er noch nicht aufgegeben.

Gurnis, M.: Die verbeulte Erde. In: Spektrum der Wissenschaft 5/2001, S. 28–35.

Hazen, R. M.: Perowskite. In: Spektrum der Wissenschaft 8/1988, S. 42–50.

Hirose, K.: Deep Mantle Properties. Science 327, S. 151–152, 8. Januar 2010.

Murakami, M. et al.: Post-Perovskite Phase Transition in MgSiO_3 . In: Science 304, S. 855–858, 7. Mai 2004.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/1044188.



SERIE: NACHHALTIGE MOBILITÄT ELEKTRO- UND HYBRIDANTRIEB (TEIL I)

ZWEI MILLIARDEN AUTOS

China, Indien – die Schwellenländer boomen, und die Automobilhersteller wetteifern darum, sich die neuen Märkte zu erschließen. Innerhalb der kommenden zwei Jahrzehnte dürfte sich die Zahl der Autos weltweit von einer auf zwei Milliarden verdoppeln. Damit aber würden auch die Kohlendioxidemissionen rasant ansteigen – sofern nicht umweltverträglichere Antriebstechnologien auf breiter Front eingeführt werden.



Daniel Sperling lehrt Ingenieur- und Umweltwissenschaften an der University of California in Davis; er ist Gründungsdirektor des UC-Davis-Instituts für Verkehrsstudien. Die Analystin **Deborah Gordon** berät Kommissionen und Regierungen.



Der Beitrag basiert auf dem Buch »Two Billion Cars«, das 2009 bei Oxford University Press erschien. Im November stellen die Autoren

Möglichkeiten vor, den öffentlichen Nahverkehr in Ballungsräumen sinnvoll zu ergänzen.

© Oxford University Press

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/1044189.

Von Daniel Sperling und Deborah Gordon

Seit einem Jahrhundert haben sich Motorfahrzeuge kaum verändert. Sicherlich: Heutige Autos sind zuverlässiger, bequemer, effizienter, leistungsstärker, sauberer und sicherer. Doch sie befördern immer noch meist nur einen Passagier, benutzen die gleiche Technik zum Steuern und Bremsen. Vor allem aber wird die überwiegende Mehrzahl von einer inhärent ineffektiven Technologie angetrieben – dem Viertakt-Verbrennungsmotor, der 1867 von Nikolaus Otto entwickelt und von Karl Benz 1895 zum ersten Mal in ein Auto eingebaut wurde. Bis heute verschwendet er mehr als zwei Drittel des Treibstoffs und stößt für jeden verbrauchten Liter zwei Kilogramm Kohlendioxid aus; Dieselmotoren sind nur wenig besser.

Effizient oder nicht, Autos wurden zum Transportmittel Nummer eins, und unsere Abhängigkeit von ihnen wächst immer weiter. In Deutschland und den USA hat fast jeder, der alt genug dafür ist, einen Führerschein und ein eigenes Auto. In den USA gibt es erstaunlicherweise sogar mehr Autos als Fahrer und mehr als zwei Kraftwagen je Haushalt. Praktisch überall auf der Welt legen Fahrzeuge immer weitere Strecken zurück. Nur zwei Prozent der Amerikaner reisen mit öffentlichen Verkehrsmitteln. Sogar in Ländern, wo das

Benzin teuer ist, das öffentliche Verkehrsnetz hervorragend und die Bevölkerungsdichte sehr hoch wie in Europa, erledigen Autos 80 Prozent aller Transportaufgaben (2008 fuhren in Deutschland 59,6 Prozent der Erwerbstätigen mit einem Pkw zur Arbeit, 13 Prozent nahmen öffentliche Verkehrsmittel, *die Red.*). Das Auto hat seine Konkurrenten schon fast besiegt.

Es ist grotesk: Ein typisches Fahrzeug wiegt bis zu 20-mal so viel wie die Person, die es transportiert, und steht 95 Prozent seiner Lebenszeit nutzlos herum. Vor allem aber: Diese Beförderungsmonokultur verschwendet Rohstoffe und produziert Treibhausgase. Bei einem durchschnittlichen Benzinverbrauch von 12 Litern pro 100 Kilometer für Autos und 18 Litern für Kleintransporter, Minivans und Geländefahrzeuge vernichtet diese Blechlawine in den USA heute mehr als 1,4 Milliarden Liter Erdöl pro Tag. Weil sich weltweit die Anzahl der Pkws von derzeit etwa einer bis zum Jahr 2020 auf zwei Milliarden verdoppeln wird, dürfte die Versorgungslage immer angespannter werden. Dazu kommt die steigende Verschmutzung der Atmosphäre durch Kohlendioxid: Schon heute beträgt der Anteil des Verkehrs an den CO₂-Emissionen 25 Prozent. Es war noch nie offensichtlicher, dass sich etwas grundlegend verändern muss.

Moderne Autos sind die komplexesten Produkte auf dem Endverbrauchermarkt, mit Tau-

TECHNIK & COMPUTER



Jederzeit mobil zu sein, ist eine Voraussetzung moderner Wirtschaft und Industrie, aber auch ein Grundbedürfnis der Menschen in den Schwellenländern. Um den drohenden Verkehrskollaps zu vermeiden, müssten nachhaltige Mobilitätsstrategien entwickelt werden.



KYLE REED (HTTP://KYLEREED.COM)

Optimierung der Motoren verringert den Spritverbrauch nicht, wenn die Autos gleichzeitig schwerer werden (im Bild: ein Stretchlimousinen-Geländewagen, gesehen in Chicago).

senden von beweglichen Teilen. Trotzdem benötigen sie kaum Wartung und halten leicht ein Dutzend Jahre oder länger, trotz schlechter Pflege, aggressiven Fahrstils und rauen Wetters. Die Massenfertigung wurde perfektioniert, die Kosten wurden auf ein Minimum gedrückt und so gut wie alle Mängel ausgemerzt.

Derart ausgereifte Industrien sind leider ziemlich resistent gegenüber größeren Innovationen, behauptet Clayton Christensen in seinem Buch »Innovator's Dilemma«. Das gilt vor allem für die Automobilindustrie, der ihr Massenmarkt enorme Einsparungen bringt. Der steigende Wettbewerbsdruck durch die Globalisierung hat zwar neuen Schwung gebracht. Doch nach wie vor gehen Veränderungen in dieser Branche nur in kleinen Schritten vor sich.

Als Henry Ford mit seinen ersten Fließbändern 1913 die Massenproduktion von Fahrzeugen und damit die moderne Automobilindustrie begründete, waren weder Umweltverschmutzung noch Benzinverbrauch ein Thema. In bemerkenswert kurzer Zeit revolutionierte das Auto die amerikanische Gesellschaft. Bis 1930 besaß einer von fünf Amerikanern einen eigenen Pkw. Die neue Mobilität ermöglichte es, in Scharen die Innenstädte zu verlassen. Zwischen 1950 und 1960 wurden 20 Millionen Amerikaner zu Vorstädtern. Neue Häuser und neue Vororte machten nun neue Straßen erforderlich.

1950 beherrschten amerikanische Firmen die Branche, aus ihrer Produktion stammten weltweit fast drei Viertel aller Fahrzeuge. Diese waren größer als sonstwo auf der Welt, erhielten bald auch noch Heckflossen und stärkere Motoren. Technologie und Design änderten sich jedoch nur wenig. Es gab genügend Benzin, und Verbrauchswerte wurden weder gemessen noch irgendwo angegeben. Nur in Los Angeles machte man sich Sorgen ob der Luftverschmutzung, aber selbst dort verstand noch niemand, dass die Autos die Übeltäter waren.

Präsident Richard Nixon unterzeichnete Anfang der 1970er Jahre eine Reihe von Umweltgesetzen, etwa den Clean Air Act, ein Gesetz zur Reinhaltung der Luft. Man begann einen offensiven Feldzug, um die von Abgasen verursachte Luftverschmutzung zu verringern, und zwang damit der Autoindustrie neue Technologien auf, bald darauf auch Innovationen für mehr Sicherheit und geringeren Treibstoffverbrauch.

Seit dieser Zeit wurden in neuen amerikanischen, japanischen und europäischen Benzinern die Emissionswerte für die typischen Luftschadstoffe (Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffe und Stickoxide) um etwa 99 Prozent reduziert – eine Erfolgsgeschichte. In den umweltverschmutzten Städten können die Auspuffgase neuer Autos sauberer sein als die Umgebungsluft. Auch Dieselfahrzeuge werden

diesbezüglich immer besser, obwohl ihre Technik hier ein Jahrzehnt im Verzug ist.

Gezwungen, den Schadstoffausstoß zu verringern, entdeckten die Autobauer Möglichkeiten, das Benzin-Luft-Gemisch genauer zu steuern. Der alte Vergaser war dafür ungeeignet. Die Lösung lag Ende der 1970er Jahre in der Kombination einer elektronischen Steuerung mit Sensoren. In den 1990er Jahren hielten Chips endgültig Einzug in den Motorraum. Elektronische Steuerungen ersetzten allmählich mechanische und hydraulische Vorrichtungen in Bremsen, Steuerung, Federung und der Motorsteuerung. Heutige Autos ähneln Computern auf Rädern.

Diese Erfolgsgeschichte gilt leider nicht für das Kohlendioxid, das beim Verbrennen von Kohlenwasserstoffen frei wird. Für den Hauptverantwortlichen der globalen Erwärmung gibt es keine praktikable Methode, ihn beim Fahren zu entfernen oder einzufangen. Die einzige Möglichkeit, die CO₂-Emissionen von Autos zu reduzieren, ist, weniger Benzin oder Diesel zu verbrennen beziehungsweise alternative Treibstoffe zu verwenden, die weniger Kohlenstoffe enthalten.

22 Liter auf 100 Kilometer

Je Liter entstehen ungefähr zwei Kilogramm Kohlendioxid. Je höher der Wirkungsgrad eines Fahrzeugs, je weniger Kraftstoff es also pro Kilometer verbraucht, desto geringer der CO₂-Ausstoß. Wenn Sie 30 Kilometer in einem Toyota Prius zur Arbeit fahren, der im Stadtverkehr 6 Liter pro 100 Kilometer verbraucht, setzen Sie 3,6 Kilogramm Kohlendioxid frei. Nutzen Sie für diese Strecke hingegen einen Toyota Tundra mit Vierradantrieb und Automatikgetriebe, der 22 Liter pro 100 Kilometer schluckt, tragen Sie mit fast 13 Kilogramm CO₂ zur Klimaerwärmung bei.

