

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

Riesensaurier
Die wahren
Herrscher
der Urzeit



NOVEMBER 2012

ATOMWAFFEN

Uran-Anreicherung per Laser
erschwert Rüstungskontrolle

VOGELGRIPPE

Virenforschung
in der Kritik

FINANZKRISE

Mathematiker bestimmen
Kreditrisiken neu

ÖKOSYSTEM MENSCH

Tausend Billionen Freunde

Schützen Mikroben
vor Fettleibigkeit
und Autoimmun-
krankheiten?



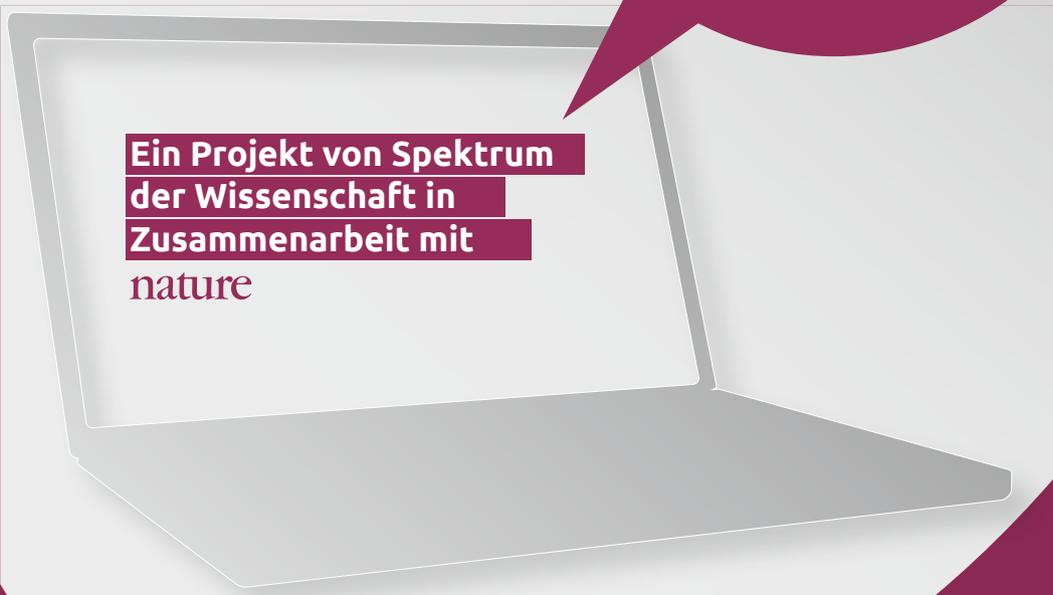
7,90 € (D/A) · 8,50 € (L) · 14,- sFr.
D6179E





SciLogs

*Diskutieren Sie mit –
auf unserem Portal für
Wissenschaftsblogs!*



**Ein Projekt von Spektrum
der Wissenschaft in
Zusammenarbeit mit
nature**

*Jetzt auch
auf Englisch!*

**www.SciLogs.com
www.SciLogs.de**

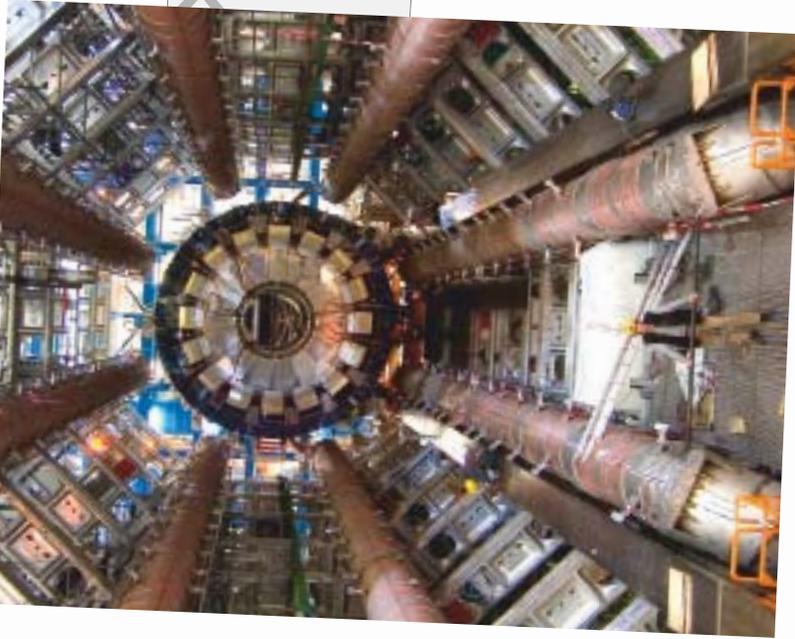
Auf SciLogs bloggen mehr als 100 Wissenschaftler aus den verschiedensten Fachgebieten sowie mehrere Wissenschaftsjournalisten. Ihr Anliegen ist der interdisziplinäre Dialog über Wissenschaft in all ihren Facetten: Forschung, Anwendung, Politik, Ethik, Werte.

Deutschlands erstes wöchentliches Wissenschaftsmagazin

Testen Sie
4 Ausgaben
GRATIS

Spektrum
DER WISSENSCHAFT
DIE WOCHE

Exklusive Inhalte aus
nature



NR

38

2009
2012

- > Gewitter durchlöchern Ozonschicht
- > Künstliche Quelle ahmt Herzschlag nach
- > Schwarzes Loch zerreißt Stern und bildet Materiescheibe aus

TOPTHEMA: TEILCHENPHYSIK

Das Gespenst von Genf wird greifbar

Am Mittwoch hat das CERN die Entdeckung eines neuen Teilchens bekannt gegeben. Auf das Higgs-Boson wollen sich die Forscher aber noch nicht endgültig festlegen.



ERBGUT

Wird die Evolution umgeschrieben?



TROPENKRANKHEITEN

Ein bler Geselle kurz vor dem Aus



INTERKONTINENTALE STAUBDRIFT

Von Afrika zum Amazonas

zen, also zur alle aus anorganisch dazu beispielsweise (U308, ein Urar Experimente zeit

Die Genanaly wenige Genverä die Variante M. offenbar in Anp konzentrationer

Spektrum DER WISSENSCHAFT DIE WOCHE

- in neuem Layout und optimiert für digitale Endgeräte
- jede Woche ausgewählte Analysen, Kommentare, Nachrichten und Bilder aus der Wissenschaft
- als PDF einfach über E-Mail oder per Link zu beziehen
- mit exklusiven Übersetzungen aus **nature**

W

zelen Bauelem noch fast so lang Hwang von der t bana-Champaigt ben nun eine bi

öglichkeit, Jmbauten bedingun- Kernquali- :mophilen <

210904109,

ignesium - Tagesdosis elektrische und Spu- n Element. oden oder altung be- ber ultra- nige Was- , um die-

TITELTHEMA



NOAA/NSA, GOES PROJECT (PUBLIC DOMAIN)

GEOENGINEERING

Was kostet die Welt?

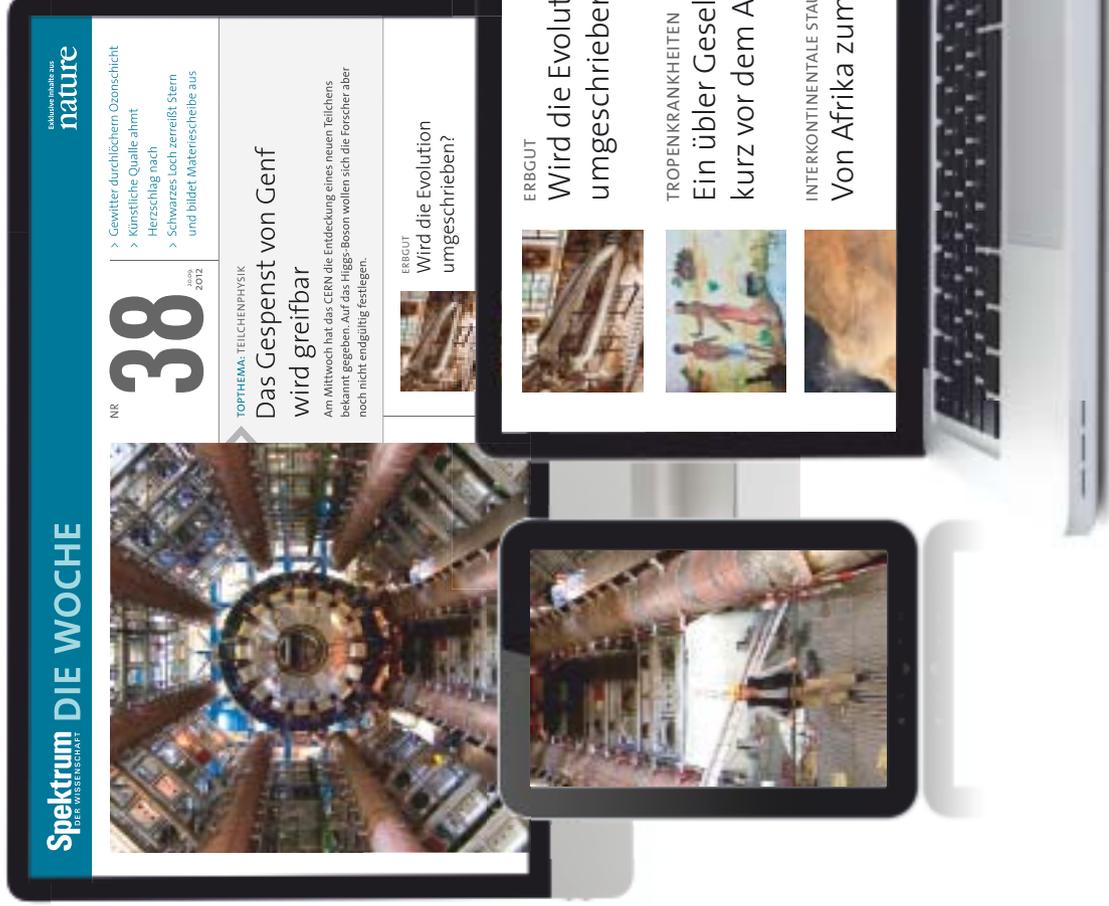
von Lars Fischer

Eine neue Studie kommt zu dem Schluss: Den Klimawandel mit Schwefelteilchen in der Atmosphäre zu bremsen, ist nicht nur technisch durchführbar, sondern sogar recht kostengünstig. Doch politisch ist das Thema ebenso komplex wie die Emissionsreduktion. Es drohen nationale Alleingänge.

Lesen Sie »Spektrum – Die Woche« viermal gratis!

Jetzt jeden Donnerstag

- Mit mehr als 30 Seiten News, Kommentaren, Analysen und Bildern aus der Forschung
- Im Abo nur 0,77 € pro Ausgabe
- Jederzeit kündbar



Testen Sie
4 Ausgaben
GRATIS mit Ihrem
Zugangskode:

K8CW8X1

Aktionszeitraum bis 31.12.2012



Spektrum DIE WOCHE
DER WISSENSCHAFT

www.spektrum.de/testwochen



Carsten Könniker
Chefredakteur
koenneker@spektrum.com

Adipositas und Antibiotika

1734 Tonnen Antibiotika haben Pharmafirmen laut Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit 2011 an deutsche Tierärzte ausgegeben. Der überwiegende Teil dürfte in der Fleischproduktion gelandet sein. Eine weitere verstörende Zahl kommt aus Nordrhein-Westfalen: Einer Untersuchung des dortigen Verbraucherschutzministeriums zufolge wurden 96 Prozent aller Hähnchen in 182 überprüften Mastbetrieben mit Antibiotika aufgepäppelt. Die Gründe für eine derart flächendeckende medizinische Versorgung sind nicht nur die extremen Bedingungen der Massentierhaltung, unter denen sich Krankheiten rasend schnell ausbreiten können. Antibiotika steigern auch die Futterverwertung, sprich die Gewichtszunahme der Tiere. Zwar dürfen die Präparate seit 2006 nicht mehr zu diesem Zweck eingesetzt werden, doch die aktuellen Zahlen lassen vermuten, dass das Verbot mehr oder weniger umgangen wird. Die Folge: Riesige Mengen an Antibiotika gelangen in die Umwelt. Eine zu großzügige Verabreichung der Medikamente fördert dabei nicht nur die Bildung resistenter Bakterienstämme. Sie könnte auch zu einem weiteren brisanten Phänomen beitragen: Studien der letzten Jahre zeigen, dass viele der im menschlichen Körper lebenden Bakterien für die Erhaltung unserer Gesundheit notwendig sind. Die Ausmerzungen dieser Mikroben bewirkt möglicherweise, dass sich Fettleibigkeit sowie Autoimmunerkrankungen immer stärker ausbreiten (siehe S. 26).

Vor 15 Jahren, im Oktober 1997, startete die digitale Berichterstattung von »Spektrum der Wissenschaft«. Jenseits des Hefts informieren wir Sie heute auf **Spektrum.de** täglich durch Meldungen, aktuelle Hintergrundberichte, Kommentare, Interviews, Videos und vieles mehr. Seit 2004 erscheint außerdem das wöchentliche PDF-Magazin **Spektrum – Die Woche**, das erste deutsche Wochenmagazin über Wissenschaft. Zum 15-jährigen Jubiläum haben wir **Spektrum – Die Woche** nun grundlegend überarbeitet: mehr Analyse, neue Gestaltung, verbesserte Lesbarkeit. Erfahren Sie jeden Donnerstag, was aktuell ist in der Wissenschaft und wie Experten die Entwicklungen einordnen. Und dies mit dem Tiefgang, den Sie von »Spektrum der Wissenschaft« gewohnt sind. Ich lade Sie ein, unsere »Woche« fortan regelmäßig als aktuelle Ergänzung unserer Berichterstattung im gedruckten Heft zu lesen!

Herzlich Ihr

Carl Hönig



Spektrum – Die Woche ist Deutschlands erstes wöchentliches Wissenschaftsmagazin. Es erscheint digital im PDF-Format. Über Links gelangen Sie aus den einzelnen Artikeln direkt ins Internet, wo die »Spektrum«-Redaktion ergänzende Informationen, Videos sowie die Originalquellen der zu Grunde gelegten Studien für Sie zusammenstellt. Jede Ausgabe enthält außerdem einen ausgewählten Artikel aus der aktuellen **nature** – exklusiv auf Deutsch. Testen Sie die neue »Woche« über vier Ausgaben gratis (siehe unser Angebot auf der linken Seite)!

AUTOREN IN DIESEM HEFT



Die größten Dinosaurier faszinieren die Paläontologen **Kristina A. Curry Rogers** und **Michael D. D'Emic** seit vielen Jahren. Ihre Suche nach Fossilien von Titanosauriern und anderen Sauropoden führte sie in mehrere Erdteile (S. 34).