In den USA geriet der Spritkonsum erstmals 1974 in die Diskussion, weil der Rohölpreis damals plötzlich in die Höhe schnellte. Bis etwa 1985 sank der Durchschnittsverbrauch neuer Autos deshalb ungefähr auf die Hälfte, von etwa 20 auf 10 Liter pro 100 Kilometer. Einige Verbesserungen kamen daher, dass man die Motorleistung verringerte und kleinere Autos baute, aber am meisten brachte die Verwendung leichterer Materialien und der Wechsel vom Hinter- zum Vorderradantrieb, was die schwere Antriebswelle überflüssig machte.

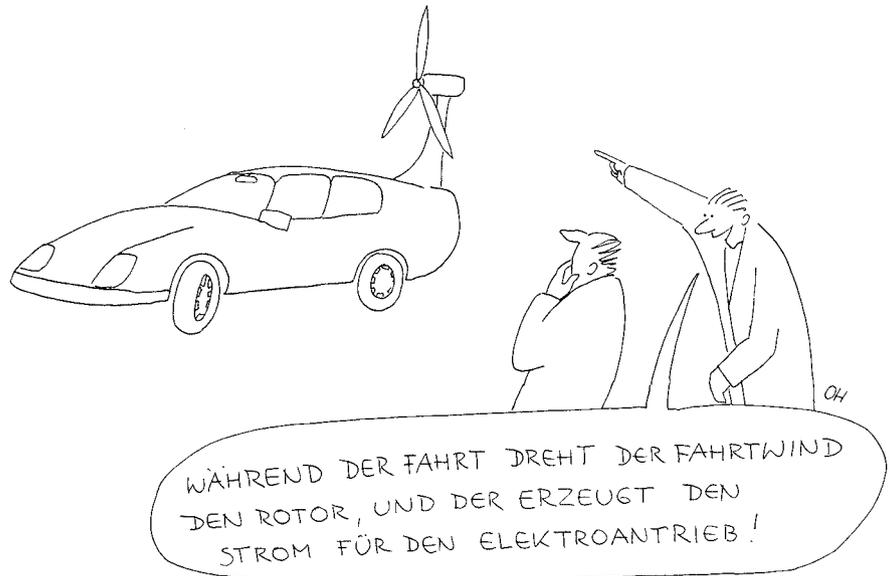
An einem Honda Accord lässt sich die weitere Geschichte schön darstellen. 1976 beherrschten noch zwei Tonnen schwere, Benzin verschlingende Autos aus Detroit die amerikanischen Straßen. Nach dem ersten Ölschock auf Grund des arabischen Ölembargos und der zweiten Ölkrise, die gerade heranzog,

stellte der kleine Motorradhersteller Honda seinen neuen Accord vor. Das Fahrzeug wurde ein Riesenerfolg, denn es wog nur 900 Kilo – die Hälfte eines damals typischen Chevy – und hatte einen 1,6-Liter-Motor mit 68 PS. Auf der Autobahn verbrauchte er nur 6 Liter auf 100 Kilometer. 10 000 000 Accords später, im Jahr 2008, war das nun aktuelle Modell 78 Prozent schwerer geworden, hatte einen fast viermal so starken Motor und verbrauchte mehr als 9 Liter. Es war überladen mit neuestem technologischem Schnickschnack, schluckte im Vergleich zu seinem Urahn im Lauf der gesamten Betriebszeit 8000 Liter mehr Benzin und setzte daher 16 000 Kilogramm mehr Kohlendioxid frei.

Das ist leider kein Einzelfall, sondern symptomatisch. Die Geschichte des Automobils seit den 1980er Jahren ist eine Geschichte des steten Wachstums hinsichtlich Größe und Leistung. Bis 2005 wuchsen die Fahrzeuge um mehr als 20 Prozent, die Leistung der Motoren verdoppelte sich fast, und gleichzeitig wurden viel Energie verschlingendes Zubehör und neue Technologien wie der Vierradantrieb eingebaut. Mitte der 1980er Jahre beschleunigte ein durchschnittliches Auto in 14,5 Sekunden von null auf 100. Heute braucht es dazu nur noch 9,5 Sekunden – und manche schaffen es sogar in vier. Unselig ist auch der Trend, normale Autos durch kleine Lastwagen zu ersetzen – Minivans, Pickups, Geländewagen. 1980 waren nur 21 Prozent aller Pkws in den USA solche Transporter, 2004 lag ihr Anteil bereits bei 56 Prozent!

Eine höhere Motorleistung und ein höheres Gewicht erfordern mehr Energie. Es ist eigentlich erstaunlich, dass der durchschnittliche Benzinverbrauch nicht ins Unermessliche stieg. Stattdessen blieben die Werte seit 1985 beinahe konstant. Sogar als die Benzin-

Die einzige Möglichkeit, CO₂-Emissionen zu reduzieren, ist, weniger Treibstoff zu verbrennen





CHRYSLER GROUP LLC

Öko gleich Strickpullover? Der Chrysler ecoVoyager (oben) und der Smart ED (unten) sollen den amerikanischen Berufspendler vom Elektroantrieb überzeugen.



DAIMLER AG

preise niedrig waren, von 1985 bis 2002, entwickelte die Automobilbranche Innovationen, um den Verbrauch zu senken. Die Automobilingenieure waren sehr innovativ und erfolgreich darin, den Wirkungsgrad von Verbrennungsmotoren und anderen Fahrzeugkomponenten zu steigern. Sie haben außerdem verschiedene neue Methoden entwickelt, um leichte Konstruktionsmaterialien zu verwenden, haben die Aerodynamik verbessert, den Rollwiderstand der Reifen verringert, schwerfällige mechanische und hydraulische Bauteile durch Elektronik ersetzt und vieles andere. Und weitere Innovationen sind auf dem Weg, wie etwa die Hochdruck-Direkteinspritzung, die Abschaltung von Zylindern oder des ganzen Motors, wenn sie nicht gebraucht werden, die exaktere Steuerung von Ventilen und Getriebe, die sich kontinuierlich an den Fahrzeugzustand beim Bremsen und Beschleunigen anpassen.

Aber der steigende Wirkungsgrad – fast zwei Prozent pro Jahr – wurde von der Aufwärtsspirale in Sachen Gewicht und Leistung wieder zunichtegemacht. Wären beide auf dem Niveau von 1985 geblieben, könnten Autos heute 25 bis 30 Prozent weniger Benzin verbrauchen.

Außerhalb der USA verlief die Geschichte etwas anders. In der Europäischen Union erklärte sich die Automobilindustrie bereit, die Kohlendioxidemissionen von 1995 bis 2008 um 25 Prozent pro Fahrzeugkilometer zu senken. Eine beträchtliche Reduzierung gelang zwar, das Ziel wurde aber nicht ganz erreicht, deshalb führte man verpflichtende Bestimmungen ein (die 2008 in Kraft traten). Auch in Japan wurden 1998 Vorschriften erlassen, die für die meisten Fahrzeugklassen eine Reduzierung des Verbrauchs um 20 bis 25 Pro-

zent bis 2010 forderten. Sogar in China erließ die Regierung strengere Normen für den Treibstoffwirkungsgrad als in Amerika.

Nach 32 Jahren der Untätigkeit zeichnete sich endlich auch in den USA ein neues Interesse am Benzinverbrauch ab, als sich der Kongress 2007 durchrang, Verbesserungen des Wirkungsgrads vorzuschreiben. Doch lagen diese Forderungen weit unter denen, die anderswo schon galten. Was noch schlimmer war: Die US-Bundesregierung blockierte Kalifornien und andere Staaten, die bis 2016 eine 30-prozentige Reduzierung der Treibhausgasemissionen von Fahrzeugen anordnen wollten.

Nicht nur Gesetzgeber und Ingenieure sind gefordert, sondern auch die Kunden. Sie dürfen nicht länger der Versuchung erliegen, immer PS-stärkere Fahrzeuge zu kaufen, und müssen bei ihren Kaufentscheidungen mehr auf den Benzinverbrauch achten. Überdies sollte jede Regierung finanzielle Anreize schaffen, damit Verbraucher und Hersteller gesellschaftlich vernünftige Entscheidungen treffen. Dann wären drei bis vier Prozent Verbrauchsreduktion pro Jahr durchaus realistisch.

Da der Fahrzeugbestand aber weltweit ständig wächst und der beängstigenden Marke von zwei Milliarden entgegenteilt, dürfte das kaum genügen. Zum Glück gibt es bereits etwas viel besseres als den Verbrennungsmotor – die Technologie des elektrischen Antriebs, die seit Beginn der Geschichte des Motorfahrzeugs bekannt ist (schon Clara Jane Ford, Gattin des Pioniers, fuhr ein Elektroauto). Diese Technologie umfasst ein weites Spektrum: batterieelektrische Fahrzeuge, Hybride, Plug-in-Hybride und Brennstoffzellenautos (Spektrum der Wissenschaft, 9/2010, S. 86). Ihre Räder werden ganz oder zum Teil von einem oder mehreren Elektromotoren in Drehung versetzt statt von einem mechanischen Antriebsstrang, der von einem Ottomotor betrieben wird. Der Strom stammt aus Akkumulatoren, Ultrakondensatoren, Stromschienen (wie die, die über der Straße hängen und Straßenbahnen versorgen) oder wird an Bord erzeugt (zum Beispiel mit Brennstoffzellen).

Elektromotoren sind grundsätzlich effizienter, denn sie nutzen 90 Prozent der zur Verfügung stehenden Energie, verglichen mit 37 Prozent der heutigen konventionellen Automotoren. Fahrzeuge mit Elektroantrieb verbrauchen überdies keine Energie, wenn sie nur rollen oder stillstehen. Zudem lässt sich bis zu einem Fünftel der Energie zurückgewinnen, die sonst beim Bremsen verloren ginge.

Der damalige Vorstand von General Motors, Rick Wagoner, erklärte im Mai 2008: »Bei GM glauben wir, dass Fahrzeuge mit Elektroantrieb langfristig die beste Lösung

sind, um die Energie- und Umweltsorgen der Gesellschaft zu lösen.« Wobei vielleicht auch Biotreibstoffe aus Ländern wie Brasilien oder dem amerikanischen Mittelwesten eine gewisse Rolle spielen könnten.

Doch Fahrzeuge mit Elektroantrieb stehen vor einer schwierigen Aufgabe, weil sie in zweierlei Hinsicht eine große Veränderung benötigen: bei der Fahrzeugtechnologie und dem Verteilungssystem für den Treibstoff. Mehrere Seiten machen bereits Druck, damit diese grundlegenden Innovationen eingeführt werden: politische Entscheidungsträger, die sich sauberere und wirtschaftlichere Fahrzeuge wünschen, Kunden, die von vielen Eigenschaften von Fahrzeugen mit Elektroantrieb profitieren würden, die Forschungs- und Entwicklungsabteilungen von einigen Autokonzernen und kleinere Start-up-Firmen in den USA, China und anderswo.