Nicht nur Konkurrenz und Egoismus, sondern auch Kooperation hilft der Evolution auf die Sprünge, glaubt der Harvard-Biologe und Mathematiker **Martin A. Nowak** (S. 76).



Wie viel ist eine Staatsanleihe wert? Das ist neuerdings ein drängendes und überraschend kniffliges Problem. Der Mathematiker **Roland Stamm** beschäftigt sich damit, die mathematische Theorie der davonlaufenden Realität anzupassen (S. 94).

7 Editorial

10 Leserbrief/Impressum

12 Spektrogramm

Doppelstern mit zwei Planeten • Frühe Einsamkeit verändert Hirnzellen • Kochendes Wasser – blasenfrei • Mutation lässt Pferde im Passgang laufen • Kunststoff tötet Bakterien • Aus Wärme wird Strom

15 Bild des Monats

Kein Überlebender in Sicht

16 Forschung aktuell

Vielfalt der Frühmenschen
Unsere Gattung bildete anfangs mehrere Arten.

Wandlungsfähige Bauten
Bewegliche Tragwerke ermöglichen Ultraleichtbau.

Das Immunproteasom
Die Molekülstruktur der Protein-Recyclingtonne

für das Immunsystem konnte aufgeklärt werden.

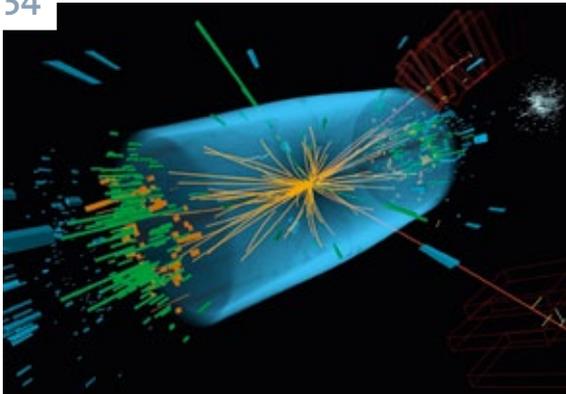
Internationale Missionen
Öfter mal in der Krise: ESA-Raumfahrtprojekte.

SPRINGER'S EINWÜRFE
Schlaflos im Sexrausch
Manche Vögel bleiben in der Balz wochenlang wach.

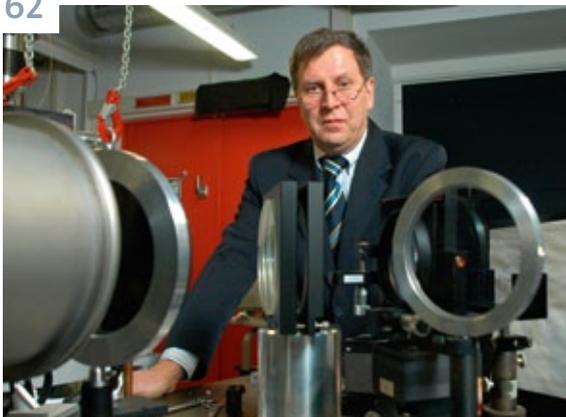
34



54



62



..... BIOLOGIE & MEDIZIN

▶ 34 **Verkannte Giganten**

Kristina A. Curry Rogers und Michael D. D'Emic

Die Sauropoden waren die größten Landtiere aller Zeiten. Entgegen früherer Ansicht herrschten sie bis zum Ende der Dinosaurierzeit – in unerwarteter Vielfalt!

42 **Das geheimnisvolle Innenleben der Zellen**

Roberta Kwok

Unter dem Mikroskop gibt es noch einiges zu entdecken: In jüngster Zeit stießen Biologen auf eine Reihe neuer Strukturen, die ganz unterschiedliche Aufgaben erfüllen.

▶ 46 **Warten auf die Katastrophe**

Fred Guterl

Aus Vogelgrippeviren können offenbar jederzeit tödliche Erreger hervorgehen, die sich unter Menschen verbreiten. Experten rätseln, wie groß die Gefahr wirklich ist.

..... PHYSIK & ASTRONOMIE

54 **Der lange Weg zum Higgs**

Guido Tonelli, Sau Lan Wu und Michael Riordan

Drei der beteiligten Forscher schildern die entscheidenden Monate vor der Verkündung der Entdeckung des Higgs-Bosons – und riskieren einen Blick in die Zukunft.

INTERVIEW

▶ 62 **Urananreicherung mit Lasertechnik – billig und politisch hochbrisant**

Wolfgang Sandner warnt vor einer erleichterten Verbreitung von Nuklearwaffen durch die neue »Silex«-Technik.

SCHLICHTING!

74 **Warum wir in der Sauna überleben**

H. Joachim Schlichting

Schweiß kühlt. Doch wenn er in wahren Sturzbächen am Körper herabströmt, erhitzt sich dieser in Wahrheit.



26

► TITELTHEMA

Tausend Billionen Freunde

Jennifer Ackerman

Ist die in westlichen Ländern grassierende Fettleibigkeit auf vermehrte Antibiotikagaben für Babys zurückzuführen? Rühren die zunehmenden Autoimmunkrankheiten von einem Trend zu Kaiserschnittgeburten her? Auf solche Fragen stoßen Forscher, seit sie die unzähligen nützlichen Bakterien näher untersuchen, die so manche wichtige Körperfunktion erst ermöglichen.

86



94



104 Rezensionen

D. Graeber: Schulden • A. Weisman: Gaviotas • U. Herb (Hg.): Open Initiatives • K. Adam: Kampf gegen die Natur • W. Gruber et al.: Gedankenlesen durch Schneckenstreicheln • B. Kast: Ich weiß nicht, was ich wollen soll • D. Templar, B. Leith: Planet des Lebens (DVDs)

..... MENSCH & KULTUR

76 Warum sind wir hilfsbereit?

Martin A. Nowak

Auch Kooperation treibt die Evolution voran.

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

82 Von der Schipiste in den abstrakten Wahrscheinlichkeitsraum

Marc Dressler

Der große Mathematiker Andrei N. Kolmogorow.

..... ERDE & UMWELT

86 Eisschmelze am Südpol

Douglas Fox

Angesichts kollabierender Eisschelfe in der Antarktis fragt sich: Steigt der Meeresspiegel viel schneller als erwartet?

..... TECHNIK & COMPUTER

► 94 Finanzmathematik nach der Krise

Roland Stamm

Da auch große Banken pleitegehen können, müssen Theorie und Algorithmen neu konzipiert werden.

112 Wissenschaft im Rückblick

Von der frei stehenden Treppe zur fliegenden Untertasse

114 Vorschau

Titelmotiv: Bryan Christie [M]
Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ► gekennzeichnet.

Feinheiten der Wellenfunktion

Markus Aspelmeyer und Markus Arndt diskutierten, ob quantenphysikalische Phänomene auch bei großen Massen auftreten. (»Schrödingers Katze auf dem Prüfstand«, Oktober 2012, S. 44)

Norbert Hinterberger, Hamburg: Der Teilchenbegriff ist vermutlich rein subjektiv – intersubjektiv zwar, aber eben subjektiv für den Teil der Welt, den wir klassisch sehen. H. Dieter Zeh hat dazu wiederholt in überzeugender Weise argumentiert. Der Welle-Teilchen-Dualismus scheint physisch diskret nicht vorhanden zu sein. Objektiv beziehungsweise physisch fundamental scheint nur die Welle zu sein. Unter Laborbedingungen (ohne Dekohärenz) lässt sich das ja auch deutlich zeigen, wie wir hier – insbesondere in dem kleinen Film – sehen. Das Molekül wird von den Experimentatoren selbst als Materiewellenüberlagerung beschrieben, sobald wir seine Welleninterferenzen auf dem Schirm sehen. Warum lassen wir es nicht dabei? Was uns an dieser Welle erscheint wie ein »Kollaps der Wellen-

funktion« zu einem »Teilchen« an einem bestimmten Ort zu einer bestimmten Zeit im Fall einer Messung, ist einfach die inzwischen recht bekannte Tatsache, dass wir mit der Messung wie mit jeder beliebigen anderen Wechselwirkung auch das zu messende System stören oder zerstören beziehungsweise zur Dekohärenz bringen. Das heißt aber nicht, dass die Superposition »kollabiert«. Im Gegenteil: Sie ist jetzt in einer noch großräumigeren Verschränkung definiert.

Michael Engels, Krefeld: Im Artikel wird gesagt, dass die Schrödinger-Gleichung linear ist, so dass nicht klar ist, warum keine makroskopischen Überlagerungszustände beobachtbar sind. Wenn man Teilchen als tatsächlich punktförmig annimmt, ist dies auch richtig. Wenn man aber die Wellenfunktion als tatsächliche Verteilung des Teilchens beziehungsweise der Teilchen mit allen seinen beziehungsweise ihren Eigenschaften wie zum Beispiel Ladung interpretiert, wird die Wellenfunktion mehrerer gekoppelter Teilchen nichtlinear. Bei der Berechnung von Quantensystemen mit interagierenden Teilchen



Schrödingers Katze hat ein langes Leben: Aktuell untersuchen Forscher, ob sich auch Makroteilchen wie Quantenobjekte verhalten.

(etwa des Heliumatoms) wird auch wirklich so gerechnet, als wären die Teilchen gemäß der Wellenfunktion verteilt. Dies wird allerdings so interpretiert, als gäbe es einen tatsächlichen Ort des Teilchens, den man aber nicht kennt. Daher rechnet man mit einer mittleren Teilchendichte, die sich aus der Wellenfunktion ergibt.

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. Carsten Könneker (v.i.S.d.P.)
Redaktionsleiter: Dr. Hartwig Hanser (Monatshefte), Dr. Gerhard Trageser (Sonderhefte)
Redaktion: Thilo Körkel, Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online-Koordinator), Dr. Frank Schubert, Dr. Adelheid Stahnke, Antje Findekle (Bild des Monats); E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Editor-at-Large: Dr. Reinhard Breuer
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer
Schlussredaktion: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Referentin des Chefredakteurs: Kirsten Baumbusch
Redaktionsassistenz: Erika Eschwei
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 -751; Amtsgericht Mannheim, HRB 33814
Verlagsleiter: Richard Zinken
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Gerald Bosch, Dr. Markus Fischer, Dr. Susanne Lipps-Breda, Dr. Michael Springer
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

Die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH ist Kooperationspartner des Nationalen Instituts für Wissenschaftskommunikation gGmbH (NaWik). Das NaWik ist ein Institut der Klaus Tschira Stiftung gGmbH und des Karlsruher Instituts für Technologie. Wissenschaftlicher Direktor des NaWik ist Spektrum-Chefredakteur Dr. Carsten Könneker.

Bezugspreise: Einzelheft € 7,90 (D/A) / € 8,50 (L) / sFr. 14,-; im Abonnement € 84,- für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 69,90; E-Paper € 60,- im Jahresabonnement (Vollpreis); € 48,- ermäßigter Preis auf Nachweis. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70). Die Mitglieder des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBio) und von Mensa e.V. erhalten SdW zum Vorzugspreis.

Anzeigen: iq media marketing gmbh, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH, Bereichsleitung Anzeigen: Marianne Dözl; Anzeigenleitung: Patrick Priesmann, Tel. 0211 887-2315, Fax 0211 887-97-2315; verantwortlich für Anzeigen: Christian Herp, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2481, Fax 0211 887-2686
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. 33 vom 01.01.2012.
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: © 2012 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.

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

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN

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



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



Gentechnik versus Mutagenese

Im Kampf gegen das Denguefieber versuchen Forscher, Stechmücken durch genetische Manipulation zu dezimieren, berichtete die Molekularbiologin Bijal Trivedi. (»Moskitos mit Selbstmordgen«, August 2012, S. 34)

Dietrich H. Nies, Halle: Schöner Artikel, allerdings gab es 1969 (WHO, Indien) noch keine Gentechnik. Vermutlich wurden die Mücken mit mutagenen Agenzien behandelt, was kein Verfahren ist, das per se genetisch veränderte Organismen erzeugt. Beides sollte nicht vermengt werden, zumal schwer zu verstehen ist, warum die unkontrollierte Veränderung von Hunderten von Genen durch mutagene Agenzien bei Züchtungen »gut« und »biologisch« sein soll, die gezielte, kontrollierte Veränderung eines Gens aber »böse, böse Gentechnik«.

Problematische Bohrungen

Der Geowissenschaftler Karl Urban stellte neue Techniken vor, mit denen sich auch in unseren Breiten die Wärme des Erdinnern anzapfen lässt. (»Energie aus der Tiefe«, September 2012, S. 72)

Klaus Gims, Holzkirchen: Die oberflächennahe Geothermie mittels Erdwärmepumpen ist in Deutschland problematisch. Grund ist eine bei nicht wenigen Bohrunternehmen anzutreffende ausgeprägte Betrugsmentalität. Betrogen wird bei der »Verpressung« genannten Abdichtung des Bohrkanals. Diese soll neben einer besseren Wärmeübertragung auch das Übertreten von Wasser in andere geologische Formationen verhindern, falls ein Grundwasserstockwerk angebohrt wird. Ob damit der Vorfall in Staufen hätte verhindert werden können, entzieht sich meiner Kenntnis. In jedem Fall führt eine unzureichende Verpressung zu einer Effizienzminderung bei der Wärmepumpe und macht das Vorhaben dadurch oft

unwirtschaftlich. Je nach geologischen Verhältnissen ergibt sich für das Bohrunternehmen durch den Betrug eine Kostenersparnis bis zur Hälfte des Auftragswerts. Nachdem ich große Unterschiede in der Verpressung verschiedener Bohrunternehmen auf dem gleichen Grundstück festgestellt hatte, habe ich einige Erdwärmepumpen beobachtet. Dabei konnte ich kein weiteres Bohrunternehmen mehr finden, das von sich aus und ohne Reklamation eine fachgerechte Verpressung ausgeführt hätte. Dennoch waren alle diese Firmen nach W120 für solche Erdwärmepumpen zertifiziert.

Virtuelle Teilchen

Mit der Unitaritätsmethode können die Physiker Zvi Bern, Lance Dixon und David Kosover selbst heftige Kollisionen im Teilchenbeschleuniger LHC beschreiben. (»Mit einem Rechenrick zur umfassenden Theorie der Naturkräfte«, September 2012, S. 38)

Florian König, Münster: In dem Artikel wird der Eindruck erweckt, dass virtuelle Teilchen nur in Feynman-Diagrammen mit Schleifen auftreten. Das ist falsch. Bereits die inneren Linien in Feynman-Diagrammen auf Baumgraphenniveau können virtuelle Teilchen darstellen. So erfüllt zum Beispiel das innere d-Quark in dem auf S. 41 gezeigten Diagramm (bei Abstrahlung eines Gluons endlicher Energie) nicht mehr die relativistische Energie-Impuls-Beziehung für ein d-Quark, ist also virtuell. Schade übrigens, dass nicht ein wenig detaillierter darauf eingegangen wurde, was denn nun die Unitaritätsmethode ausmacht.

Erinnert an Frankenstein

Der Neurowissenschaftler Henry Markram möchte mit der virtuellen Simulation des Gehirns unser Denkorgan besser verstehen. (»Auf dem Weg zum künstlichen Gehirn«, September 2012, S. 82)

Ernst Hammann, München: Das Ganze erinnert mich ein bisschen an Fran-

FOLGEN SIE UNS
IM INTERNET



www.spektrum.de/facebook



www.spektrum.de/youtube



www.spektrum.de/studivz



www.spektrum.de/twitter

kenstein, aber davon haben sich Menschen ja noch nie aufhalten lassen, im Gegenteil. Das Projekt könnte aber an einer ganz anderen Klippe zerschellen. Was, wenn das simulierte Gehirn erwacht und ein Bewusstsein und eine Persönlichkeit entwickelt? Dann ist es wohl als Mensch anzusehen (zumindest werden die üblichen gesellschaftlichen Querulantengruppen das lautstark fordern). Als Mensch hat es dann alle Menschenrechte, und man darf es nie mehr abschalten oder daran herumexperimentieren. An dieser Stelle endet dann unser Gottspielen.

Erratum

»Prionen bei Pilzen«, Forschung aktuell, Oktober 2012, S. 17

In der Grafik auf S. 18 ist uns ein Fehler unterlaufen: Es muss statt »DNA-Strang« »Boten-RNA-Strang« heißen.

BRIEFE AN DIE REDAKTION

... sind willkommen! Schreiben Sie uns auf www.spektrum.de/leserbriefe

Spektrum der Wissenschaft
Leserbriefe / Sigrid Spies
Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg
E-Mail: leserbriefe@spektrum.com

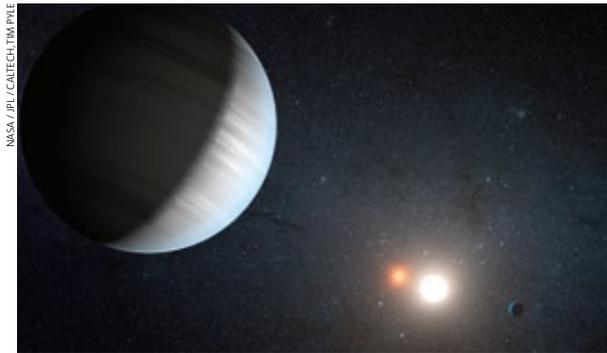
Die vollständigen Leserbriefe und Antworten der Autoren finden Sie ebenfalls unter: www.spektrum.de/leserbriefe

ASTRONOMIE

Erster Doppelstern mit zwei Planeten

Astronomen um Jerome Orosz von der San Diego State University (USA) haben erstmals einen Doppelstern entdeckt, den zwei Planeten umrunden. Sie werteten Daten des amerikanischen Weltraumteleskops Kepler aus, das auf eine Himmelsregion im Sternbild Schwan gerichtet ist, um dort extrasolare Planeten aufzuspüren. Der Fund beweist, dass selbst in der Umgebung von kreisenden Sternpaaren, in der die Gravitationskräfte ständig schwanken, mehrere Begleiter entstehen und überdauern können.

Um Exoplaneten zu erspähen, nutzt Kepler die Transitmethode – es registriert also die periodischen Helligkeitsänderungen, die entstehen, wenn der Planet immer wieder vor seinem Mutterstern vorüberzieht und diesen verdunkelt. Das funktioniert allerdings nur bei Himmelskörpern, die mit



Das Sternsystem Kepler-47 enthält zwei Sonnen (unten in der Illustration) und zwei Planeten. Der äußere Planet (links, im Vordergrund) bewegt sich in der habitablen Zone.

ihrem Stern und dem Teleskop regelmäßig in einer Linie stehen. Diese Voraussetzung ist beim Sternsystem Kepler-47 gegeben, das von der Erde etwa 4900 Lichtjahre entfernt ist.

Wie die Daten zeigen, besteht Kepler-47 aus einem Doppelstern mit zwei Begleitern. Die Sterne umrunden einander einmal in 7,45 Tagen. Der innere Planet benötigt etwa 50 Tage, um das Sternpaar einmal zu umlaufen,

der äußere rund 300 Tage. Beide sind mit 3 beziehungsweise 4,6 Erddurchmessern deutlich größer als die Erde.

Der äußere Planet bewegt sich in der habitablen Zone – auf ihm könnte es also flüssiges Wasser geben, wenn er ein Gesteinsplanet wie die Erde wäre. Allerdings vermuten die Forscher, dass er ein Gasriese ist; jedoch könnte er große Monde haben.

Science 337, S. 1511–1514, 2012

Spektrum DER WISSENSCHAFT DIE WOCHE

Mehr aktuelle Analysen und Spektrogramme!

Lesen Sie in **Spektrum DER WISSENSCHAFT DIE WOCHE**

- Evolution: Wie das Einhorn zu seinem Horn kam
- Fernerkundung: Methusalem im All
- Tumoren: Kombipackung gegen den Krebs

www.spektrum.de/diewoche

Deutschlands erstes wissenschaftliches Wochenmagazin!

HIRNFORSCHUNG

Frühe Isolation verändert Zellen im Gehirn

Erleben Kinder keine Zuwendung, entwickeln sie schwere seelische und kognitive Störungen, die teils lebenslang anhalten. Nun haben Forscher an Mäusen beobachtet, dass soziale Isolation im frühen Alter die Reifung von Hirnzellen ausbremst.

Die Wissenschaftler um Gabriel Corfas von der Harvard Medical School trennten drei Wochen alte Mäuse von ihrer Gruppe. Mit sieben Wochen schnitten die Tiere in Verhaltenstests deutlich schlechter ab als Artgenossen, die in Gesellschaft aufgewachsen waren. Weitere zwei Wochen später untersuchte das Team die Gehirne der Nager. Dabei zeigten sich Veränderungen im präfrontalen Kortex, einer Region der Großhirnrinde, die für soziales Verhalten und kognitive Funktionen wichtig ist. Bei den isoliert gehaltenen Tieren waren dort bestimmte Gliazellen

weniger ausgereift: Sie hatten kürzere Zellfortsätze und waren weniger verzweigt. Zudem statteten sie die Nervenfasern im präfrontalen Kortex mit dünneren Myelinscheiden aus. Diese Veränderungen bildeten sich auch dann nicht zurück, wenn die Tiere nach zwei Wochen Einsamkeit wieder zur Gruppe zurückkehrten. Bei Mäusen, die erst im Alter von fünf Wochen von den anderen getrennt wurden, zeigten sich keine solchen Veränderungen.

Die Myelinscheide beschleunigt die elektrische Signalübertragung in den Neuronen. Wenn sie dünner ist, beeinträchtigt das vermutlich die Informationsverarbeitung im Gehirn. Hier könnte ein Grund für das gestörte Verhalten der Tiere liegen. Vorangegangene Studien hatten bereits Hinweise in diese Richtung ergeben.

Science 337, S. 1357–1360, 2012

Kochendes Wasser – völlig blasenfrei

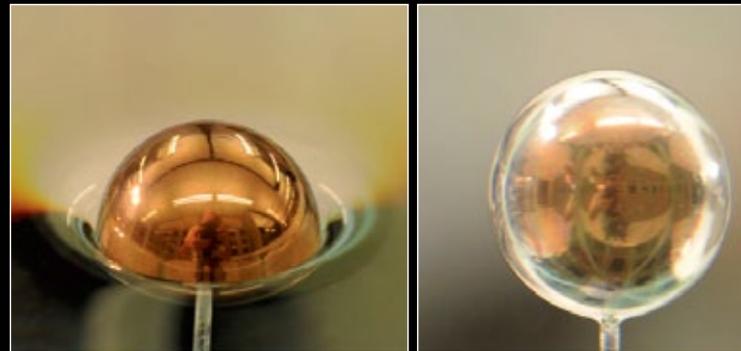
Auf einer heißen, rauen und nicht benetzbaren Oberfläche siedet Wasser, ohne Blasen zu bilden. Das haben Forscher um Ivan Vakarelski von der King Abdullah University of Science and Technology in Saudi-Arabien beobachtet. Der Effekt lässt sich möglicherweise für verschiedene Anwendungen nutzen – etwa, um Dampfexplosionen in Kernkraftwerken zu verhindern.

Eine Flüssigkeit, die auf einer erhitzten Oberfläche siedet, wechselt oberhalb bestimmter Temperaturen vom Bläschensieden – dem aus dem Alltag bekannten Brodeln kochenden Wassers – zum so genannten Leidenfrost-Regime, bei dem eine stabile, wärmeisolierende Dampfschicht die Oberfläche von der Flüssigkeit trennt. Diese Situation lässt sich etwa beobachten, wenn Wasser auf eine heiße Herdplatte spritzt; die Tropfen zischen dann auf einem Dampfpolster umher. Wie das Team um Vakarelski feststellte, hängt die Temperatur, bei der die eine Art des Siedens in die andere übergeht, stark von der Benetzbarkeit der Kontaktfläche ab.

Auf glatten, Wasser abweisenden (hydrophoben) Oberflächen geht das Bläschensieden bereits bei deutlich niedrigeren Temperaturen ins Leidenfrost-Regime über. Auf superhydrophoben Flächen, die im Nanometermaß-

stab rau sind, bleibt das Bläschensieden schließlich ganz aus: Hier entsteht die stabile Dampfschicht bei allen Temperaturen oberhalb des Siedepunkts. In einer früheren Arbeit hatte Vakarelski bereits gezeigt, dass diese Schicht den Strömungswiderstand eines Körpers in Wasser um etwa 85 Prozent reduzieren kann.

Nature 489, S. 274–277, 2012



VAKARELSKI, I.U. ET AL., NATURE 489, S.274–277, 2012, FIG.1 B+C

Kugeln mit superhydrophober Oberfläche erzeugen beim Eintauchen tiefe Krater im Wasser (links). Nach völligem Untertauchen sind sie von einer dünnen Gasschicht umgeben (rechts).

Mutation lässt Pferde im Passgang laufen

Eine einzige genetische Mutation ermöglicht Pferden, im so genannten Passgang zu laufen, bei dem die Beine der linken beziehungsweise rechten Körperhälfte gemeinsam nach vorn schwingen. Das berichten Genetiker um Leif Andersson von der Universität Uppsala (Schweden).



Flink zu Huf, und elegant noch dazu: Ein Islandpferd im schnellen Passgang.

Normalerweise beherrschen Pferde drei Gangarten: Schritt, Trab und Galopp. Einige Rassen sind noch zu weiteren in der Lage – etwa zum Tölt, einem schnellen Schritt, bei dem immer mindestens ein Fuß Bodenkontakt hat, oder eben zum Passgang. Bisher war man davon ausgegangen, dass diese exotischen Gangarten eine komplexe genetische Veranlagung erfordern. Nun haben die Forscher um Andersson als einzige Voraussetzung dafür eine Mutation im Gen *DMRT3* ausgemacht. Es kodiert für ein Protein, das an der Entwicklung von Rückenmarksneuronen beteiligt ist, welche die Bewegung der Gliedmaßen koordinieren. Infolge der Mutation ist das Protein um 174 Aminosäuren kürzer und ermöglicht die Bildung von Neu-

ronen, die sowohl die Bewegung von Vorder- und Hinterhufen als auch den Wechsel zwischen beiden Körperseiten flexibler koordinieren.

Die Forscher hatten in ihrer Studie 70 Islandpferde untersucht. 40 Tiere, die Tölt und Passgang beherrschten, wiesen die Mutation reinerbig auf, also auf beiden Kopien des Gens. Von den Pferden hingegen, die nur den Tölt konnten, trug immerhin jedes dritte die Mutation in reinerbiger Form, wie weitere Untersuchungen zeigten. Die Forscher werten das als Hinweis darauf, dass die Mutation zwar notwendig für das Beherrschen des Passgangs ist, aber nicht hinreichend: Sie spiegelt sich nur bei entsprechendem Training im Bewegungsrepertoire der Tiere.

Nature 488, S. 642–646, 2012

Medizintechnik

Neuer Kunststoff tötet Bakterien

Ein antimikrobieller Kunststoff nach dem Vorbild natürlicher Abwehrstoffe, mit denen Lebewesen eindringende Mikroben in Schach halten, haben Forscher um Gregory Tew von der University of Massachusetts hergestellt. Er tötet Bakterien effektiv ab und lässt sich etwa als Nahtmaterial zum Verschließen von Operationswunden einsetzen.

Der Kunststoff besteht aus den Substanzen Aminoethylmethacrylat und Butylmethacrylat. Seine Molekülstruktur enthält sowohl positiv geladene als auch fettlösliche Bereiche. Bakterien können auf diesem Material die Funktion ihrer Zellmembran nicht aufrechterhalten und sterben ab.

Bei Versuchen im Reagenzglas reduzierte der Kunststoff in einer Konzentration, die zehnfach über der minimal wirksamen Dosierung lag, die Zahl von *Staphylococcus-aureus*-Bakterien um mehr als den Faktor 1000. Wenn die Forscher ihn mit gängigen Nahtmaterialien mischten, genügte ein Zusatz von 0,5 Gewichtsprozent, um eine antimikrobielle Oberfläche herzustellen, die alle aufgespritzten *Staphylococcus-aureus*-Zellen abtötete. Außer gegen grampositive Bakterien wie *S. aureus* wirkt das Material auch gegen gramnegative Arten wie *Escherichia coli*, das im menschlichen Darm vorkommt.

Langmuir 28, S. 12134–12139, 2012



ONDERWISSEK / CC-BY-SA-3.0

In OP-Wunden dringen häufig Keime ein. Mikroben abtötendes Nahtmaterial könnte dazu beitragen, solche Infektionen zu verhindern.

Technologie

Aus Wärme wird Strom

In technischen Geräten geht die eingespeiste Energie oft überwiegend als Abwärme verloren. Thermoelektrische Materialien können diese zum Teil wieder nutzbar machen, indem sie Temperaturdifferenzen in elektrische Energie umwandeln. Bis-

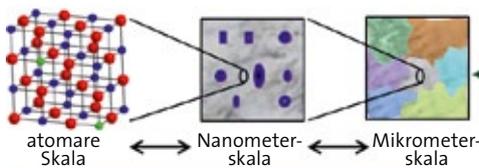
lang haben sie jedoch einen schlechten Wirkungsgrad. Kanishka Biswas von der Northwestern University in Evanston (USA) und seine Kollegen präsentieren nun einen thermoelektrischen Werkstoff, der deutlich effizienter arbeitet als frühere Materialien.