Nullemissionen in Kalifornien – Wunschtraum und Wirklichkeit

Ende des 19. Jahrhunderts wurden batterieelektrische Fahrzeuge entwickelt, aber sie unterlagen den Benzinern schnell, da Batterien zu teuer, zu groß und zu schwer waren. Ein erneuter Anlauf Ende der 1990er Jahre, von den Sorgen um die Luftverschmutzung und mit Unterstützung von Stromkonzernen angetrieben, scheiterte aus dem gleichen Grund. Kalifornien war damals mit seiner ZEV-Vorschrift (*zero-emission vehicle*, zu Deutsch emissionsfreies Fahrzeug) Vorreiter. Diese forderte, dass bis 1998 zwei Prozent aller verkauften Fahrzeuge keinerlei Schadstoffe ausstoßen dürften, der Wert sollte bis 2003 auf zehn Prozent steigen. Das hätte vor allem mit elektrischen Antrieben erreichen werden können. Andere Staaten folgten diesem Beispiel, vor allem Frankreich, wo nachts ungenutzter Atomstrom zur Verfügung steht.

Bei den regelmäßigen öffentlichen Anhörungen für die ZEV-Vorschriften in Kalifornien in den 1990er Jahren und Anfang dieses Jahrhunderts erklärten die Befürworter lautstark die Richtigkeit ihrer Sache – unter lautem Beifall ihrer Unterstützer und ebenso lautem Buhrufen der Skeptiker. Aller Rhetorik und Begeisterung zum Trotz: Die Realität heute sieht anders aus. Zwar müssen die Autobauer Kalifornien mit Nullemissionsfahrzeugen versorgen, doch im Jahr 2000 lag der Bestand dort bei 3000 Stück. Neun Jahre später stammten die einzigen batterieelektrischen Fahrzeuge, die in Serie gefertigt wurden, von GEM (Global Electric Motorcars). Das kleine, zu Chrysler gehörende Unternehmen in North Dakota produziert jährlich weniger als 2000 davon.



Neuerdings gibt es Anzeichen für einen kräftigen Aufschwung, denn in China schießen Unternehmen, die Elektroautos bauen, geradezu aus dem Boden und auch viele internationale Konzerne steigern ihre Investitionen in die entsprechende Forschung.

Es stimmt schon, dass sich die Autobranche bislang nie wirklich bemüht hat, solche Fahrzeuge auf breiter Front auf den Markt zu bringen, aber wohl nur, weil die Kosten dafür zu hoch und die Absatzchancen zu gering waren. Das wirkliche Problem waren nämlich der Preis und die Lebensdauer der Batterien.

Dabei haben batterieelektrische Fahrzeuge einige Eigenschaften, die für Käufer interessant sind. Eine davon ist, dass die Speicher daheim aufgeladen werden können. Umfragen haben ergeben, dass viele das Tanken an einer Tankstelle als unangenehm empfinden. Dazu kommt, dass es den meisten Menschen überraschend viel Spaß macht, ein Elektroauto zu fahren. Nachdem Matthew Wald, der lange Zeit als Wissenschaftsjournalist für die »New York Times« gearbeitet hat, den EV-1 von General Motors testen durfte, schrieb er: »Nachdem ich damit gefahren bin, kamen mir mein Sable und meine Camry-Limousine laut, stinkend und langweilig vor.« Solche Kommentare beruhen auf dem ungewöhnlich hohen Drehmoment von Elektromotoren und damit einer stärkeren, dabei aber auch weicheren Beschleunigung schon bei geringen Geschwindigkeiten.

Wie sehr die Umwelt profitiert, hängt von der Quelle der Elektrizität ab. Stammt sie von Solarzellen, Wind-, Wasser- oder Kernkraftwerken, verringert sich die Emission von Kohlendioxid um fast 100 Prozent. Weniger Vorteile bringen Elektroautos in Ländern, wo der Strom zum Großteil aus Kohle erzeugt wird,

Elektromotoren nutzen 90 Prozent der zur Verfügung stehenden Energie

Toyota schockte die Automobilbranche im Oktober 1997 mit der Vorstellung eines Hybridautos

wie in Deutschland, China, Indien und einem Großteil der Vereinigten Staaten. Doch auch dort kann die Luftverschmutzung lokal verringert werden, weil der Ausstoß der Schadstoffe außerhalb von Städten erfolgt.

Mit den Treibhausgasen verhält es sich ganz anders. Ihr Effekt ist global. Wenn elektrische Fahrzeuge ausschließlich mit Kohlestrom betrieben werden (und die Abgase des Kraftwerks nicht permanent unter der Erde gelagert werden), verursacht das sogar etwas mehr Treibhausgasemissionen als ein mit Benzin betriebener, optimierter Verbrennungsmotor.

Letztendlich liegt aber der Schlüssel zum Erfolg immer noch in der Batterie. Im Lauf der 1990er Jahre kamen für Consumerprodukte neue Typen auf den Markt – Nickel-Kadmium-, Nickel-Metallhydrid- und vor Kurzem Lithiumionenakkus. Sie speichern immer mehr Energie auf geringerem Raum und zu einem günstigeren Preis. Doch es hat sich als ungeheuer schwierig herausgestellt, diese Produkte für den Automobilmarkt hochzuskalieren. In absehbarer Zukunft werden sie nicht billig und kompakt genug sein, um elektrische Fahrzeuge überall wettbewerbsfähig zu machen.

Das größte Potenzial haben Batteriemobile dort, wo es auf kleinere, nicht auf stark motorisierte Autos ankommt. Dazu gehören Fahrzeuge, die hauptsächlich in Städten und deren näherer Umgebung verwendet werden, etwa bei der Postzustellung. Wenn eine Höchstgeschwindigkeit von 100 Kilometer pro Stunde und eine Reichweite von weniger als 250 Kilometern den Ansprüchen genügt, ist der Batteriebetrieb im Rennen. Die Stuttgarter Daimler AG plant deshalb, ihren Elektro-Smart in fünf ausgewählten Regionen der amerikanischen Ost- und Westküste mit gezielten Aktionen auf den Markt zu bringen. Wer täglich zwischen 30 und 50 Kilometer in den Großstädten zurücklegt, soll sein Fahrzeug pro Woche nur zweimal an die Steckdose hängen müssen (bei 110-Volt-Spannung für etwa sechs bis acht Stunden). In China sind Elektroräder und -roller sogar bereits der erste große Erfolg dieser Technologie. Die Verkaufszahlen schnellten seit 2000 von beinahe null auf 13 Millionen im Jahr 2006. Kleinere, billigere Fahrzeuge, die geringere Ansprüche an die Wartung stellen, geringere Energiekosten haben, weniger Lärm verursachen und keinerlei Luftverschmutzung – das ist schon eine ansprechende Idee, um die Auto-Monokultur aufzubrechen.

Die zweite Erfolgsgeschichte des elektrischen Antriebs ist die des Hybridautos. Es verfügt über einen Verbrennungs- und einen Elektromotor. Weil der zweite den ersten unterstützt, kann ersterer näher an seinem optimalen Wir-

kungsgrad arbeiten und kleiner dimensioniert werden. Der Elektromotor kommt erst bei Spitzenlasten zum Einsatz, etwa beim Beschleunigen oder bei Bergfahrten. Und weil das Fahrzeug elektrische Energie speichert, kann auch die Bremsenergie wiedergewonnen werden, was den Gesamtwirkungsgrad verbessert.

Das erste Hybridfahrzeug wurde 1899 von Porsche gebaut. Fast ein Jahrhundert später erlangte die Hybridtechnologie dank einer Kooperation von Autoherstellern aus Detroit und der US-Regierung wieder an Bedeutung. Diese Partnership for a New Generation of Vehicles (PNGV) wurde 1993 unter Präsident Bill Clinton gegründet. Dadurch erhielten amerikanische Autobauer umfangreiche Unterstützung von der Wissenschaft und den nationalen Forschungslabors; etwa 250 Millionen US-Dollar Fördergelder flossen pro Jahr in die Weiterentwicklung. Das Ziel war, serienreife Prototypen zu entwickeln, die nur 3,5 Liter Treibstoff pro 100 Kilometer verbrauchen sollten, ein Drittel dessen, was zum Zeitpunkt der Konzeptentwicklung ein durchschnittliches Auto in den USA benötigte. Die drei beteiligten US-Firmen legten sich schnell auf Diesel-Hybride fest. Leider blieb es bei großspuriger Rhetorik, und obwohl die Unternehmen im Jahr 2000 Prototypen vorstellten, ging keiner davon in die Produktion.

Die USA geraten ins Hintertreffen

Toyota hingegen schockte die Automobilbranche im Oktober 1997 mit der Vorstellung eines Hybridautos für den japanischen Markt – des Prius. Drei Jahre später kam das Fahrzeug auch in den Vereinigten Staaten auf den Markt, 2004 folgte eine deutlich verbesserte Version. Dieses Wunderwerk der Ingenieurkunst war ein großer Marketingerfolg. Der Prius gewann Preise und Auszeichnungen, darunter den »Transportation Technology and Innovation Award« des »Wall Street Journal«, den »Innovation Award in Energy« der Zeitschrift »Economist« und den Titel »Europäisches Auto des Jahres«. Der Verkauf kam nur langsam in Schwung, teilweise wohl auf Grund des anfangs plumpen Designs. Doch schon im ersten Halbjahr 2007 stand der Prius an achter Stelle der meistverkauften Autos in Amerika. Im Juni 2007 verkaufte Toyota weltweit das millionste Hybridauto. Auch Honda griff die Hybridtechnologie früh auf. Im Dezember 1999 stellte es seinen 16000 Euro teuren Zweisitzer Insight vor, der auf der Autobahn nur vier Liter auf 100 Kilometer verbrauchte. Kurze Zeit später folgten Hybridversionen des Honda Civic und Accord.

In der Zwischenzeit beschäftigten sich europäische Unternehmen hauptsächlich mit

Elektroroller prägen zunehmend den Stadtverkehr in Asien.



STEFANIE SCHRAMM

der Dieselmotortechnik. Sie sahen darin einen billigen und einfacheren Weg, CO₂-Emissionen zu reduzieren. Doch Toyota bewies, dass sie sich irrten. 2002 meldete der Konzern, die Hybridautos hätten die Gewinnschwelle erreicht.