Die Forscher gingen von dem Halbleiter Bleitellurid aus, der bereits als Wärme-Strom-Wandler eingesetzt wird. Um dessen Wirkungsgrad zu erhöhen, veränderten sie seine innere Struktur auf drei ver-

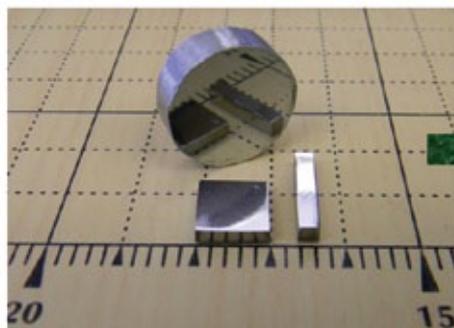
schiedenen Ebenen. Sie dotierten ihn mit Natrium und manipulierten so sein Atomgitter; sie sorgten dafür, dass sich in seinem Innern nanometergroße Kristalle aus Strontiumtellurid bildeten; und sie verarbeiteten das so gewonnene Material zu mikrometergroßen Körnchen, die sie in einem Sinterprozess zusammenbackten. Mit diesen Maßnahmen erreichten sie, dass der Werkstoff Gitterschwingungen außergewöhnlich effektiv streut, wodurch er Wärme besonders schlecht leitet. Das verleiht ihm einen Rekordwirkungsgrad: Bei Temperaturunterschieden um 600 Grad Celsius könne er bis zu 20 Prozent der Abwärme in elektrische Energie umwandeln, schreiben die Forscher.

Möglicherweise führt diese Entwicklung zu einem vermehrten Einsatz von Wärme-Strom-Wandlern. Sie könnten überall dort nützliche Dienste leisten, wo viel Abwärme entsteht, etwa in Autos, auf Schiffen oder in Kraftwerken.

Nature 489, S. 414–418, 2012

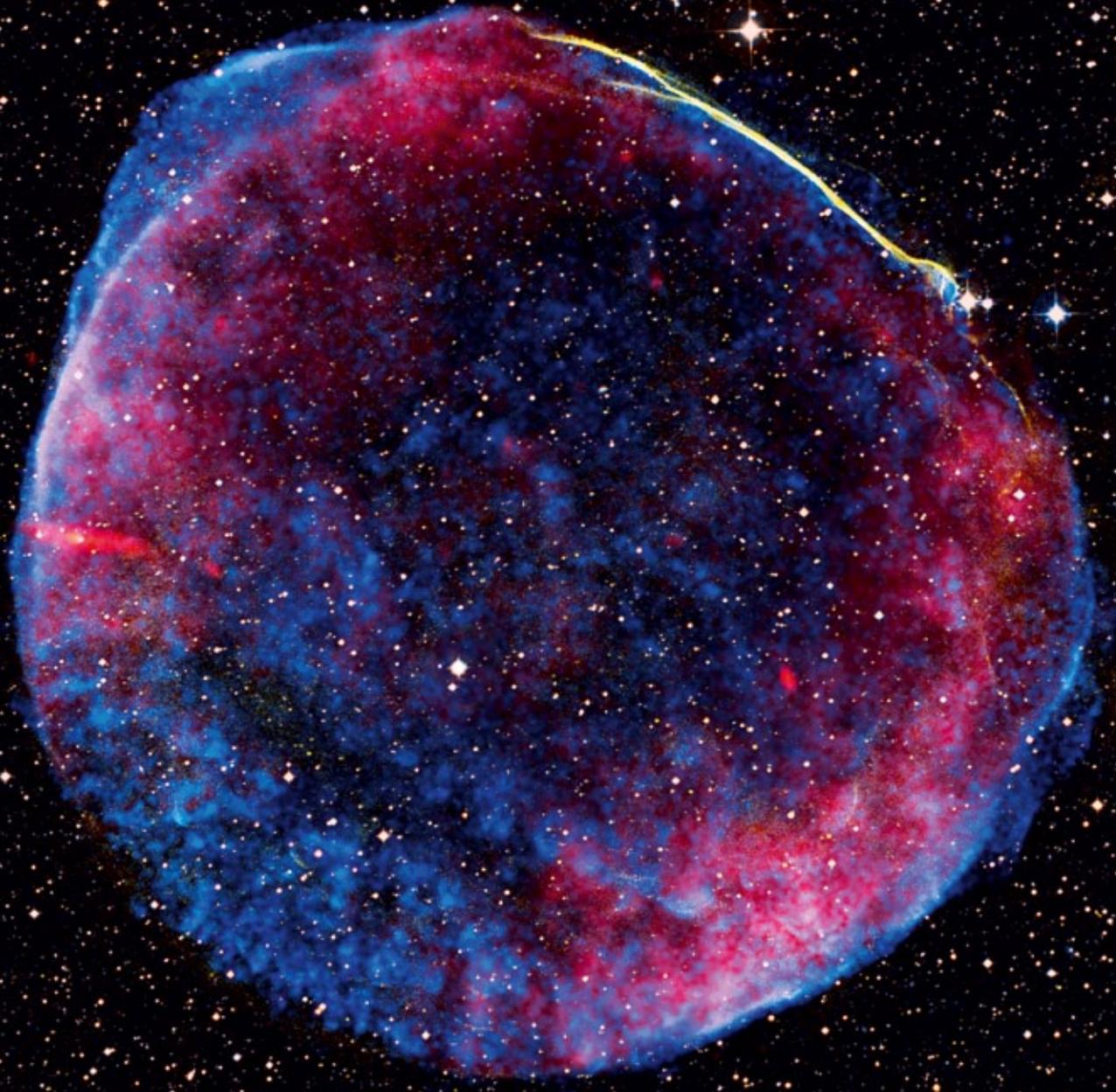


Wirkungsgrad bei Energieumwandlung steigt.



MERCOUR G. KANAZIS / NORTHWESTERN UNIVERSITY

Dank manipuliertem Atomgitter, nanometergroßen Einschlüssen und mikrometergroßer Körnung wird Bleitellurid (unten) zum überragenden Wärme-Strom-Wandler.



KEIN ÜBERLEBENDER IN SICHT

RÖNTGEN: NASA / CXUC / RUTGERS / G. CASSAM-CHENAI, J. HUGHES ET AL.; RADIO: NRAO / AUI / NSF / GBT / VLA / DYER, MADDALENA & CORNWELL; OPTISCH: MIDDLEBURY COLLEGE / F. WINKLER, NOAO / AURA / NSF / CTIO SCHMIDT & DSS

Zu einer Supernova vom Typ Ia kommt es, wenn die Masse eines Weißen Zwergs durch Materiezufuhr von einem anderen Stern einen bestimmten Wert überschreitet. Lange Zeit hielten Forscher vor allem größere Himmelskörper, etwa Rote Riesen, für die Lieferanten. Inzwischen mehren sich aber Hinweise, dass solche Supernovae auch aus der Verschmelzung von zwei Weißen Zwergen hervorgehen, die beide bei der Explosion zerstört werden. So entstand die Supernova SN 1006, die im Jahr 1006 am

Himmel erstrahlte, wohl aus einem Doppelsystem von Weißen Zwergen. Denn Forscher des Instituto de Astrofísica de Canarias entdeckten in der Umgebung des Schauplatzes trotz intensiver Suche keinen ehemaligen Begleiter. Ein größerer Beteiligter hätte jedoch »überlebt« und wäre in Teleskopen sichtbar. Nach neuen Schätzungen könnten bis zu 80 Prozent der Supernovae vom Typ Ia auf Doppelsysteme von Weißen Zwergen zurückgehen.

Nature 489, S. 533–536, 2012

Verwirrende Vielfalt von Frühmenschen

Schon länger vermuteten Forscher, dass in der Frühzeit unserer Gattung mindestens zwei Menschenarten gleichzeitig lebten. Neue Hominidenfossilien aus Kenia erhärten nun diese These.

VON BERNARD WOOD

Für Paläoanthropologen beginnt die menschliche Evolutionsgeschichte lange vor dem Auftritt vom *Homo sapiens* beim letzten gemeinsamen Vorfahren mit Schimpansen und Bonobos. Mit jenem fernen Urahn verbindet uns eine lückenlose Folge von Arten, die schließlich zur Gattung *Homo* und weiter zum *Homo sapiens* führte. Über die Anfangszeit unserer Gattung wissen Forscher allerdings noch recht wenig. Vielleicht gab es damals tatsächlich nur eine einzige Evolutionslinie, sozusagen einen unverzweigten Ast am Stammbaum. Genauso wären jedoch mehrere Linien nebeneinander vorstellbar, also mehrere frühe *Homo*-Arten gleichzeitig, und die anderen Zweige sind irgendwann abgestorben. Überzeugende Belege für diese zweite Möglichkeit entdeckte nun ein Wissenschaftlerteam um die Anthropologin Meave G. Leakey vom Turkana Basin Institute in Nairobi anhand neuerer Fossilien aus Nordkenia, und zwar von Koobi Fora am Ostufer des Turkana-sees. Demnach existierten offenbar schon ganz früh, vor zwei Millionen Jahren, wenigstens zwei unterschiedliche Linien der Gattung *Homo* (*Nature* 488, S. 201, 2012).

In der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts galt *Homo erectus* als der ursprünglichste Vertreter unserer Gattung. Von ihm gab es damals vor allem Fossilien aus China und Südostasien. Diese Frühmenschen besaßen einen kleinen Kopf und ausgeprägte Überaugenwülste. Den wenigen Skelettfunden zufolge standen und gingen sie anscheinend aufrecht, und das bereits recht ähnlich wie moderne Menschen.

Aber dann kamen um 1960 in Tansania in der Olduvai-Schlucht Fossilien zu Tage, die den Paläontologen Louis Leakey und seine Kollegen 1964 veran-

lassten, in den Stammbaum am Beginn des Menschenastes eine weitere, noch primitivere Art einzufügen. Diese Spezies nannten sie *Homo habilis*, in der Annahme, dieser »geschickte Mensch« habe die einfachen Steinwerkzeuge gefertigt, die sich in Olduvai in den gleichen Sedimentschichten fanden wie jene Fossilien. Er hatte ein noch kleineres Gehirn als *Homo erectus*, und im Skelettbau erinnerte er etwas mehr an Menschenaffen. Später entdeckten Forscher auch in Koobi Fora versteinerte Knochen, die anscheinend ebenfalls von *Homo habilis* stammten. Allerdings stießen sie dort außerdem auf Schädel-fossilien von offenbar sehr frühen Vertretern der Gattung *Homo*, die denen von Olduvai nicht so recht ähnelten.

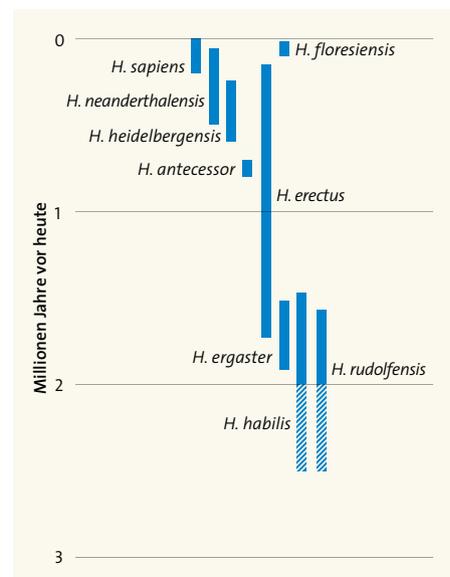
In dieser Situation wurde ich Ende der 1970er Jahre damit betraut, eine sinnvolle Ordnung in die frühen *Homo*-Fossilien von Koobi Fora zu bringen, die unter anderem Schädelkalotten, Ge-

sichtsschädel, Unterkiefer und Zähne umfassten. Zwar zeugten auch die Olduvai-Fossilien von einer ziemlich großen Variationsbreite, doch hatten in ihrem Fall Forscher gute Argumente dafür, dass sie alle zu derselben Art, besagtem *Homo habilis*, gehörten. Nur – galt Gleiches für die Koobi-Fora-Fossilien? Anders gesagt: Ließen sich die beiden Menschenformen, die es dort in der Frühzeit offensichtlich gegeben hatte, schlicht den beiden Geschlechtern zuordnen? Handelte es sich somit einfach um männliche und weibliche Vertreter ein und derselben Art?

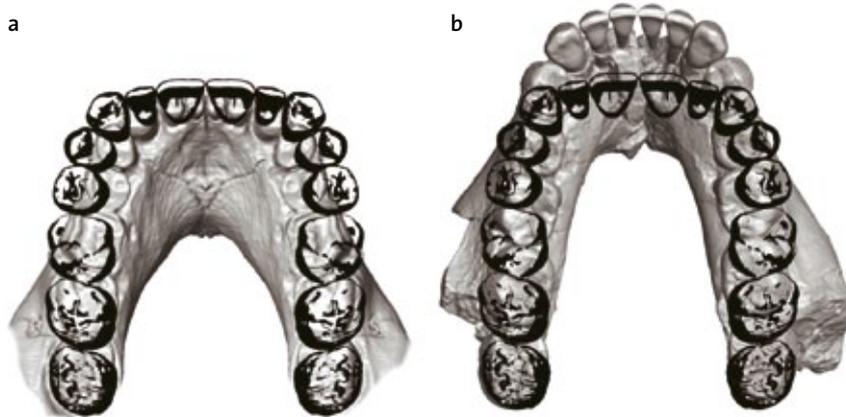
Bei näherer Betrachtung erschien dies wenig plausibel. Denn zwar ließen sich für Koobi Fora durchaus zwei Versionen von Gesichtsschädeln ausmachen, aber man konnte nicht einfach wie gewohnt die größere Sorte männlichen Individuen zusprechen und die kleinere weiblichen. Die beiden Formen unterschieden sich nämlich in einer

Wird der Menschenstammbaum noch komplexer?

Die Gattung *Homo* dürfte vor zwei bis drei Millionen Jahren entstanden sein. Jedoch gibt es zur Anfangsphase dieser Evolution (gestrichelte Balken) nur sehr wenige Fossilien. Neue Funde sprechen für mindestens zwei Evolutionslinien in früher Zeit, denen *Homo habilis* und *Homo rudolfensis* zugeordnet werden. Ob aus einer davon *Homo erectus* hervorging, ist noch unsicher.



WOOD, B. FACING UP TO COMPLEXITY. IN: NATURE 488, S. 162–163, 2012, FIG. 1



Der neue Oberkiefer aus Koobi Fora (mit der Katalognummer KNM-ER 62000, hier rekonstruiert und schwarz konturiert) würde auf den neuen Unterkiefer (KNM-ER 60000, heller gezeichnet) passen (a), nicht aber auf einen früher gefundenen Unterkiefer von Koobi Fora (b; KNM-ER 1802). Diese beiden Fossilien gehören deshalb wahrscheinlich nicht zur selben Art.

Weise, wie wir sie als Geschlechtsunterschiede weder von heutigen Menschenaffen noch vom modernen Menschen kennen. Als einzigen Ausweg sahen die Forscher, neben *Homo habilis* eine zweite frühe Menschenart zu deklarieren: den *Homo rudolfensis*.

Diese Schlussfolgerung war in der Paläoanthropologie allerdings immer umstritten. Nie hatten sich vom selben Individuum von *Homo rudolfensis* zugleich der Gesichtsschädel, womit Anthropologen die Partie ab dem Oberkiefer meinen, und der Unterkiefer gefunden. Und das Typusexemplar – so heißt das Fossil, an dem eine neue Spezies erstmals beschrieben wird – umfasste im Fall von *Homo habilis* keine Gesichtsteile, sondern nur einen Unterkiefer mit Zähnen, und im Fall von *Homo rudolfensis* nur das Gesicht mit Oberkiefer, doch weder Zähne darin noch den Unterkiefer. Die beiden Typusexemplare sind als OH7 und KNM-ER 1470 katalogisiert, wobei Ersteres für Olduvai-Hominide steht, Letzteres für Kenia National Museum East (Ost) Rudolf.

Mein Vorschlag lautete damals: Zu dem grobknochigen Gesicht von *Homo rudolfensis* müsste ein kräftiger Unterkiefer mit großen Backenzähnen passen. Entsprechende Fossilien schrieb ich deswegen *Homo rudolfensis* zu, darunter einen als KNM-ER 1802 geführten Kiefer von Koobi Fora.

Die neue Studie stützt nun die Annahme, dass sehr früh mehrere Arten der Gattung *Homo* lebten. Zugleich widerlegt sie aber meine damalige These, wonach beispielsweise der Unterkiefer KNM-ER 1802 zum Gesicht KNM-ER 1470

passte. Bei den neuen Fossilien von Koobi Fora handelt es sich um einen ziemlich gut erhaltenen Gesichtsschädel, einen gut erhaltenen Unterkiefer und ein Unterkieferfragment (als KNM-ER 62000, KNM-ER 60000 und KNM-ER 62003 katalogisiert). Alle drei Fossilien sind etwas jünger als das Typusexemplar von *Homo rudolfensis*, dessen Alter annähernd zwei Millionen Jahre beträgt. Der Gesichtsschädel und das kleine Kieferfragment sind zwischen 1,90 und 1,95 Millionen Jahre alt und der vollständige Kiefer sogar nur rund 1,83 Millionen Jahre.

Sprechende Gesichtsformen

Das neue Gesichtsfossil stammt von einem älteren jugendlichen Individuum. Obwohl dessen Gesicht kleiner war als das von KNM-ER 1470, stimmt die Form überein: Bei beiden stoßen die Wangenknochen ziemlich weit vorn zum knöchernen Gaumen. Das neue Fossil weist – anders als KNM-ER 1470 – einige Zähne auf. Die Backenzähne beschreiben die Forscher als mäßig groß mit relativ breiten Kronen. Der Gaumen ist auffällig kurz. Die Zahnreihe macht beim ersten Vorbackenzahn einen fast rechten Winkel, und vordere wie auch hintere Zähne stehen jeweils in ziemlich geraden Reihen. Bei *Homo habilis* hingegen bilden diese Partien eher Bögen mit einem runderen Übergang und dem Eckzahn an der Biegung. Zu dem neuen Gesichtsfossil wie auch zu KNM-ER 1470 passen beide neuen Unterkiefer viel besser als die damals von mir vorgeschlagenen Fundstücke. Das untermauert die Annahme mehrerer verschiedener *Homo*-Arten zu dieser Zeit.

Was also bedeutet dieser Befund für die zukünftige Forschung? Notwendig sind nun unter anderem mehr Untersuchungen an modernen Menschen und Menschenaffen dazu, wie stark die Form von Gaumen und Unterkiefer zwischen Individuen derselben Art abweichen kann. Zudem müsste man ein Verfahren entwickeln, mit dem sich anhand fester Kriterien abschätzen lässt, mit welcher Wahrscheinlichkeit der Unterkiefer OH7 zur selben Spezies gehört wie der Kiefer KNM-ER 60000 oder der Kiefer KNM-ER 1802 – oder eben nicht.

Sollte sich das letztgenannte Fossil dann *Homo habilis* zuordnen lassen, wäre ich zwar überrascht, aber es bliebe bei den zwei frühen *Homo*-Arten. Sollte es sich dort allerdings nicht einfügen, was ich eher annehme, könnten dieser Unterkiefer und ein paar andere Fossilien sogar noch eine dritte Art repräsentieren.

Schließlich sei noch erwähnt, dass ich, wie einige Wissenschaftlerkollegen auch, den Gattungsbegriff *Homo* für die einem *Homo habilis* und einem *Homo rudolfensis* zugeordneten Fossilien für reichlich weit gefasst halte. Vielleicht gehörten diese beiden mutmaßlichen Spezies ja noch zu einem ganz anderen Stammbaumast als unsere Vorfahren.

Der Paläoanthropologe **Bernard Wood** arbeitet an der George Washington University in Washington D. C. am Center for the Advanced Study of Hominid Paleobiology.

© Nature Publishing Group

www.nature.com

Nature 488, S. 162–163, 9. August 2012

Das Dach der Zukunft

Anpassungsfähige Tragwerke erlauben es Ingenieuren, extrem leichte Bauwerke zu konstruieren.

VON MARTIN WEICKGENANNT UND STEFAN NEUHÄUSER

Maximal belastbar bei minimalem Materialeinsatz – so sollen Tragstrukturen für Bauwerke heute sein. Der so genannte Ultraleichtbau versucht, mit Hilfe von anpassungsfähigen Tragwerken die Grenzen des bisher Möglichen zu überschreiten. An der Universität Stuttgart entwickeln wir hierfür ein Schalentragwerk aus Holz, das bei einer Materialstärke von nur vier Zentimetern eine Fläche von zehn mal zehn Metern überspannt (siehe Bild rechts). Das ist deshalb möglich, weil die Konstruktion sich aktiv bewegt und erhöhte Materialbeanspruchungen gezielt kompensiert.

Gekrümmte Tragstrukturen haben den Vorteil, dass sie bei geringem Eigengewicht große Spannweiten erreichen, etwa in Brücken und Stadionsdächern. Schon in der Antike setzten Ingenieure und Architekten deshalb auf bogenförmige Brücken und Gewölbekuppeln – man denke an römische Aquädukte oder das Pantheon. Die Geometrie der Konstruktion wird so ausgelegt, dass sie die dominierenden Lasten optimal abträgt. Bei traditionellen Bauwerken dominiert in der Regel das Eigengewicht, und die mechanischen Kräfte, die auf das Tragwerk wirken, sind weit gehend konstant und gleichmäßig verteilt.

Treten jedoch ungleichmäßig verteilte Lasten auf, beispielsweise durch Wind oder Schnee, kommt es zu stark variierenden Beanspruchungen des Bauwerks. Die Tragstruktur muss dann so konstruiert sein, dass sie auch den maximal zu erwartenden Kräften standhält. Solche Maximallasten treten aber, wenn überhaupt, nur extrem selten auf – vielleicht einmal in 50 Jahren. Das bedeutet, dass ein Großteil des Materials in heutigen Tragstrukturen nur wenig genutzt wird. An der Universität Stuttgart suchen wir deshalb nach Wegen, Tragwerke so auszulegen, dass sie im Vergleich zu herkömmlichen Konst-

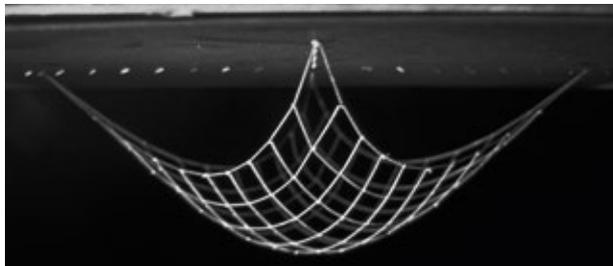
Formfindung

Die so genannte **Formfindung** dient im Leichtbau dazu, Geometrien für möglichst effiziente Tragstrukturen zu entwickeln. Für doppelt gekrümmte Schalentragwerke eignen sich vor allem Formen, die nur durch Druck beansprucht werden. Denn dann werden die Fasern des Materials gleichmäßig über die gesamte Dicke belastet – im Gegensatz zur Biegebeanspruchung, die die Fasern unterschiedlich stark fordert.

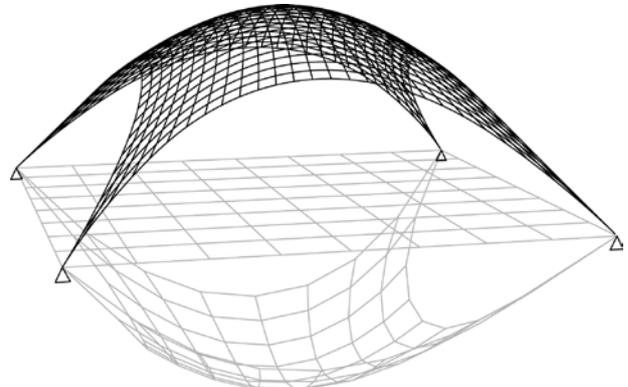
Eine Möglichkeit, solche Formen zu finden, sind Hängemodelle: Ein durchhängendes Seil oder Tuch bildet auf Grund seines Eigengewichts Geometrien mit reiner Zugbelastung aus. Kehrt man die Richtung der Schwerkraft um – beziehungsweise

spiegelt man die Hängeform an der Horizontalen –, dann ergibt sich eine rein druckbeanspruchte Struktur. Eine veränderte Belastung des Seils führt automatisch zu einer angepassten Hängeform, das heißt, für jede Beanspruchung gibt es auch eine ideale Geometrie des Tragwerks.

Bis in die 1970er Jahre setzten Ingenieure vorwiegend physikalische Modelle zur Formfindung ein. Heute kann man die entsprechenden Vorgänge im Computer nachbilden, um zu effizienten Tragstrukturen per rechnergestützter Simulation zu gelangen.



Ein hängendes Kettennetz verformt sich unter seinem Eigengewicht so, dass es nur durch Zug beansprucht wird (links). Die geometrische Spiegelung dieser Form (rechts) ergibt eine Tragstruktur, in der nur Druckkräfte wirken.





ruktionen deutlich weniger Ressourcen benötigen, aber trotzdem genauso belastbar sind.

Bereits vor 15 Jahren kam an Werner Sobeks Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK) die Idee auf, mit Hilfe adaptiver Tragwerke radikal Gewicht einzusparen. Diese reagieren aktiv auf wechselnde Lasten und passen so die Konstruktion flexibel an die aktuellen Verhältnisse an. Dadurch wirken sie Überbeanspruchungen entgegen und verhindern Schäden am Bauwerk.

Kein Aufschaukeln mehr

Im Zuge unserer Entwicklungsarbeiten gelang es, ein inhärentes Problem ultraleichter Strukturen zu lösen: Sie sind wegen ihrer geringen Masse äußerst schwingungsanfällig. In herkömmlichen Gebäuden klingen Vibrationen relativ schnell ab, da die große Masse des Baumaterials stark dämpfend wirkt. Bei ultraleichten Konstruktionen fehlt diese Masse jedoch, und die Schwingungen bleiben lange erhalten. Dadurch kommt es zu hohen Materialbelastungen und raschem Verschleiß. Im schlimmsten Fall führt eine dauerhafte Anregung zur Resonanz und zur Zerstörung des Bauwerks.

Um das zu verhindern, entwickeln wir am Institut für Systemdynamik (ISYS) von Oliver Sawodny Konzepte zur aktiven Schwingungsdämpfung. Dabei orientieren wir uns an Ideen, die im Be-

Die experimentelle Dachkonstruktion Stuttgart SmartShell auf dem Campus der Universität Stuttgart: Drei der vier Auflagerpunkte lassen sich über hydraulische Zylinder bewegen. Das gestattet, die Struktur optimal an die aktuellen Belastungen anzupassen.

reich des Maschinenbaus seit Jahren erfolgreich eingesetzt werden. Sie gilt es ins Bauwesen zu übertragen.

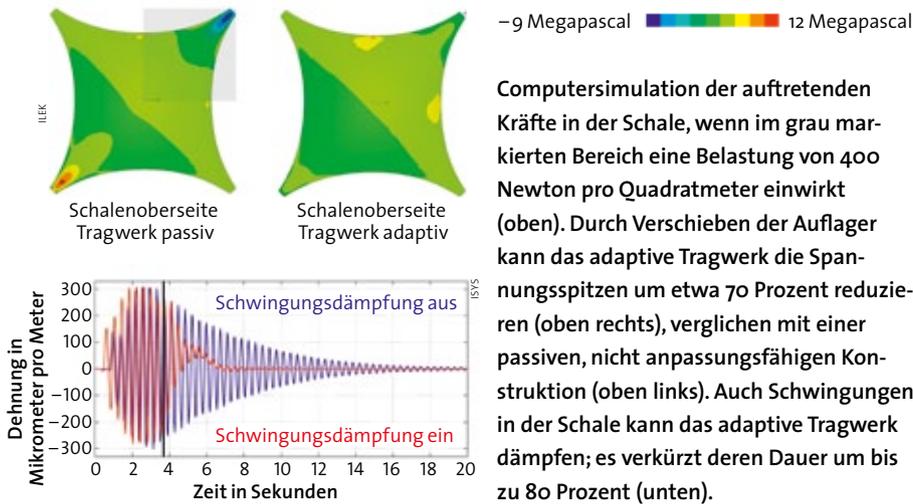
Das Ergebnis unserer Arbeiten ist das eingangs beschriebene Tragwerk aus Holz, die Stuttgart SmartShell, wie wir sie nennen. Es handelt sich um das erste adaptive Schalenträgerwerk der Welt. Aus mehr als 3500 Holzleisten gefertigt und nur vier Zentimeter stark, wiegt es bei einer Spannweite von zehn Metern nur etwa 1,4 Tonnen. Traditionell gebaute Dächer dieser Größe müssten zwei- bis dreimal so dick (und schwer) sein, um die gleiche Belastbarkeit zu erreichen.