Diese Behauptung ließ sich zwar nicht überprüfen, schien aber trotz erheblicher Zusatzkosten glaubhaft – Studien zufolge etwa 4000 Euro pro Fahrzeug. Wobei diese Zahl von mehreren Annahmen abhing, etwa, ob man die Ausgaben für die Forschung nur auf die erste Generation anrechnet oder auch auf künftige Hybridfahrzeuge verteilt. Jedenfalls setzten sowohl Toyota als auch Honda den Verkaufspreis ihrer Fahrzeuge um etwas mehr als 3000 Euro höher an, als ein gleichwertiges Benzinfahrzeug gekostet hätte. Die Lücke wurde teilweise durch Einsparungen kompensiert: Weil sich Hybridautos quasi von selbst verkaufen, sparte Toyota beinahe 400 Euro pro Auto für Werbung, dies ist der Durchschnittswert, den die Industrie sonst ausgibt. Und weil die Wartelisten lang waren, musste Toyota auch keine Sonderangebote und Anreize anbieten, und das zu einer Zeit, in der die US-Autobauer durchschnittlich Nachlässe von 2500 Euro für jeden Pkw oder Lkw gewährten.

Schließlich folgte Detroit den Japanern – aber nur zögerlich. Ende des Jahres 2003 vollzog GM den Kurswechsel. Zum einen weil Medien das Unternehmen bereits als wenig innovationsfreudig verspotteten, zum anderen weil GM erkannt hatte, dass die Beherrschung der Hybridtechnologie einen Zwischenschritt auf dem langen Weg zum Elektroantrieb mit Brennstoffzellen darstellte. Ford folgte im Jahr darauf und verwendete eine lizenzierte Technologie von Toyota in seinem kleinen Geländewagen Escape. Chrysler verkaufte einige Dodge Ram Contractor Special in einer Hybridversion für Fuhrparks, und GM bot verhältnismäßig preisgünstige Mild-Hybridautos an (siehe Lexikon rechts), bevor es 2007 seinen ersten Vollhybrid auf den Markt brachte. Insgesamt kletterten die Verkaufszahlen in den USA stetig an. Waren im Jahr 2000 noch zwei Modelle auf dem Markt, von denen insgesamt 7800 Stück einen Besitzer fanden, erwarben Kunden Anfang 2007 mehr als 300 000 Autos aus einem Angebot von elf Typen.

Die Zukunft der Hybridautos lässt sich nur schwer abschätzen, denn die Unternehmen verfolgen unterschiedliche Marketing- und Technologiestrategien. So bilden beispielsweise Plug-in-Hybride eine Brücke zum batterieelektrischen Fahrzeug. Die Technologie ist serienreif, auf Grund der größeren Batterien (im Vergleich zum Vollhybrid) und dem notwendigen Ladesystem aber immer noch teu-

Die Kombination aus Verbrennungs- und Elektromotor gilt als wichtiger Zwischenschritt (hier der BMW ActiveHybrid).



- 1 hocheffizienter Benzinmotor mit zwei Turboladern
- 2 Elektromotor mit hohem Drehmoment und Planetengetriebe
- 3 Hochspannungselektronik
- 4 Lithiumionenbatterien

er. Was die Autobauer zurückhält, sind also die höheren Kosten und außerdem die Unsicherheit über die Wünsche der Verbraucher: Bevorzugen sie einen Pkw, der mit einer größeren Batterie insgesamt 65 Kilometer rein elektrisch fahren kann, oder einen mit kleinerer Batterie, die eine solche Option allenfalls auf einer kurzen Strecke bietet, aber dank des Elektromotors nur drei Liter Benzin auf 100 Kilometer verbraucht. Die Hersteller neigen im Augenblick zu den Mildhybriden, denn die kleinere Batterie ist billiger – aber immer noch teurer als die des ohnehin schon teuren Vollhybriden vom Typ Prius.

In jedem Fall aber ist diese Technologie ein Zwischenschritt vom konventionellen Fahrzeug mit Verbrennungsmotor zu dem mit reinem Elektroantrieb. Sie hat Vorteile gegenüber konventionellen Benzinern wie einen höheren Wirkungsgrad, besser kontrollierbare Emissionen (weil die Verbrennungsmotoren bei gleicher Last arbeiten) und bietet ein besseres Fahrgefühl. Abgesehen von den Plug-in-Hybriden erfordert sie zudem weder eine Veränderung der Tankstelleninfrastruktur noch ein Umdenken beim Kunden. Diese Technik lässt sich sogar relativ einfach nachrüsten. Was prinzipiell gegen sie spricht, sind die höheren Kosten.

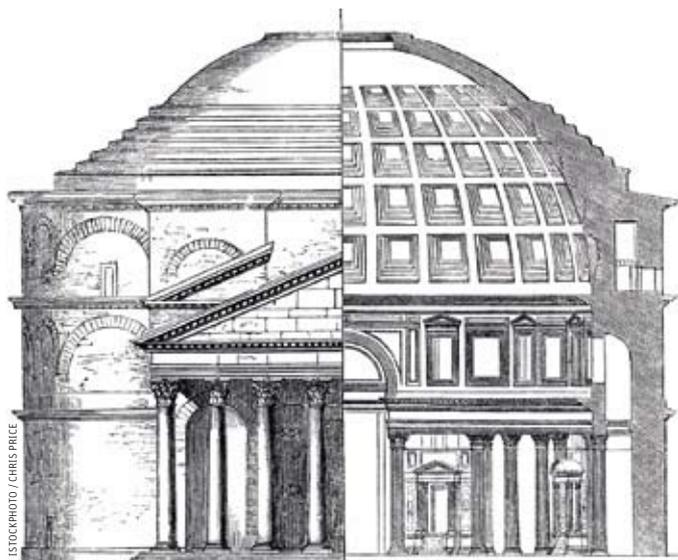
Toyota erklärte vor fünf Jahren, die Mehrkosten auf die Hälfte, also etwa auf 1200 Euro pro Hybridfahrzeug von der Art eines Prius, verringern zu wollen oder sogar auf weniger. Wenn das gelingt, wird die Hybridtechnologie wahrscheinlich den konventionellen Benzin- oder Diesel-Verbrennungsmotor verdrängen, denn die langfristigen Einsparungen beim Tanken werden den höheren Kaufpreis mehr als wettmachen. ◀

LEXIKON: HYBRIDE

- **Mildhybride** haben nur eine sehr kleine Batterie, um Bremsenergie wiederzugewinnen; der Elektroantrieb erlaubt es, den Verbrennungsmotor bei Stopps auszuschalten; sie verringern so den Benzinverbrauch um etwa zehn Prozent.
- **Ein Vollhybrid** hat eine größere Batterie und verringert den Benzinverbrauch vor allem im Stadtverkehr um etwa ein Drittel.
- **Ein Plug-in-Hybrid** hat in der Regel einen kleineren Verbrennungsmotor als ein Vollhybrid, aber durch eine große Batterie. Den Großteil seiner Energie erhält er aus dem Stromnetz.

Warum wird Zement eigentlich hart, wenn man ihn mit Wasser anrührt?

Stefanie Reinberger fragte Wolfgang Dienemann, Forschungsleiter bei HeidelbergCement Technologies.



ISTOCKPHOTO / CHRIS PRICE



Zement ermöglichte aufwändige Großbauten wie den römischen Pantheon (links) und die Vasco-da-Gama-Brücke bei Lissabon.

Vom grauen Pulver zum steinharten Brocken – Zement ist der Kitt, der Sand und Splitt zu Mörtel oder Beton verbindet. Weil er durch chemische Reaktionen seiner Inhaltsstoffe mit Wasser aushärtet, sprechen Fachleute von einem hydraulisch wirkenden Bindemittel. Das Besondere daran: Die Reaktion läuft auch unter Wasser ab, weshalb sich Baustoffe auf Zementbasis auch für Unterwasserkonstruktionen eignen.

Schon die Römer nutzten *Opus caementicium*, ein Gemisch aus Steinen, Sand, gebranntem Kalkstein und Puzzolanen, speziellen Gesteinen mit hohem Kieselsäure- und Kalkhydratgehalt. Dieser Mix ermöglichte den Bau der gewaltigen Kuppel des Pantheons in Rom, vor allem aber auch die Errichtung der Hafenanlagen für Handels- und Kriegsschiffe. Heute meint die Bezeichnung Zement meist den Portlandzement, für den der Engländer Joseph Aspidin 1824 ein Patent erhielt (der Name spielt auf einen Kalkstein an, der auf der Insel Portland abgebaut wurde und Zementprodukten farblich ähnelte); Isaac Charles Johnson (1811 – 1911) verbesserte den Werkstoff und führte ihn ins Baugewerbe ein.

Wichtigster Bestandteil ist der Zementklinker. Seine Ausgangsprodukte sind vor allem Kalkstein und Ton oder das Mergel genannte Gemisch aus beidem. Im Zementwerk wird der Rohschotter durchmischt und mit weiteren Komponenten wie Eisenerz oder Quarzsand versetzt, je nach den gewünschten Eigenschaften. Dann wird das Gemenge zu Rohmehl zermahlen. Brennen bei rund 1450 °C verwandelt Kalk in Kalziumoxid, wobei das Treibhausgas CO₂ entweicht – sieben Prozent der Gesamtemissionen weltweit gehen bislang noch auf das Konto der Zementherstellung.

Im weiteren Prozess verschmelzen die Zutaten zu einer zähflüssigen Masse, schnelles Abkühlen lässt sie zu Kügelchen von 10 bis 20 Millimeter Durchmesser erstarren – dem Zementklinker. Noch

einmal muss gemahlen werden, zudem mengt man sulfathaltige Substanzen wie Kalziumsulfat (Gips) unter, dann ist der Zement einsatzbereit.

Die Hydratation genannte chemische Reaktion der Inhaltsstoffe verläuft in drei Phasen: Zunächst gehen Kalzium- und Aluminiumsulfate in Lösung, ihre Ionen reagieren mit Trikalziumaluminat, einem weiteren Inhaltsstoff, und auf der Oberfläche der Teilchen wachsen kurze, säulenförmige Kristalle. Diese sind nicht nur zu klein, um bereits ein festes Gefüge zwischen den Partikeln aufzubauen, sie bremsen auch die Hydratation, so dass der wässrige Zementleim noch eine Weile transportiert und in Form gegossen werden kann. Nach einer Ruhephase von wenigen Stunden folgen weitere Reaktionen, bei denen Faserbüschel aus Kalziumsilikathydraten und anderen Kalzium- und Aluminiumverbindungen wachsen, die den Raum zwischen den Partikeln allmählich ausfüllen und diese so miteinander verbacken – der Zement härtet aus.

Hersteller tüfteln an Verbesserungen. HeidelbergCement etwa entwickelte ein Bindemittel, das schneller hart wird und sich daher für nächtliche Reparaturen an Start- und Landebahnen eignet. Sehr zukunftssträftig kommt eine Zementvariante daher, die Titandioxid enthält. Angeregt durch die UV-Strahlen der Sonne kann sie Stickoxide aus der Luft zersetzen und würde – als Straßenbelag – Sommersmog reduzieren. Und schließlich versuchen Forscher die Brenntemperatur zu senken, um zumindest durch Energieeinsparung den Anteil der Zementproduktion am Treibhauseffekt zu reduzieren.

Stefanie Reinberger ist Wissenschaftsjournalistin in Köln.

Haben auch Sie eine Frage zur Wissenschaft im Alltag?

Dann schreiben Sie an:

redaktion@spektrum.com



FÜR ABONNENTEN

Ihr monatlicher Plus-Artikel zum Download

»Der Untergang«

Am Oberlauf des Tigris im Südosten der Türkei soll ein gewaltiger Stausee entstehen. Trotz weltweiter Proteste besteht die türkische Regierung auf der Durchführung des umstrittenen Projekts – ein unschätzbare Kulturerbe ginge unwiderruflich verloren

DIESER ARTIKEL IST FÜR ABONNENTEN AB DEM 1. OKTOBER FREI ZUGÄNGLICH UNTER

www.spektrum-plus.de

FREIGESCHALTET

Ausgewählte Artikel aus **Sterne und Weltraum** und **Gehirn&Geist** kostenlos online lesen

»Kamil – ein junger Einschlagkrater in Ägypten«

Mit Hilfe von Google-Earth-Satellitenbildern entdeckte ein italienisches Forscherteam einen kleinen Krater im südwestlichen Ägypten. Eine geologische Expedition in die abgelegene Region identifizierte die Struktur als einen der jüngsten und am besten erhaltenen irdischen Einschlagkrater

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

www.astronomie-heute.de/artikel/1045218

»Wovon Freud nicht zu träumen wagte«

Das Unbewusste spielt in der psychoanalytischen Theorie eine zentrale Rolle. Heute richten auch Neurowissenschaftler ihren Blick immer öfter auf das, was unserer bewussten Wahrnehmung verborgen bleibt

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

www.gehirn-und-geist.de/artikel/1044288

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

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

Videos aus der Wissenschaft

Zeitgleich mit ihrer Veröffentlichung im Fachmagazin »Nature« stellen wir ausgewählte Forschungsarbeiten in Kurzfilmen vor. Schon im Archiv: »Die ersten Briten«, »Die dunkle Seite der schwangeren Väter« und »Foldit – das Onlinespiel zur Proteinfaltung« (siehe S. 16)

www.spektrum.de/videos

spektrumdirekt.de

Die Wissenschaftszeitung im Internet

Wenn der Boden ins Wanken gerät

Die meisten Beben auf unserem Planeten registrieren nur Seismografen. Schwere Erdstöße jedoch können in Sekunden ganze Landstriche zerstören und viele Opfer fordern, weshalb Forscher fieberhaft daran arbeiten, die Dynamik von Erdbeben zu ergründen. Dieses **spektrumdirekt**-Dossier bündelt aktuelle Nachrichten zum Thema

www.spektrumdirekt.de/erdbeben

WissensLogs

Die Wissenschaftsblogs

Fundgrube für Spektrum-Leser

Steht eines der berühmtesten Probleme der Mathematik ($P=NP?$) kurz vor der Lösung? Welche Zukunft ist dem Energiekonzept der Bundesregierung beschieden? Lassen sich Transkriptom-Analysen von jedermann durchführen? Und wie unterscheidet man – am Beispiel von Thilo Sarrazins Argumentationsfiguren – Wissenschaft von Pseudowissenschaft? Besuchen Sie uns auf

www.wissenslogs.de

Spektrum in den sozialen Netzwerken



www.spektrum.de/studivz



www.spektrum.de/facebook



www.spektrum.de/twitter



www.spektrum.de/youtube



MATHEMATIK

Ein bunter Strauß Paradoxa

Julian Havil bietet Spannendes aus jedem Bereich der Mathematik – für den, der sich durchzuarbeiten bereit ist.

Julian Havil, der 30 Jahre lang als Mathematikdozent am renommierten Winchester College in England lehrte, hat im deutschen Sprachraum 2007 mit seinem Erstlingswerk »Gamma. Eulers Konstante, Primzahlstränge und die Riemannsche Vermutung« einen großen Erfolg erzielt. Ein ebensolcher ist auch seinen beiden neuen Büchern zu wünschen.

Wieder versteht es Havil, seine Leser durch eine eindrucksvolle Auswahl von interessanten Problemen in den Bann zu ziehen. Jedes von ihnen hat einen besonderen Überraschungseffekt und wird ausführlich dargestellt; meist findet der nimmersatte Leser auch Hinweise auf weiterführende Literatur.

Der einschlägig vorinformierte Leser wird eine Reihe von alten Bekannten wieder treffen, darunter das notorische Ziegenproblem (wie kann es sein, dass der Kandidat in der Rateshow durch Revision seiner Entscheidung seine Gewinnchancen erhöht?), die nichttransitiven Würfel (Spektrum der Wissenschaft 10/1998, S. 9), das Sekretärinnenproblem (welcher Kandidatin soll man zusagen, wenn man sich jedes Mal sofort entscheiden muss? Spektrum der Wissenschaft 5/2004, S. 102), Buffons Experiment mit der Nadel, die man viele Male zufallsbestimmt auf den Dielenboden fallen lässt, um den Wert von π zu bestimmen, und etliche mehr. Den einen oder anderen Gedanken und Beweis habe ich aus »Gamma« wiedererkannt, aber das schadet nicht. Die gesamte Mischung ist so bunt und gut vernetzt, dass sich die drei Bücher vorteilhaft ergänzen.

Auf die Vorstellung eines paradox erscheinenden Phänomens folgen zunächst Plausibilitätsbetrachtungen und dann die nicht immer trivialen und gegen Ende jedes Buchs zunehmend umfangreicheren Beweise. Da darf sich der Leser nicht durch mehrseitige Umformungen oder Abschätzungen abschrecken lassen.

In den meisten Fällen genügen solide Kenntnisse aus der Oberstufenmathematik, um den Gedankengängen folgen zu können. Allerdings geht Havil in so großen Schritten

vor, dass dem Leser noch allerlei an eigenem Denken überlassen bleibt. An manchen Beweisen hätte ein Mathematikstudent oder gar ein ausgebildeter Mathematiker zu knacken. Havil ist nichts für den kleinen Lesehunger zwischendurch!

Beide Bücher geben auch Anregungen für die Schule, wo viele der verblüffenden Phänomene zumindest qualitativ angesprochen werden können; einige könnten als Anregungen für Facharbeiten dienen.

Jedes Kapitel beginnt mit einem geistreichen Zitat und mit einem geometrischen Muster, dessen Bedeutung sich erst in der Zusammenschau erschließt; die Erklärung folgt in einem eigenen Kapitel am Ende jedes der beiden Bücher. Außerdem finden sich dort besondere Abschnitte, in denen allgemeine mathematische Prinzipien erläutert werden, von der vollständigen Induktion über die Reihenentwicklung von Exponential- und trigonometrischen Funktionen bis zu dem immer wieder verwendeten Schubfachprinzip: Packt man $n+1$ Gegenstände in n Schubfächer, so müssen in mindestens einem Fach zwei oder mehr Gegenstände stecken.

Neben den oben angesprochenen alten Bekannten finden sich zahlreiche gleichermaßen interessante und (titelgerecht) verblüffende Phänomene. Wer die Antworten auf folgende Fragen nicht selbst findet, hat Anlass, die beiden Bücher zu studieren:

► Zwei Personen sind in einem Raum und tragen einen Hut, auf dem eine natürliche Zahl steht. Beide können nur die Nummer auf dem Hut des Spielpartners erkennen und wissen, dass die beiden Nummern benachbart sind. Wie können sie die Nummer des eigenen Huts erschließen? Wie können drei Personen erschließen, welche Nummern auf ihren Hüten stehen, wenn sie wissen, dass die eine Zahl die Summe der beiden anderen ist?

► Wieso fällt der 13. eines Monats häufiger auf einen Freitag als auf irgendeinen anderen Wochentag? Und für sparsame Menschen: Nach wie vielen Jahren wiederholt sich der Jahresablauf so, dass man einen Kalender erneut verwenden kann?

► Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit, dass der nächste vorbeifahrende Aufzug in einem Hochhaus in die Richtung fährt, in die Sie fahren wollen?

► Warum ist die Gewinnwahrscheinlichkeit für den führenden Spieler bei einem Tennisspiel zwischen zwei gleich starken Gegnern beim Stand 40:30 größer als beim Stand 15:0?

► Warum ist es günstig, darauf zu wetten, dass beim 200-fachen Münzwurf achtmal hintereinander Kopf oder achtmal hintereinander Zahl vorkommt?

► Warum ist in einem n -dimensionalen Hyperwürfel der größte Teil des Volumens in der Nähe seiner Ecken konzentriert?

► Wieso rechnen manche Taschenrechner die Potenz j^j falsch aus?

► Wie lässt sich das Geburtstagsparadoxon in der Kryptografie nutzen?

► Welches ist die kleinste Fläche, innerhalb deren man eine Nadel um 180 Grad drehen kann?

► Gibt es ein Abzählverfahren für die rationalen Zahlen, bei dem im Unterschied zum cantorschen Diagonalverfahren jede Zahl genau einmal erfasst wird?

Schließlich beschäftigt sich ein Abschnitt auch mit dem cantorschen Paradoxon der Mengenlehre, dass es unendliche Zahlenmengen verschiedenen Typs gibt (»Ich sehe es, aber ich glaube es nicht«). Der Autor ergänzt dies durch ein Abzählverfahren für die rationalen Zahlen, bei dem im Unterschied zum geläufigen cantorschen Diagonalverfahren jede Zahl genau einmal erfasst wird.

Es fällt schwer, einem der beiden Bücher den Vorzug zu geben. Havil selbst bezeichnet »Das gibt's doch nicht!« als das Nachholende dessen, was er in »Verblüfft?!« ausgelassen hat. Beide kann ich uneingeschränkt empfehlen.

Heinz Klaus Strick

Der Rezensent ist Mathematiker und ehemaliger Leiter des Landrat-Lucas-Gymnasiums in Leverkusen-Opladen.