Die Struktur ist dabei nicht, wie sonst üblich, an allen Auflagestellen fest verankert. Vielmehr ruht sie an drei von vier Punkten auf Lagern, die über Hydraulikzylinder bewegt werden können. Hierdurch ist es möglich, die Schale gezielt zu verformen und dadurch den aktuellen Belastungen optimal anzupassen. Zudem können wir Schwingungen in der Konstruktion durch Gegenbewegungen der Lager aktiv dämpfen.

Wie funktioniert das Ganze im Detail? Ein komplexes Regelungssystem ermittelt den aktuellen Belastungs- und Schwingungszustand der Schale. Hierzu wertet es die Messwerte von

hochgenauen Dehnungssensoren aus, die an der Schale angebracht sind und 200-mal pro Sekunde aktuelle Daten liefern. Anhand dieser Werte bestimmt das Regelungssystem, wie sich die Hydrauliklager bewegen müssen, um statische Lasten optimal auszugleichen und Schwingungen bestmöglich entgegenzuwirken. Anschließend verschiebt es die Auflagerpunkte entsprechend. Das geschieht mit einer Genauigkeit von zwei hundertstel Millimetern – ein menschliches Haar ist etwa fünfmal so dick – und einer Geschwindigkeit von bis zu 30 Zentimeter pro Sekunde.

Das System stützt sich auf Computersimulationen, die das statische Verhalten der Struktur bei beliebigen Außenbedingungen präzise vorausberechnen. Anhand der Simulationsergebnisse optimiert es die Verschiebungswege der Auflagerpunkte so, dass sich unter Belastung eine möglichst geringe Materialspannung einstellt. Auf diese Weise lassen sich kritische Verformungen und Überbeanspruchungen bereits im Computer erkennen und somit in der realen Konstruktion vermeiden. Ein wesentlicher Punkt unserer Arbeiten besteht darin, die Simulationsmodelle experimentell zu überprüfen. Eine hydraulisch angesteuerte Seilkonstruktion



–9 Megapascal █ █ █ █ 12 Megapascal

Computersimulation der auftretenden Kräfte in der Schale, wenn im grau markierten Bereich eine Belastung von 400 Newton pro Quadratmeter einwirkt (oben). Durch Verschieben der Auflager kann das adaptive Tragwerk die Spannungsspitzen um etwa 70 Prozent reduzieren (oben rechts), verglichen mit einer passiven, nicht anpassungsfähigen Konstruktion (oben links). Auch Schwingungen in der Schale kann das adaptive Tragwerk dämpfen; es verkürzt deren Dauer um bis zu 80 Prozent (unten).

dient hierbei dazu, Kräfte auf verschiedene Punkte der Struktur auszuüben und in der Realität auftretende Belastungen nachzubilden.

Um auch die Schwingungen der Schale rechnergestützt zu dämpfen, haben wir die statischen Modelle erweitert, so dass diese das dynamische Verhalten der Konstruktion im Computer abbilden. Damit simulieren wir stoßförmige Belastungen der Schale und vergleichen sie dann mit den Ergebnissen entsprechender Experimente. Die

Parameter des Modells variieren wir dabei so lange, bis wir eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung erreichen.

Zusammengefasst zeigen unsere Forschungsarbeiten, dass das adaptive Tragwerk der Stuttgart SmartShell die Maximalspannungen in der Schale bei statischer Belastung um bis zu 70 Prozent reduzieren kann. Die Auflagerpunkte verschieben sich hierbei um bis zu zehn Zentimeter, was einem Prozent der Spannweite des Dachs entspricht.

Zudem konnten wir die Dauer auftretender Schwingungen um 80 Prozent reduzieren. Das erlaubt es, ein Aufschwingen der Struktur bei permanenter Anregung, etwa durch böigen Wind, wirkungsvoll zu verhindern und Ermüdungseffekten des Materials entgegenzuwirken.

Die Erfahrungen, die wir in Computersimulationen und Experimenten mit der Stuttgart SmartShell gemacht haben, deuten darauf hin, dass adaptive Tragwerke den Weg zu einer völlig neuen Bauweise ebnen. Sie ermöglichen eine drastische Materialeinsparung sowie deutlich weniger Materialermüdung und Schäden an der Struktur. Das schont Ressourcen und erhöht gleichzeitig die Leistungsfähigkeit tragender Konstruktionen.

Martin Weickgenannt und **Stefan Neuhäuser** sind wissenschaftliche Mitarbeiter an der Universität Stuttgart. Weickgenannt forscht am Institut für Systemdynamik (ISYS), Neuhäuser am Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK). Sie haben die Stuttgart SmartShell gemeinsam mit Kollegen und Steuerungsexperten von Bosch Rexroth entwickelt. www.smartshell-stuttgart.de

MOLEKULARMEDIZIN

Recyclingtonne für das Immunsystem – genauer betrachtet

Vom zelleigenen Schredder für Proteine, Proteasom genannt, besitzen Immunzellen eine Sonderaufbereitung. Jetzt haben Forscher dessen Aufbau im Detail untersucht. Damit hoffen sie, Medikamente gegen Autoimmunkrankheiten zu entwickeln.

VON MICHAEL GROSS

Mit ihren Rohstoffen gehen Zellen sparsam um. Beispielsweise recyceln sie fehlerhafte und nicht mehr benötigte Proteine. Den zur Verschrottung vorgesehenen Molekülen hängen sie zunächst ein Etikett an, bestehend aus dem kleinen Protein Ubiquitin. Dann kommen sie in die Tonne – was ganz wörtlich zu nehmen ist: Die Ma-

schine, die Proteine abbaut, sieht tatsächlich aus wie ein Fass. Es besteht aus vier Untereinheiten in Gestalt eines Rings mit jeweils sieben Proteinmolekülen. Dieses Fass stellt den Kern des so genannten Proteasoms dar (siehe »Reißwolf für Proteine«, SdW 5/2001, S. 54, und »Nobelpreis für Chemie« SdW 12/2004, S. 14).

Der Abbau von zelleigenen Molekülen muss unbedingt strengstens reguliert werden, damit hierdurch kein Schaden entstehen kann. Im Inneren der Zellen werden Proteine deswegen ausschließlich in Proteasomen verdaut; und nur wenn sie ein Ubiquitin-schild tragen, erhalten sie Zutritt in die Recyclingtonne.

Am einfachsten sind die Proteasomen der so genannten Archaeen oder Archaeobakterien gebaut. Bei ihnen weisen die vier Ringe der Kerneinheit nur zwei Arten von Untereinheiten auf: zum einen in den beiden mittleren Ringen so genannte β -Untereinheiten, welche die Proteine zerlegen – also katalytisch aktiv sind –, zum anderen in den äußeren Ringen α -Untereinheiten, die eher strukturellen Zwecken dienen.

Bereits bei der Bierhefe treten mehrere in ihrer Funktion verschiedene β -Untereinheiten auf, die ein Protein an jeweils unterschiedlichen Stellen zerschneiden. Noch größer ist die Vielfalt an Untereinheiten bei Säugetieren. Hier kennen Forscher sogar drei funktionell verschiedene Varianten von Proteasomen. Außer den »regulären«, so genannten konstitutiven Ausführungen gibt es eine spezialisierte Schreddersorte mit besonderen β -Untereinheiten, die ausschließlich in bestimmten Zellen des Immunsystems vorkommt und deswegen als Immunproteasom bezeichnet wird. (Eine dritte Variante, das t-Proteasom, findet sich in manchen Thymuszellen.)

Ein eigenes Immunproteasom wird offenbar benötigt, weil Immunzellen ihre Proteine nicht nur zwecks Wiederverwertung zerlegen, sondern auch, um anderen Immunzellen die Bruchstücke zu zeigen. Das ist ein wichtiger Aspekt der Fremdstofferkennung des Immunsystems, dank dem es im Normalfall zwischen »selbst« und »nicht-selbst« unterscheidet. Fehler bei der Zuordnung dürfen nicht unterlaufen – andernfalls drohen beispielsweise Autoimmunkrankheiten wie etwa Diabetes Typ I, rheumatoide Arthritis oder multiple Sklerose, bei denen die Ab-

wehr irrtümlich Moleküle des eigenen Körpers angreift.

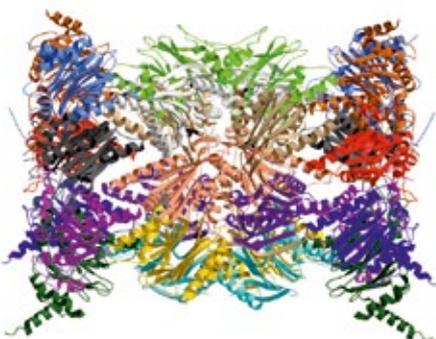
Wie Mediziner erst vor einigen Jahren herausfanden, spielt das Immunproteasom generell bei Entzündungen eine entscheidende Rolle. Die überstarke Aktivität bei Autoimmunkrankheiten zeigt allerdings, dass es in dem Fall entgleist ist. Die Forscher hoffen nun auf spezifische Hemmstoffe, die gezielt nur diese Proteasomvariante außer Gefecht setzen – die also bei Autoimmunkrankheiten helfen würden, aber Zellen anderweitig nicht schaden. Allerdings war die genaue Struktur des Immunproteasoms bisher nicht bekannt, an die man solche Medikamente anpassen müsste.

Proteinkristalle durchleuchtet

Den Arbeitsgruppen von Michael Groll an der TU München und von Marcus Groettrup an der Universität Konstanz gelang es nun, den Molekülkomplex und vor allem auch den funktionellen Bereich im Innern mittels Röntgenkristallografie darzustellen. Das heißt, die Forscher konnten Immunproteasomen isolieren und daraus Kristalle bilden, die sie dann quasi durchleuchteten. Aus den Beugungsmustern ließ sich der Molekülaufbau berechnen. Um die Struktur des katalytischen Bereichs detailliert zu erfassen, verglichen sie drei verschiedene Proteasomen jeweils zusammen mit dem bisher einzigen bekannten selektiven Hemmstoff – PR957 – des Immunproteasoms und ohne ihn. Sie analysierten auf die Weise konstitutive und Immunproteasomen von Mäusen sowie Hefeproteasomen (*Cell* 148, S. 727, 2012).

PR957 hemmt im Immunproteasom die Untereinheit $\beta 5i$, die nur in diesem vorkommt. Wegen seiner Beschaffenheit eignet es sich allerdings nicht gut als Medikament. Wie sich nun zeigte, beruht die selektive Vorliebe dieses Inhibitors auf ganz subtilen Unterschieden

Die Abbildung zeigt die Kristallstruktur des Immunproteasoms der Maus. In der Mitte sitzt das reaktive Zentrum, dessen Funktionsweise Forscher nun aufklärten.



MARKUS GROETTRUP UND MICHAEL GROLL, UNIVERSITÄT KONSTANZ

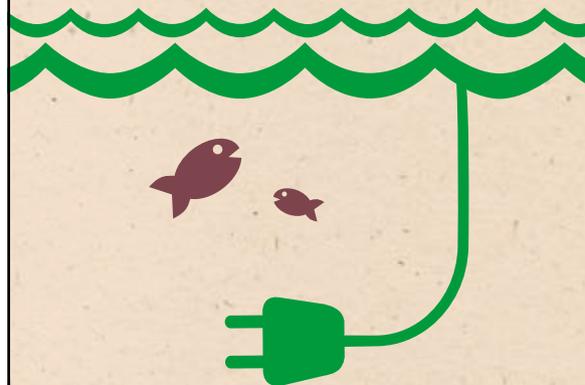


Natur
Energie
Plus

Mit der Natur auf einer Welle.

In den letzten zwölf Monaten haben sich über 30.000 Bürger für Strom aus 100 % Wasserkraft von NaturEnergiePlus entschieden. Wann wechseln Sie zum Strom aus sauberer Quelle?

→ Jetzt wechseln!



den in der räumlichen Anordnung von $\beta 5i$ gegenüber der »Normalversion« der $\beta 5$ -Untereinheit.

In beiden Versionen befindet sich in der Bindungstasche, welche die zu verdauenden Proteine erkennt, die Aminosäure Methionin an derselben Stelle der Proteinsequenz. Nur ist sie im Immunproteasom gegenüber dem konstitutiven Proteasom auf Grund von Strukturunterschieden in der weiteren Umgebung ein wenig verdreht. Dadurch lässt sie in der Bindungstasche etwas mehr Platz. Hier können sich deswegen sperrigere Aminosäuren anlagern als sonst.

Auch für PR957 ist dadurch genügend Raum, anders als beim konstitutiven Proteasom.

Bisher gibt es erst einen zugelassenen Wirkstoff, der sich aber gegen alle Proteasomen richtet und zur Behandlung des multiplen Myeloms, eines Knochenmarkkrebses, eingesetzt wird: Bortezomib (Handelsname: Velcade). Die Krebszellen mit ihrem besonders regen Stoffwechsel gehen dann leichter als normale Zellen zu Grunde, aber wegen der unspezifischen Wirkung können die Nebeneffekte beträchtlich sein. Jetzt, da die molekulare Struktur

der Bindungstasche des Immunproteasoms bekannt ist, können Forscher gezielt spezifische Hemmstoffe nur für diesen Molekülkomplex entwickeln. Mit ihnen lässt sich genauer untersuchen, was an dieser Stelle bei Autoimmunkrankheiten falsch läuft. Und natürlich hoffen Mediziner auch auf neue Medikamente gegen solche Leiden – Wirkstoffe, bei denen nicht das Immunsystem insgesamt außer Gefecht gesetzt wird.

Michael Groß ist Biochemiker und freier Wissenschaftsjournalist in Oxford.

KOMMENTAR

Wie gelingen internationale Partnerschaften?

Der Erfolg länderübergreifender Raumfahrtmissionen hängt vor allem davon ab, ob alle Partner im Boot bleiben. David Southwood, bis vor Kurzem ESA-Direktor für Wissenschaft und robotische Exploration, zieht die Lehren aus den Krisen, mit denen die europäische Raumfahrt im letzten Jahr konfrontiert war.

VON DAVID SOUTHWOOD

Wissenschaftliche Kooperationen auf internationaler Ebene ermöglichen Erfolge, die auf andere Weise nicht zu erzielen wären. Dies bewies zuletzt die Entdeckung eines neuen Elementarteilchens, vermutlich das lange gesuchte Higgs-Boson, am europäischen Teilchenforschungszentrum CERN, dem mittlerweile 20 Mitgliedsländer angehören (siehe Artikel ab S. 54).