Julian Havil
Verblüfft?!
 Mathematische Beweise unglaublicher Ideen
 Aus dem Englischen von Manfred Stern.
 Springer, Berlin 2009. 186 Seiten, € 29,95

Julian Havil
Das gibt's doch nicht!
 Mathematische Rätsel
 Aus dem Englischen von Michael Zillgitt.
 Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg
 2009. 234 Seiten, € 24,95



FOTOGRAFIE

Ein halbes Jahrhundert Mikrofotografie

Die besten von Werke Manfred Kage sind in einem handlichen Band versammelt.

Einzigartig für die gegenwärtige schnelllebige und schnellsterbige Zeit: Manfred Kage, der Pionier der Fotografie mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM), ist seit 50 Jahren ununterbrochen im Geschäft. Seine Bilder wurden so stilbildend, dass man heute Schwierigkeiten hat, das Besondere in ihnen zu sehen. Immer wieder gerne schaut man sich die Radiolarien an, erstmals seit Haeckels Zeichnungen in perfekter

Tiefenschärfe, wie das Lichtmikroskop sie nicht liefern kann. Unvergessen sind Insekten und deren Körperteile wie Stachel und Fassettenaugen in Großaufnahme, Ameisen mit einem Mikrochip oder Nanozahnrad und natürlich die quietschbunten Vitaminkristalle im polarisierten Licht. Und siehe da: Kage kann auch plastinieren, zum Beispiel die Arterien, Venen und Lungenbläschen einer menschlichen Lunge (Bild).

Über karge Angaben zur Abbildungstechnik und zur Vergrößerung gehen die Erläuterungen nicht hinaus – es will nicht mehr sein als ein Bilderbuch. Sein »Institut für wissenschaftliche Fotografie« stellt sich, mit zahlreichen Informationen und weiteren Bildern, auf www.kages-mikrowelten.de vor. Unter www.kages-mikrowelten.de findet sich eine recht ausführliche Voransicht des Buchs.

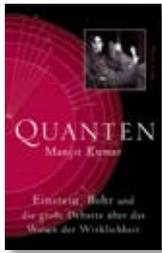
Alice Krüßmann

Die Rezensentin ist Leiterin der Bildredaktion von »Spektrum der Wissenschaft«.

Christina und Manfred Kage
KAGEs fantastische Mikrowelten
Manuela Kinzel, Göppingen 2010.
96 Seiten, € 19,-

Für dieses Korrosionspräparat einer menschlichen Lunge wurde im Vakuum flüssiges Nylon in die Lungenbläschen (gelb), die Arterien (blau) und die Venen (rot) eingespritzt. Nach erfolgter Aushärtung wurden die organischen Bestandteile weggeätzt.





WISSENSCHAFTSGESCHICHTE

Quantenphilosophie

Wie Bohr und Einstein über die Wirklichkeit debattierten

Ein klassischer Kriminalroman fesselt den Leser, indem dieser die Überlegungen des Detektivs verfolgt, die schließlich zum Täter führen. Das vorliegende Buch liest sich so spannend wie ein Krimi, aber es ist fraglich, ob die Suche nach eindeutigen Indizien überhaupt einen Sinn hat. Vielleicht gibt es bis zum Schluss mehrere Schuldige, und der als Täter Entlarvte ist ein Produkt der Verfolgung? Hätte eine andere Suche vielleicht einen anderen Hergang der Tat ergeben?

An die Stelle des Detektivs treten in diesem Quantenkrimi einige Physiker, und die Rolle des gesuchten Täters übernimmt das, was sie erforschen – die Wirklichkeit. Die Frage, was physikalische Realität ist, spaltete die Schöpfer der Quantenphysik bald in zwei Fraktionen. Die einen, angeführt von Albert Einstein und Erwin Schrödinger, wollten möglichst viel vom klassischen Wirklichkeitskonzept in die Quantenwelt hinüberretten. Für sie blieb die Realität der Quanten letztlich eindeutig, deterministisch, lokal: Jede Ursache hat genau eine

der das richtige Strahlungsgesetz nur um den Preis der Quantenhypothese findet. Anscheinend verhält sich die Energie der Strahlung, als wäre sie portioniert. Dann kommt der echte Revolutionär Einstein und zieht den tollkühnen Schluss: Jawohl, Strahlung besteht wirklich aus Quanten. Damit entsteht sofort die Frage, was Licht denn nun ist – Welle oder Teilchen? Beides zugleich geht nicht.

Wie Kumar zeigt, spaltet schon dieser Welle-Teilchen-Dualismus die Physiker in eine Fraktion, die mit Heisenberg die Frage nach einer Wirklichkeit hinter den Beobachtungen für sinnlos hält, und eine, die zum Beispiel wie Schrödinger im Wellencharakter das Reale sieht. Bohr prägt den Begriff Komplementarität. Beide Aspekte sind nötig, sagt er; Teilchen haben Wellencharakter und umgekehrt. Wenn wir Quantenobjekte im Experiment wie Teilchen behandeln, erhalten wir Teilchenresultate; stellen wir typische Wellenversuche an, sehen wir Wellenphänomene.

Dass das Resultat derart vom Messverfahren abhängen soll, ist aber für Einstein ein Unding. Die Realität muss vom Beobachter unabhängig sein – oder ist der Mond etwa nur da, wenn ich ihn sehe? Doch Heisenberg und Bohr erblicken in der Quantenphysik etwas völlig Neues, das solchen Fragen den Boden entzieht. In der Mikrowelt lässt sich der Einfluss unserer Beobachtungsinstrumente nicht mehr so sauber vom Beobachtungsobjekt separieren, wie wir das aus der klassischen Physik gewohnt sind. Also ist es an der Zeit, vom gewohnten Wirklichkeitsbegriff Abschied zu nehmen.

Für diese pragmatische Haltung spricht der durchschlagende Erfolg der neuen Physik, gegen sie sprechen die hartnäckigen Einwände, die Einstein in immer neuen Gedankenexperimenten kontra Bohr vorbringt. Die legendäre Bohr-Einstein-Debatte ist der dramatische und intellektuelle Höhepunkt des Buchs.

Kumar macht deutlich, dass Bohr zwar das letzte Wort behält, aber mit ziemlich scholastischen Argumenten operiert. Schwach ist seine Antwort auf Einsteins

letzten Einwand. In der berühmten »EPR-Arbeit« – nach den Initialen der Autoren Einstein, Podolsky und Rosen – argumentiert Einstein, die Quantenmechanik müsse unvollständig sein, da sie »spukhafte Fernwirkung« zulasse und damit das – für Einstein selbstverständliche – Postulat des lokalen Realismus verletze. Bohr rettet sich mit knapper Not in den Nebel der Erkenntnistheorie, indem er wiederholt, das Messresultat hänge eben von der gewählten Messmethode ab.

Eine stringente Antwort fand der Theoretiker John Stewart Bell erst später mit der nach ihm benannten Ungleichung. Sie ist der seltene Fall der Übersetzung eines philosophischen Problems in eine mathematische Formel. Wenn die bellsche Ungleichung gilt, dann ist die Quantenmechanik unvollständig – dann gibt es eine tiefere lokale Theorie, und Einstein hat Recht. Wird die Ungleichung verletzt, dann ist die Quantenrealität nichtlokal, und Bohr hat, ebenso wie die meisten Physiker, gegen Einstein gesiegt.

Heute wissen wir aus immer raffinierteren Experimenten: Die bellsche Ungleichung wird verletzt, die Quantenwelt ist wirklich nichtlokal. Damit ist freilich die von Einstein angestoßene Debatte nicht erledigt: Was die Quantenphysik »wirklich« bedeutet, bleibt umstritten. Obwohl Einstein seinem Freund und Widersacher Bohr letztlich unterlag, hat sein Einspruch wesentlich zur Zuspitzung zentraler Fragen nach dem Wesen der physikalischen Wirklichkeit beigetragen. Manjit Kumar hat darüber einen Bericht verfasst, der so faszinierend ist wie sein Thema.

Michael Springer

Der Rezensent ist Physiker und ständiger Mitarbeiter bei »Spektrum der Wissenschaft«.

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

Wirkung, unabhängig davon, ob und wie wir sie beobachten. Die andere Fraktion, insbesondere Niels Bohr und Werner Heisenberg, war rasch davon überzeugt, dass die neue Physik einen nichtklassischen Realitätsbegriff erzwingt: Wir beobachten Phänomene, die vom verwendeten Messverfahren abhängen und mit bestimmten Wahrscheinlichkeiten eintreten. Was unter einer derart alltagsfernen Wirklichkeit genau zu verstehen ist, das beschäftigt Naturphilosophen und theoretische Physiker bis heute.

Der Autor Manjit Kumar, studierter Physiker und Philosoph, entfaltet zunächst ein breites Panorama der Physik um 1900, wobei er die handelnden Personen geschickt auf der Problembühne platziert. Da ist der widerstrebende Revolutionär Max Planck,

Manjit Kumar

Quanten

Einstein, Bohr und die große Debatte über das Wesen der Wirklichkeit

Aus dem Englischen von Hainer Kober. Berlin Verlag, Berlin 2009. 540 Seiten, € 28,-



ÖKONOMIE

Fehlverhalten durch falsche Anreize

Mit einem besseren Belohnungssystem hätten sich die Banker vielleicht weniger riskant verhalten – und der Autor ein besseres Buch über Belohnungssysteme geschrieben.

Wie sollte man ein Be- oder Entlohnungssystem aufbauen? Es leben Menschen, die dieser Frage ihr Berufsleben widmen. Auch das vorliegende Buch handelt davon, zumindest teilweise, aber besagte Menschen findet man nicht im Literaturverzeichnis. Es gibt zwei Situationen, in denen ein Autor so vorgehen kann: Er ist so klug, dass er die Ergebnisse all der anderen einfach selbst erschließt, oder so kreativ, dass er auf völlig andersartige Ideen kommt. In beiden Fällen ist es ein sportlicher Anspruch.

Sehen wir uns an, was Klaus Kornwachs, Professor für Technikphilosophie in Cottbus, zum bestehenden System zu sagen hat: Ein niedriges Einkommen sei annähernd proportional zum Produkt aus Arbeitszeit und Produktivität (also zur Arbeit, auch in physikalischer Analogie), ein hohes hinge-

gen sei von diesen Größen abgekoppelt und stelle eine Zahlung für die Zugehörigkeit zu einer Klasse dar (eine »Apanage«). Diese Behauptung wirft zwei Fragen auf: Ist das so? Und wenn ja, ist das schlimm?

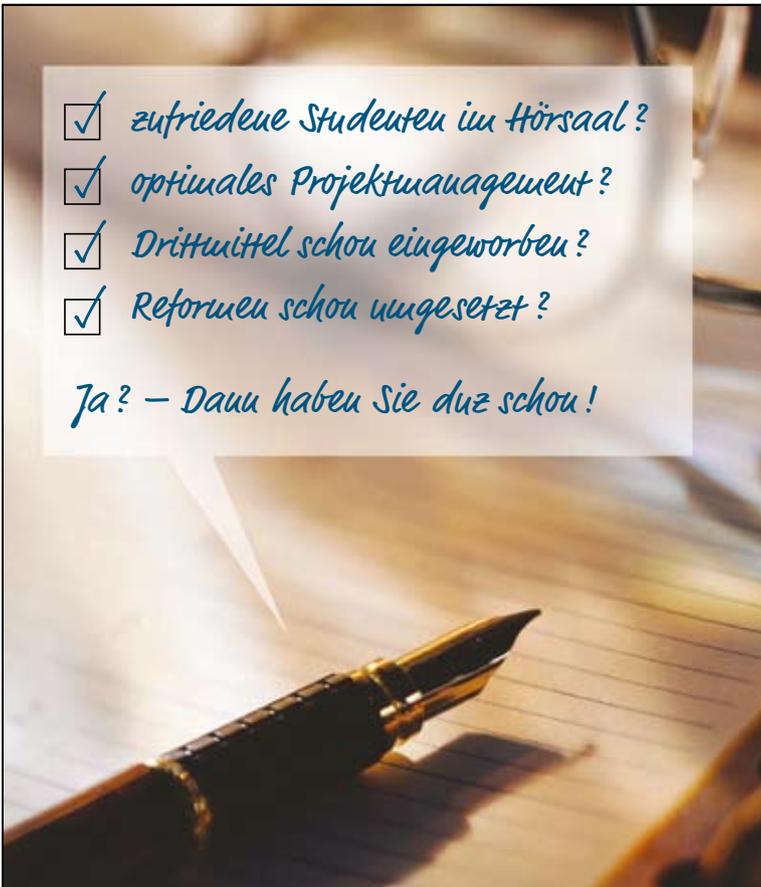
Die erste Frage lässt sich letztlich nur empirisch beantworten, aber man kann sich trotzdem ein paar theoretische Gedanken dazu machen: Wenn ein Manager oder auch Unternehmer visionäre Entscheidungen trifft und auf dem Weg der Umsetzung wenig Fehler macht, kann das der Firma Millionen Mal mehr Erfolg bringen, als wenn ein Arbeiter immer richtig arbeitet. Das kann man beklagen, aber nicht ändern. Ohne tiefer zu forschen, kann man nicht wissen, ob die hohen Managergehälter vielleicht im Rahmen einer modifizierten Arbeitswerttheorie durch die erbrachten Erfolge zu

rechtfertigen sind oder nicht. Damit ist dieser Teil des Buchs einfach eine Behauptung, die auf diesen Zusammenhang noch nicht einmal eingeht. Dennoch sind die vorgetragenen Argumente nicht uninteressant.

Aber nehmen wir an, die Gehälter der Spitzenmanager seien viel höher, als deren Erfolgsbeitrag rechtfertigt. Dann kann es dennoch einen guten Grund dafür geben, den Kornwachs sogar erwähnt, wenn auch nur abgeschwächt und in einem Nebensatz (S. 102): Hohe Zahlungen an die Obersten in der Hierarchie können als Ansporn dienen, in Zukunft Leistung zu bringen; und dieser Ansporn kann durchaus auch auf die vielen Personen zielen, die noch nicht oben angekommen sind. In diesem Szenario gäbe es ein Heer unterbezahlter Manager und Manageranwärter, die sich alle durch die Aussicht auf die – leider ungewisse – Überbezahlung hochmotiviert abstrampeln und damit vielleicht viel mehr leisten, als wenn sie nach ihrer – dann vermutlich auch geringeren – erbrachten Arbeit bezahlt würden.

Dieser Effekt ist bei Rockstars, Fußballspielern und Drogendealern zu beobachten; wieso nicht bei Managern? In diesem Szenario ist die Überbezahlung der wenigen

Anzeige



duz MAGAZIN UND duz EUROPA

informieren Sie umfassend und garantiert unabhängig. Im Mittelpunkt stehen Aktuelles und Hintergründiges aus Wissenschaft und Hochschule sowie konkret umsetzbare Tipps für den akademischen Alltag.

duz-DEUTSCHE UNIVERSITÄTSZEITUNG

14 - täglich im Wechsel das duz MAGAZIN (mit zwölf Seiten duz AKADEMIE) und die duz EUROPA – zudem die duz SPECIALS. Außerdem unser großer akademischer Stellenmarkt: Attraktive Positionen eröffnen Ihnen neue berufliche Aufstiegsmöglichkeiten. → Weitere Informationen erhalten Sie im Internet unter <http://www.duz.de>

Nutzen Sie die Chance: Bestellen Sie jetzt ein kostenloses Probeabonnement.

duz
DEUTSCHE UNIVERSITÄTSZEITUNG

Glücklichen gar nicht so schädlich, wie sie aussieht, sondern im Gegenteil eine Form der Motivation, die allen zugutekommt. Wäre also eine »Apanage« wirklich so schlimm? Die Antwort kann eine Rezension nicht ausarbeiten, ein Buch hätte es gekannt.

Kornwachs plädiert an einigen Stellen dafür, der Ökonomisierung entgegenzutreten, indem man auch andere als monetäre Werte berücksichtigt. Daran ist nichts auszusetzen, aber die ökonomische Theorie schüttelt man damit nicht ab. Entgegen einem verbreiteten Vorurteil ist Geld nicht die einzige relevante Größe der Ökonomen, sondern in vielen Fällen nur eine Metapher für »glücklich sein« oder – technischer gesprochen – den Nutzen. Die Währung kann auch »Ehre« sein, obwohl sie schwerer messbar ist als Geld. Zwischen Gier nach Geld und Gier nach Ehre (»Geiz« und »Ehrgeiz«) gibt es keinen prinzipiellen Unterschied.

Es gab und gibt Ehrenmorde und Ehrenkriege. Dass es Fehlanreize gibt, hängt nicht von der Währung ab. Die Prinzipien dahinter aufzubereiten und um neue Sichtweisen zu ergänzen, das sollte der Beitrag eines Philosophen zum Thema sein. Die Dinge weiterzudenken und nicht auf der ersten Ebene der Plausibilität stehen zu bleiben, das muss der Beitrag eines Philosophen sein.

Stattdessen finden sich ungenau übernommene Begriffe wie »return of invest«

statt »return on investment«, irreführende Übersetzungen wie »Nimm das für das« für »Tit for Tat« statt des üblichen und trefenden »Wie du mir, so ich dir« und weitere sprachliche Ungenauigkeiten. Wichtiger noch: Kornwachs befasst sich zwar ausgiebig mit der Spieltheorie, aber ausgerechnet weit gehend irrelevant sind. Statt zum aber-tausendsten Mal das Gefangenendilemma zu bemühen, hätte er einen Blick in die Theorie asymmetrischer Informationsverteilung und die Principal-Agent-Theorie werfen sollen; genau dort geht es nämlich um Entlohnungen. Wenn schon der Klap-pentext der Spieltheorie und der politischen Philosophie die Erkenntnis zuschreibt, »dass sich Kooperation auf längere Sicht immer lohnt«, wozu schreibt der Autor dann über die Zweipersonen-Nullsummenspiele, die so konstruiert sind, dass eine Kooperation der Spieler nicht möglich ist?

Wenn ein Fernsehzuschauer vom Ess-tisch aus über die Neoliberalen schimpft, ohne auch nur einen einzigen Gedanken-gang dieser Denkschule näher zu kennen, geschweige denn nachvollzogen zu haben, dann ist das eine Sache. Aber sollte ein renommiertem Wissenschaftler zu einer solchen Grundhaltung nicht einen sehr großen Sicherheitsabstand wahren?

Dafür, dass dieser Abstand bedenklich klein geraten ist, fallen mir zwei mögliche

Gründe ein. Erstens: Der Autor hält alle Vertreter der ökonomischen Disziplin von vorn-herin für (moralisch?) schlecht und ihre Argumente für Scheinargumente, die nur böse Absichten verschleiern sollen – womit er sich selbst als moralisch höher-stehend einordnet und ein Eingehen auf die Argumente sich erübrigt. Ich will hoffen, dass das nicht die Motivation für dieses Buch war.

Die zweite denkbare Erklärung gibt der Autor selbst. Er behauptet, viele Belohnungssysteme seien dadurch falsch konstruiert, dass Ingenieure durch Ingenieure beurteilt werden oder Philosophen durch Philosophen und dass in der Wissenschaft ein Anreiz besteht, die Zahl der Veröffentlichungen über deren Qualität zu stellen. Vielleicht folgt das Buch diesen Fehlanreizen und ist für die eigene Veröffentlichungsliste geschrieben, nicht für die Leser. Das wäre schade, denn ein Philosoph hätte einiges zu dem Thema beizutragen.

Christian Rieck

Der Rezensent ist Professor für Finance an der Fachhochschule Frankfurt am Main.

Klaus Kornwachs

Zuviel des Guten

Von Boni und falschen Belohnungssystemen

Suhrkamp, Frankfurt am Main 2009.

220 Seiten, € 10,-



ERNÄHRUNGSFORSCHUNG

Wie viel Forschung steckt in unserem Essen?

Eine Ausstellung im »Museum der Ernährung« ist überaus reichhaltig dokumentiert worden.

Das »Alimentarium« (Museum der Ernährung) in Vevey (Schweiz), eine Stiftung der Firma Nestlé, die dieses Jahr ihren 25. Geburtstag feiert, zeigte vom 28. März 2009 bis zum 17. Januar 2010 eine Sonderausstellung mit dem Thema »Forschung und Ernährung – ein Dialog«. Das gleichnamige Begleitbuch stellt auf über 300 großformatigen und eng bedruckten Seiten gegenwärtige und zukünftige Projekte der Ernährungsforschung vor. Wissenschaftler aus zehn Ländern, von über 30 verschiedenen Institutionen und aus den unterschiedlichsten Disziplinen erklären in verständlichen Beiträgen ihr spezielles Forschungsziel.

Zahlreiche Grafiken und geschmackvolle wie spektakuläre Fotos erleichtern die harte wissenschaftliche Kost, detaillierte Literaturangaben liefern weitere Informationen. Die Themen reichen von der Stammesgeschichte des Menschen über Physiologie, ernährungsbedingte Krankheiten, Genetik und Neurobiologie bis hin zu Lebensmittelsicherheit und Entwicklungshilfe.