Zugleich stellt eine Zusammenarbeit über Ländergrenzen hinweg besondere Anforderungen. 2011, in meinem letzten Jahr als Direktor für Wissenschaft und robotische Exploration bei der Europäischen Weltraumbehörde (ESA), sah ich mich mit dem Wegfall von US-Geldern für zwei Gemeinschaftsprojekte konfrontiert: das James Webb Space Telescope (JWST) und eine Jupitermission. Meinen Nachfolger Alvaro Giménez traf es noch härter, als sich die USA auch aus dem Marsprogramm ExoMars verab-

schiedeten. Aus jedem dieser drei Ereignisse lassen sich Lehren für die Handhabung künftiger Projekte ziehen. Und obwohl es jedes Mal die USA waren, die sich zurückzogen, gelten diese Lehren ganz allgemein und werden an Bedeutung gewinnen, wenn große internationale Kooperationen an Zahl zunehmen und neue Partner wie China, Indien und Russland dabei eine Rolle spielen.

Es liegt in der Natur souveräner Regierungen, dass kaum eine Übereinkunft zur Kooperation in allen Bestandteilen rechtlich bindend ist. Für gewöhnlich leisten die Partner ihre Beiträge aus einem Gefühl der Solidarität heraus – wie etwa beim Hubble-Nachfolger JWST. Europa würde für das Infrarotteleskop zwei Messinstrumente sowie die Trägerrakete Ariane bereitstellen; die USA würden sich mit der Raumsonde, einem weiteren Instrument sowie dem auffaltbaren Teleskop

beteiligen. Europas Komponenten stehen bereit, doch infolge von Finanzierungsengpässen und Verzögerungen auf US-Seite musste der Start von 2011 auf 2018 verschoben werden. Aus Kostengründen empfahl ein Komitee des US-Repräsentantenhauses im Juli 2011 sogar, das Projekt zu stoppen. Die Europäer hatten damals bereits über 100 Millionen Euro investiert. Nur dank Verhandlungen zwischen Weißem Haus, US-Kongress und NASA sowie diplomatischem und politischem Druck aus Europa blieb es schließlich verschont.

Im Fall der Jupitermission hingegen, aus der sich die USA im Februar 2011 zurückzogen, musste Europa das Vorhaben allein stemmen. Zum Glück hatte es bis zu diesem Zeitpunkt nur wenig investiert. Es schraubte seine Ziele zurück, und seit Mai 2012 steht fest: Der 850 Millionen Euro teure Jupiter Icy Moons Explorer (JUICE) soll an Europa



Als die USA aus der ExoMars-Mission ausstiegen, bei der auch ein Rover (Bild) zum Mars fliegen soll, wandte sich die ESA an Russland, um die Finanzierungslücke zu schließen.

und Callisto vorbeifliegen und 2030 in eine Umlaufbahn um Ganymed einschwenken. Die NASA trieb unterdessen 100 Millionen Dollar auf, um US-Forschern wenigstens eine gewisse Beteiligung zu sichern.

Bei ExoMars, das Europa eine Milliarde Euro kosten wird, sieht die Lage anders aus. Als sich die USA im Februar 2012 daraus zurückzogen, klaffte eine Finanzierungslücke von bis zu 250 Millionen Euro. Außerdem hatte Europa bereits mehr als 100 Millionen Euro investiert. Wegen bestehender Industrieverträge würde ein Projektabbruch bis zu 400 Millionen Euro kosten. Die Schuld an dem Schaden ist allerdings nicht allein bei den Amerikanern zu suchen. Diese waren erst 2009 zu dem ursprünglich rein europäischen Projekt gestoßen, um Hilfestellung zu leisten.

Die Bündelung von Ressourcen für ein großes Programm wie ExoMars ist ein zäher und schwieriger Prozess. Um sich weiterer Unterstützung bei teilnehmenden Staaten zu versichern, werden etwa die Missionsziele immer höher gesteckt. Dies machte ExoMars von Beginn an verwundbar: Es wuchs und wuchs und hörte auf, steuer- und finanzierbar zu sein. Umsichtige Manager wollten zwar Module streichen, damit das Pro-

jekt voranging. Doch stattdessen suchte die ESA nach neuen Partnern. Die USA und Russland lehnten ab, denn unter anderem war Europa noch durch Versprechen an das ursprüngliche Konsortium gebunden. Außerdem gab es kein gemeinsames Ziel, dem sich die potenziellen Partner hätten anschließen können.

Vorteile für beide Seiten

2008 übernahm ich das Programm von einem anderen Direktorat und nahm die Gespräche mit der NASA wieder auf. Amerikas langfristiges Ziel in der robotischen Marsforschung besteht darin, Bodenproben zur Erde zu bringen – eine so genannte Sample-Return-Mission. Gemeinsam mit meinem NASA-Amtskollegen Ed Weiler gelangte ich zu der Ansicht, dass sich eine Zusammenarbeit bei einem so teuren Vorhaben als unvermeidlich erweisen würde. Da schien es nur sinnvoll, sie so früh wie möglich zu beginnen. Der ExoMars-Plan wurde daraufhin so modifiziert, dass er gemeinsamen Zielen gerecht wurde. Beide Seiten profitierten davon: Das Projekt ExoMars konnte fortgeführt werden, und Europäer ebenso wie Amerikaner durften mit Bodenproben rechnen. Dass Letztere dann doch wieder aussteigen würden, sah niemand voraus.

Derartige Rückschläge ereignen sich zum Glück selten. Als sich die NASA vor 30 Jahren einer Finanzierungs Krise gegenüber sah, strich sie die geplante International Solar Polar Mission. Widerstrebend übernahm Europa die Führungsrolle bei einer abgespeckten Sonnenmission namens Ulysses, die überaus erfolgreich wurde. Sie kennzeichnete einen Wendepunkt: Es war die erste Mission, bei der Europa die Führung übernahm und Amerika nachfolgte. Auch bei der JUICE-Mission folgt die ESA diesem Vorbild: Sie verkleinerte den Umfang des Vorhabens und realisiert es nun im Alleingang.

Einen weiteren Wendepunkt markiert ExoMars: Die ESA wandte sich an Russland als Partner. Die Zukunft hält vermutlich ganz unterschiedliche solcher internationalen Konstellationen bereit. Europa hat in jüngster Zeit Raumforschungsprojekte mit China und Indien in Angriff genommen und mit der Merkurmission BepiColombo eine groß angelegte europäisch-japanische Zusammenarbeit gestartet.

Fünf Lektionen können Raumfahrtmanager aus diesem krisengeschüttelten Jahr ziehen. Zunächst einmal ist es wichtig, die Motive zu verstehen, aus denen heraus sich ein Land an einer Mission beteiligt. Lassen sich die Absichten der Partner nicht miteinander vereinbaren, kann man nicht auf eine Zusammenarbeit bauen. Ist ein Programm hauptsächlich auf die Fähigkeiten nur eines Partners ausgerichtet, wie zunächst bei ExoMars, kann es geschehen, dass dieser das Programm allein zu Ende bringen muss. Besteht hingegen Einigkeit bei den Zielen – Stichwort Bodenproben –, kann dies andere ermutigen, sich an dem Projekt zu beteiligen.

Zusammenarbeit bedeutet zweitens, dass Konsens und Kompromiss im Mittelpunkt stehen. Dies führt gleichzeitig zum Wachsen des Projekts; keines der beteiligten Partnerländer wird nach Projektbeginn freiwillig seine Ziele zurückschrauben. Man muss also einzelne Module schon früh streichen, falls nötig.

Drittens muss das Managementrisiko innerhalb der Programme reduziert werden. Dazu muss man die Beiträge

Schlaflos im Sexrausch

Manche Vögel tun beim Paarungsmarathon wochenlang kein Auge zu

Der männliche Graubruststrandläufer (*Calidris melanotos*) ist ein echter Don Juan. Bis zu drei Wochen lang jagt er während der Brutzeit in arktischen Breiten ohne Unterbrechung hinter jedem weiblichen Bürzel her. Dabei machen es die Weibchen dem polygamen Verfolger wahrlich nicht leicht. Erst nach längerem Zickzacklauf – vermutlich ein Test auf die Fitness des liebeshungrigen Bewerbers – darf er endlich aufsitzen. Der Lohn der Mühe ist jeweils kurz: Sekundenlang flattert der Begatter begeistert mit den Flügeln, sucht aber gleich wieder das Weite und macht sich auf die Suche nach dem nächsten Abenteuer.

Wenn die Strandläufermännchen ausnahmsweise nicht brünstige Weibchen jagen, kommen sie dennoch nicht zur Ruhe, sondern müssen ihr Territorium und die bereits begatteten Tiere gegen ihre ebenso sexbesessenen Geschlechtsgenossen verteidigen. Und so schläft ein männlicher Graubruststrandläufer während der Brutzeit wochenlang praktisch überhaupt nicht.

Da sogar in und nach derart langen Phasen des Fortpflanzungswettstreits keinerlei Leistungsverlust zu beobachten ist, erhebt sich die grundsätzliche Frage: Wozu brauchen diese Tiere – ja Tiere im Allgemeinen – eigentlich überhaupt Schlaf? Der Reproduktionserfolg eines Strandläufers erweist sich jedenfalls als umso größer, je weniger Schlummer er sich gönnt (*Science* 337, S. 1654, 2012).

Tatsächlich ist der Sinn des Schlafs ein ungelöstes Rätsel der Evolutionslehre; deren Begründer Charles Darwin (1809–1882) hat darüber anscheinend nie nachgedacht. Manche Fledermäuse schlummern 20 Stunden am Tag, Pferde kommen mit zwei Stunden aus. Zugvögel können ihr Ruhebedürfnis ungestraft enorm einschränken, während bei uns Menschen längerer Schlafmangel schwere Störungen auslöst.

Vermutlich handelt es sich bei dem Phänomen generell um einen heiklen Kompromiss zwischen Energieaufwand für Selbsterhaltung und Fortpflanzung einerseits sowie Energieeinsparung durch Ruhephasen andererseits. Dafür spricht, dass Fleischfresser im Durchschnitt weniger schlafen als tierische Vegetarier: Die Nahrung der Ersteren ist kalorienreicher und wird schneller verdaut, also müssen sie nicht so viel Energie durch Schlafen einsparen (*Science* 337, S. 1610, 2012).

Beim Menschen agiert das Gehirn als großer Kalorienverzehrter. An sich würden wir beim langsamen Dahinschlendern kaum mehr motorische Energie verbrauchen als im Liegen. Doch unser Gehirn schluckt im Wachzustand ein Viertel der gesamten Körperenergie; erst im Schlaf kommt es halbwegs zur Ruhe.

Das erklärt wohl auch, warum oft diejenigen unter meinen Geschlechtsgenossen, die sich jahrelang die Nächte in Bars und Diskos um die Ohren geschlagen haben, zwar über zahlreiche Liebesabenteuer mit häufig wechselnden Partnerinnen berichten können, dafür aber mit der Zeit durch dunkle Tränensäcke, fahle Gesichtsfarbe und eine gewisse intellektuelle Eintönigkeit auffallen. Wer immerfort die Nacht zum Tag macht wie der polygame Graubruststrandläufer, aber nicht wie dieser evolutionär an wochenlangen Schlafmangel angepasst ist, der bezahlt dafür einen mit den Jahren steigenden Preis.

So kann uns die Betrachtung des tierischen Geschlechtslebens hin und wieder, wenn wir nur wollen, doch die eine oder andere moralische Lehre erteilen. In diesem Sinn mahne ich mit erhobenem Zeigefinger: Nicht alles, was Graubruststrandläufermännchen zu ihrem evolutionären Vorteil treiben, empfiehlt sich unsereinem zur blinden Nachahmung.



Michael Springer

der Partner so modular wie möglich konzipieren. Ein Fehlschlag oder der Austausch eines Partners in einem Teilbereich gefährdet dann nicht notwendigerweise das ganze Programm. Natürlich kann aber trotzdem eine Situation entstehen, in der wie beim JWST ein Partner dem anderen vorauseilt.

Viertens gilt es, das Risiko, dass Partner ein Abkommen brechen, ständig in die Überlegungen einzubeziehen. Es schien unvorstellbar, dass die NASA eine Sample-Return-Mission streichen würde, der die US-amerikanische Wissenschaftsakademie höchste Priorität beimaß. Und doch ist genau das geschehen. Dann bleiben Diplomatie und politische Überredungskunst, vereint mit moralischem Druck aus der Wissenschaftlergemeinschaft, das letzte Druckmittel.

Fünftens müssen Weltraumwissenschaftler offensiv für den Wert solcher Kooperationen werben. Meiner Ansicht nach geht internationale Zusammenarbeit weit über wirtschaftliche Aspekte hinaus. Sie beseitigt kulturelle Unterschiede, baut Vertrauen auf, eröffnet globales wissenschaftliches Potenzial und trägt inspirierende Gedanken in alle Welt. Der Schaden, den gebrochene Vereinbarungen anrichten – wie rechtlich einwandfrei der jeweilige Vorgang auch sein mag –, muss aus all diesen Gründen unbedingt vermieden werden.

Zu guter Letzt wiegen die wirtschaftlichen Vorteile eindeutig schwerer als die durch Gemeinschaftsprojekte erhöhten Risiken. In vielen Fällen existieren keine Alternativen, und auch auf anderen Forschungsgebieten werden große internationale Kooperationen zur Norm. Lernen wir also aus den Fehlern der Vergangenheit, so dass wir diesen Vorhaben zum Erfolg verhelfen können.

David Southwood war bis 2011 ESA-Direktor für Wissenschaft und robotische Exploration.

© Nature Publishing Group

www.nature.com

Nature 488, S. 451–453, 23. August 2012

Die ungekürzte Fassung dieses Beitrags finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1166521

herrenhäuser FORUM

Mensch - Natur - Technik

Wie wetterfest müssen unsere Städte sein?
Wie verändert das Klima unser Leben?
Wie können wir uns anpassen?

DI 11.12.2012/19.00 / HANNOVER ANPASSUNG UNTER UNSICHERHEIT— Sind wir auf den Klimawandel vorbereitet?