Gleich mehrere Beiträge befassen sich mit unserem zentralen Verdauungsorgan, dem Darm, fünf davon ausschließlich mit seiner komplexen Mikrowelt. Das darm-assoziierte Immunsystem, die Gesundheit

der Darmschleimhaut und die Freisetzung sekundärer Pflanzenstoffe hängen alle von der Darmflora ab; in der richtigen Zusammensetzung komme sie sogar einem Jungbrunnen gleich. Wirt und Darmbakterien beeinflussen sich gegenseitig.

Christophe Lacroix und Annina Zihler von der ETH Zürich haben ein Gerät entworfen, das die Bedingungen im menschlichen Dickdarm getreulich simuliert, so dass demnächst Studien, wie sich Antibiotika oder Probiotika auf die Darmflora auswirken, durchgeführt werden können. Probiotika beinhalten die »guten« Bakterien, welche die Zusammensetzung der Darmflora günstig beeinflussen und die »schlechten« Bakterien verdrängen. Bei den Beschreibungen über die außerordentlich vorteilhafte Wirkung bestimmter probiotischer Bakterienstämme lässt sich eine gewisse Nähe der Autoren zur Firma Nestlé, die einige Patente auf solche Probiotika hält, nicht übersehen.

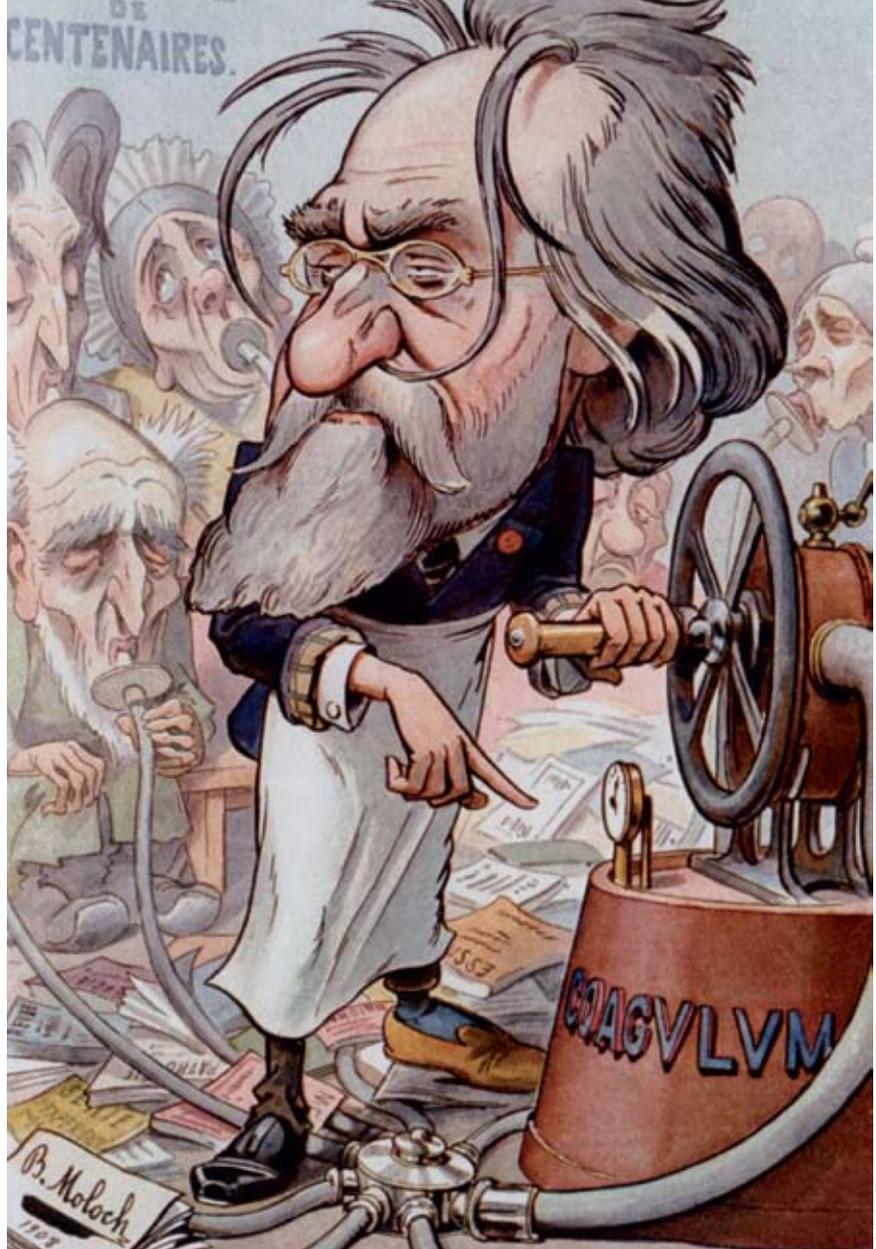
»Sag mir, was du isst, und ich sage dir, wer du bist!« Wenn man sich vor Augen

Die Karikatur zeigt Ilja Metschnikow (1845–1916, Nobelpreis für Medizin 1908), der die Idee vertrat, dass eine gesunde Darmflora, zu erreichen durch den Konsum von Joghurt, das Leben verlängere. Metschnikow leitete auch eine Firma namens Le Ferment zur Herstellung von Joghurt-Reinkulturen.

führt, dass jedes einzelne Molekül, das unseren Körper aufbaut, vorher mit der Nahrung aufgenommen werden muss, dann erscheint dieses Sprichwort nur logisch. Aber die Nahrung wirkt auch direkt auf die Aktivität unserer Gene ein. Lauter Wissenschaften mit neuen Namen befassen sich mit derlei Zusammenhängen: Während die Nutrigenomik danach fragt, wie die Ernährung die Expression des Genoms beeinflusst, möchte die Nutrigenetik herausfinden, wie die Gene die Ernährungsweise einer Person bestimmen. Solche Untersuchungen sollen letztlich der Konsumentendiagnostik und -beratung dienen. In der Metabolomik analysiert man Stoffwechselzwischenprodukte (Metaboliten) zahlreicher Testpersonen, um damit komplexe Stoffwechselprofile zu erstellen, die eine individualisierte Ernährungs- und Gesundheitsberatung ermöglichen sollen. In Zukunft gäbe es dann individuell zugeschnittene Lebensmittelprodukte, die optimal zur Gesunderhaltung beitragen würden. Personalisierte Ernährung, automatische Ernährungsbeobachter, cremiges Eis ohne Fett – ein wenig mulmig wird einem schon! Wo bleibt da die Freude am Essen?

Der Schwerpunkt der Ernährungsforschung liegt eindeutig im naturwissenschaftlichen Bereich. Nur ein Beitrag untersucht das menschliche Ernährungsverhalten und würdigt die Nahrungsaufnahme als geselligen Genuss und gesellschaftliches Ritual. Während die so genannten Kommensalisten (zum Beispiel Franzosen) eine unproblematische Haltung zum Essen haben und einfache Grundregeln befolgen, wie Maß halten, abwechslungsreich essen und feste Essenszeiten einhalten, gehen die Individualisten (zum Beispiel Amerikaner) davon aus, dass es nicht leicht sei, sich gut zu ernähren. Man müsse sich erst eingehend informieren und dann die Wahl treffen, welche Nahrung man seinem Körper am besten zuführt. Merkwürdigerweise haben aber die geselligen, genussfreudigen Esser in Frankreich viel weniger Probleme mit Übergewicht und dessen Folgen als die rationalen Esser in Amerika.

Ein großes, globales Problem ist es, genügend und ausreichend gute Nahrung sowie sauberes Wasser für alle, insbesondere



in den Entwicklungsländern, zur Verfügung zu stellen. Auch mit diesen Problemen beschäftigt sich die aktuelle Forschung. Die Wissenschaftler stellten »fortifizierte« Grundnahrungsmittel her, zum Beispiel Reis- oder Weizenkörner, die mit Eisen angereichert sind, und konnten dadurch bei Kindern in Indien Blutarmut und Eisenmangel wirksam bekämpfen. Mit gentechnischen Methoden sollen Reispflanzen entwickelt werden, die lange und starke Überschwemmungen tolerieren, oder Mais- und Weizenarten, die auch auf salzreichem Boden gedeihen. Besonders faszinierend ist der Bericht über eine neue Membran mit Aquaporinen, Poren, die nur reines Wasser passieren lassen und somit der Wasseraufbereitung dienen könnten. Die Struktur der Aquaporine wurde dabei dem Menschen abgeschaut, wo sie in der Niere und verschiedenen Drüsen vorkommen.

Die meisten der über 60 Beiträge sind gut verständlich geschrieben und anspre-

chend aufgebaut, trotzdem aber wissenschaftlich anspruchsvoll. Dass die Qualität der Artikel eher heterogen ist und einiges sich wiederholt, darf bei über 100 Autoren nicht verwundern.

Das Buch ist empfehlenswert für alle, die es ein bisschen genauer wissen wollen. Es ist sehr umfangreich und sicher eher dafür gemacht, zu einem interessanten Thema das Wichtigste gezielt nachzulesen, als das Gesamtwerk von Anfang bis Ende durchzuarbeiten.

Tanja Neuvians

Die Rezensentin hat in Medizin und Tiermedizin promoviert und arbeitet als freie Medizinerin in Ladenburg.

Esther V. Schärer-Züblin (Hg.)

Forschung und Ernährung – ein Dialog

Wiley-Blackwell, Weinheim 2009.

336 Seiten, € 29,90

Verliert das Universum Energie?

Schon in der Schule lernen wir: Die Gesamtenergie eines Systems bleibt konstant. Doch das expandierende Universum scheint diesen Grundsatz zu verletzen



MARK HOOPER

WEITERE THEMEN IM NOVEMBER

Wale als Wasserballons

Die größten Wale dehnen ihren Mundraum – die Hälfte ihres Körpers – wie Ballons, wenn sie einen Riesenschluck Wasser voller Kleinlebewesen nehmen

Experimentelle Mathematik

Auf fast schon wundersame Weise stellt sich in einem scheinbar chaotischen System wieder Ordnung ein

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



GERALD SLOTA

Neue Erklärung für chronische Schmerzen

Übereifrige Gliazellen, Helfer der Neurone, machen Schmerzsensoren nach einer Verletzung manchmal dauerhaft überempfindlich

Globale Auswirkungen lokaler nuklearer Konflikte

Auch ein regional begrenzter Atomkrieg würde weltweit zu einem katastrophalen Mangel an Nahrungsmitteln führen



GETTY IMAGES / TIME LIFE PICTURES / US GEOLOGICAL SURVEY / DAVID HARLOW