MIT **Prof. Dr. Heinke Schlünzen** Meteorologisches Institut, Zentrum für Meeres- und Klimaforschung, Universität Hamburg, **Prof. Dr. Beate Ratter** Institut für Geographie, Universität Hamburg, **Prof. Dr. Richard Pott** Institut für Geobotanik, Universität Hannover, **Prof. Dr. Horst Sterr** Universität Kiel
MODERIERT VON **Dr. Carsten Könneker** Chefredakteur Spektrum der Wissenschaft

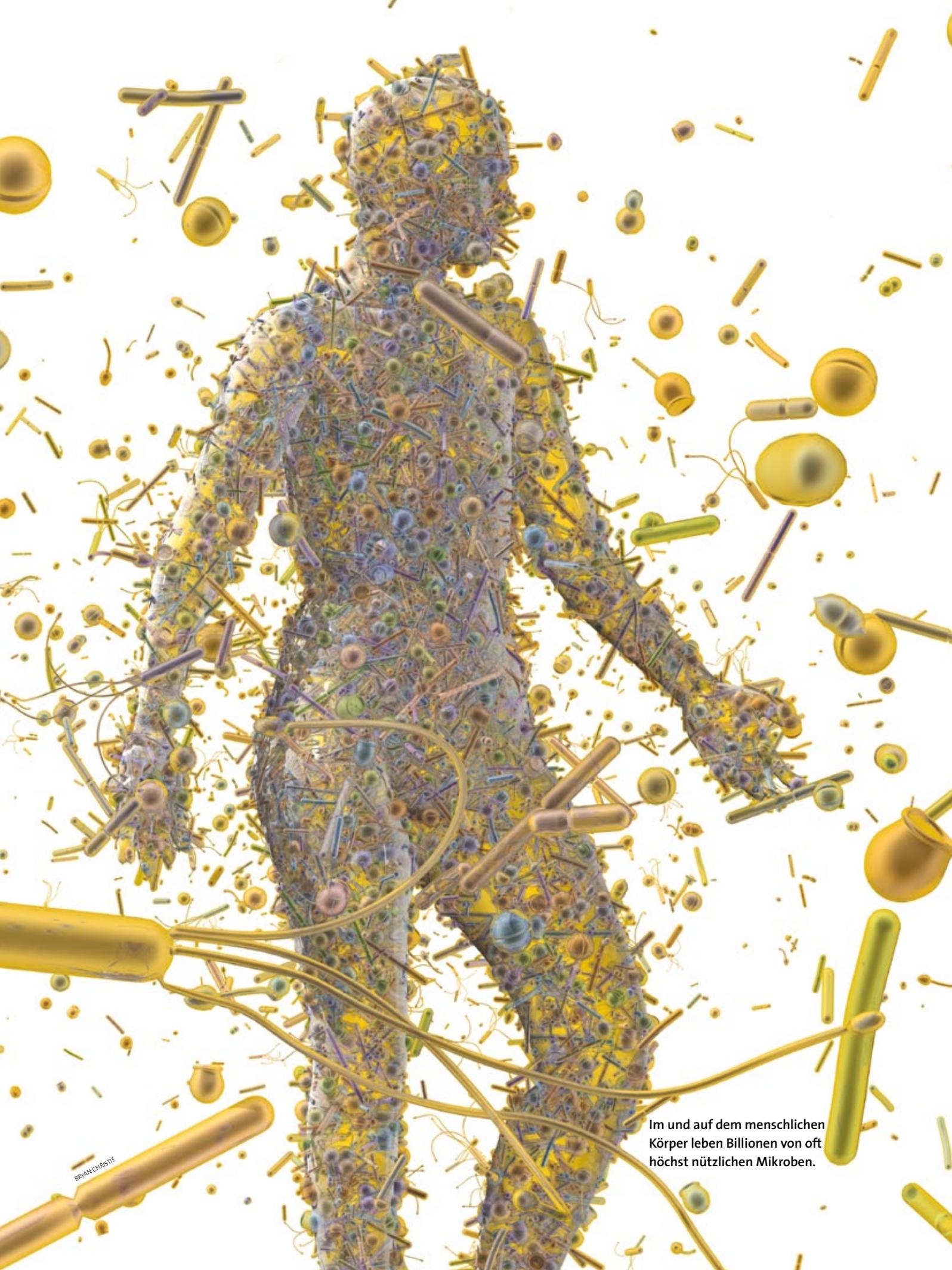
VERANSTALTUNGSORT Kleiner Sendesaal, NDR Funkhaus, Hannover
ANMELDUNG forum@volkswagenstiftung.de
MEHR INFOS www.spektrum.de/mnt

Eine Veranstaltungsreihe von



VolkswagenStiftung

Spektrum
DER WISSENSCHAFT



Im und auf dem menschlichen Körper leben Billionen von oft höchst nützlichen Mikroben.

BRYAN CHRISTIE

TITELTHEMA: MIKROBEN

Tausend Billionen Freunde

Ist die in westlichen Ländern grassierende Fettleibigkeit auf vermehrte Antibiotikagaben für Babys zurückzuführen? Rühren die zunehmenden Autoimmunkrankheiten von einem Trend zu Kaiserschnittgeburten her? Auf solche Fragen stoßen Forscher, seit sie die unzähligen nützlichen Bakterien näher untersuchen, die so manche wichtige Körperfunktion erst ermöglichen.

Von Jennifer Ackerman

Lange betrachteten Biologen den menschlichen Körper als »physiologische Insel«. Dieser Überzeugung nach reguliert unser Organismus seine Funktionen komplett autark. Zum Beispiel produziert er demzufolge alle Enzyme für die Verdauung des Essens selbst, um mit den gewonnenen Nährstoffen Gewebe und Organe zu erhalten und mit Energie zu versorgen. Und die Zellen unseres Immunsystems lernen ohne fremde Hilfe, wie sie gefährliche Eindringlinge erkennen und vernichten können und dabei das körpereigene Gewebe nicht schädigen.

Doch in den vergangenen zehn Jahren erkannten Wissenschaftler, dass der menschliche Körper eher ein komplexes Ökosystem darstellt, ein »soziales Netzwerk« mit Billionen von Bakterien und anderen Mikroorganismen. Diese besiedeln unter anderem unsere Haut, den Nasen- und Rachenraum, den Genitalbereich, vor allem aber den Darm. Tatsächlich sind die meisten lebenden Zellen in unserem Körper Fremdlinge: Er enthält zehnmal so viele Mikroben wie menschliche Zellen! Diese vielfältige Gemeinschaft von Mikroorganismen mit all ihren Genen bezeichnet man als

Mikrobiom. Sie liefert wichtige Hilfestellungen bei grundlegenden Körpervorgängen, von der Verdauung über das Wachstum bis zur Immunabwehr. Mit der Autarkie des Menschen ist es also tatsächlich nicht besonders weit her.

Biologen haben inzwischen viele der in unserem Körper besonders häufig vorkommenden Mikroben beschrieben. In den letzten Jahren untersuchten sie vermehrt, welche Auswirkungen die bakteriellen Mitbewohner im Detail auf uns haben. Dabei gewannen sie nicht nur neue Erkenntnisse über die Arbeitsweise des menschlichen Körpers, sondern auch über mögliche Ursachen von Zivilisationskrankheiten wie Fettleibigkeit und Autoimmunerkrankungen.

Wenn von Mikroorganismen im Körper die Rede ist, denken wir allerdings meist an Krankheitserreger. Tatsächlich konzentrierten sich auch die Forscher lange Zeit nur auf die schädlichen Bakterien und übersahen dabei den potenziellen Nutzen anderer Arten. Sarkis K. Mazmanian, Biologe am California Institute of Technology (CalTech), schreibt dies einer verzerrten Weltsicht zu: »Uns war die menschliche Überheblichkeit im Weg: Wir waren überzeugt, der Mensch verfüge selbst über alle Voraussetzungen für die Gesunderhaltung seines Körpers«, erklärt er. »Aber bloß weil all die Mikroben körperfremd sind und wir sie erst im Lauf unseres Leben aufnehmen, sind sie für uns keinesfalls unwichtig.«

Jeder Mensch beherbergt von klein auf ein komplexes Mikrobiom – wenn auch nicht ganz von Anfang an. Er erwirbt seine ganz persönlichen »Kommensalen« (der Begriff stammt vom lateinischen Wort für Tischgenosse) aus der Umwelt. Da die gesunde Gebärmutter keimfrei ist, führt der Fötus ein steriles Dasein als Einzelwesen. Doch schon während der Geburt nimmt er einige kommensale Bakterien seiner Mutter auf, die seinen Körper besiedeln und sich auf der Haut und den Schleimhäuten vermehren. Das Stillen und der Kontakt zu den Eltern, Großeltern, Geschwistern und

AUF EINEN BLICK

DAS ULTIMATIVE SOZIALE NETZWERK

1 Unser Körper beherbergt zehnmal mehr **Mikroben**, als er eigene Zellen besitzt. Forscher entdecken erst allmählich die vielen **positiven Auswirkungen** dieser Organismen.

2 Die **Zunahme von Fettleibigkeit sowie von Autoimmunerkrankungen** im westlichen Ländern könnte auf das Verschwinden nützlicher Bakterienspezies zurückzuführen sein.

3 Fortschritte in der Computertechnik und der Gensequenzierung ermöglichen es inzwischen, einen detaillierten **Katalog aller bakteriellen Gene** im menschlichen Mikrobiom zu erstellen.

Freunden – und auch zu Bettlaken, Decken, ja sogar Haustieren – führen dann schnell dazu, dass sich mit der Zeit ein immer breiteres Spektrum von Mikroorganismen ansiedelt. Gegen Ende der Kindheit unterhält unser Körper dann eines der komplexesten mikrobiellen Ökosysteme der Erde.

Seit etwa fünf Jahren untersuchen Forscher dieses Ökosystem detaillierter, eine recht knifflige Aufgabe. So haben sich die Bakterien der Darmflora an das sauerstofffreie, dicht besiedelte Innere des Verdauungsapparats angepasst. Viele von ihnen gehen daher in den einsamen Weiten einer Petrischale zu Grunde. Einige Wissenschaftler umgingen das Problem, indem sie statt lebender Bakterienzellen deren Erbinformationen, also ihre DNA und RNA, untersuchten. Mit diesen Molekülen kann man problemlos in der normalen sauerstoffhaltigen Umgebung eines Labors arbeiten.

Wie Forscher herausfanden, lassen sich verschiedene kommensale Bakterienarten mit Hilfe des Gens für die so genannte 16S-ribosomale RNA auseinanderhalten. Das ist ein wichtiger Baustein der Proteinfabriken der Zelle, der Ribosomen. Jede Mikrobenart besitzt eine individuelle Version dieses Gens als unverwechselbares Merkmal. Indem sie die verschiedenen Varianten des Gens bestimmen, erstellen Wissenschaftler einen Katalog des gesamten humanen Mikrobioms. Dadurch lernen sie, welche mikrobiellen Spezies in unserem Körper leben und wie sich deren Zusammensetzung von Mensch zu Mensch unterscheidet.

Aus einer unlösbaren Herkulesaufgabe wurde eine lediglich komplizierte

Im nächsten Schritt analysieren die Forscher weitere Gene der mikrobiellen Lebensgemeinschaft, um herauszufinden, welche davon im menschlichen Körper aktiv sind und welche Funktionen sie erfüllen. Auch das ist eine Herkulesaufgabe: einerseits wegen der großen Zahl an Bakterienarten und andererseits, weil ihre Erbanlagen während der Probenverarbeitung vermischt werden. Aktive bakterielle Gene zu identifizieren, ist zwar relativ einfach – sie einzelnen Spezies zuzuordnen hingegen nicht. Erst die Entwicklung leistungsfähiger Computer und extrem schneller Sequenziermaschinen im vergangenen Jahrzehnt machte aus dieser einst unlösbaren Sortier- und Auswertungsaufgabe eine lediglich noch recht komplizierte.

Zwei unabhängige Arbeitsgruppen, eine in den USA, die andere in Europa, nutzen die neuen Technologien dazu, die Gesamtzahl der bakteriellen Gene im menschlichen Mikrobiom zu bestimmen. Anfang 2010 veröffentlichte das europäische Team seine Ergebnisse über den Verdauungstrakt: Die Forscher identifizierten dort insgesamt 3,3 Millionen verschiedene Gene von über 1000 Bakterienarten – also etwa 150-mal so viele Erbfaktoren, wie wir eigene besitzen.

Die Fortschritte in der Mikrobiomforschung führten zu überraschenden Erkenntnissen. So ist die mikrobielle Flora jedes Menschen einzigartig (siehe auch Spektrum der Wissenschaft 1/2012, S. 19); selbst bei eineiigen Zwillingen unterscheidet sich die Zusammensetzung der kolonisierenden



Mikroorganismen oft dramatisch. Der individuelle Gesundheitszustand und vielleicht sogar bestimmte Verhaltensweisen könnten demnach mehr mit genetischen Variationen des Mikrobioms zu tun haben als mit jenen unseres eigenen Erbguts – hat doch das Humangenomprojekt gezeigt, dass die DNA bei allen Menschen weltweit zu 99,9 Prozent übereinstimmt. Und obwohl die mikrobielle Flora verschiedener Personen in puncto Anzahl und Verteilung der vertretenen Spezies variiert, lässt sich bei den meisten ein gemeinsamer Satz nützlicher bakterieller Gene finden, wobei diese von verschiedenen Arten stammen können. Allerdings: Selbst die nützlichsten Bakterien können schwere Erkrankungen hervorrufen, wenn sie im Körper an Orte gelangen, wo sie nicht hingehören. Beispiele hierfür sind etwa Blutvergiftung und Bauchfellentzündung.

Dass manche Bakterien dem Menschen womöglich nützen, zeigte sich schon vor Jahrzehnten bei Studien zur Verdauung und zur Vitaminproduktion im Darm von Tieren. In den 1980er Jahren stellte sich heraus, dass nur Bakterien über die nötige Enzymausstattung verfügen, mit der sich Vitamin B₁₂ aus einfachen Grundstoffen herstellen lässt. Unsere Zellen benötigen es, um Energie zu gewinnen, DNA zu synthetisieren und Fettsäuren zu produzieren. Ebenfalls lange bekannt ist, dass Darmbakterien bestimmte Nahrungsbestandteile abbauen, die sonst unverdaulich wären und unseren Körper ungenutzt wieder verlassen würden. Doch erst in den letzten Jahren entdeckten Forscher, welche zentrale Rollen zwei kommensale Mikrobenarten bei der menschlichen Verdauung und bei der Steuerung des Appetits spielen.

Das vielleicht beste Beispiel für eine nützliche Bakterie ist *Bacteroides thetaiotaomicron*, deren Name ein wenig an die mancher amerikanischer Studentenverbindung erinnert. Die Mikrobe erweist sich unter anderem als höchst vielseitig, wenn es um den Abbau von Kohlenhydraten geht: Sie kann große, komplexe pflanzliche Mehrfachzucker (Polysaccharide) in Glukose und andere leicht verdauliche Einfachzucker zerlegen. Uns Menschen fehlen die meisten der dafür nötigen Gene. *B. thetaiotaomicron* hingegen kann mehr als 260 Enzyme herstellen, die pflanzliche Polysaccharide abbauen, und ermöglicht uns dadurch etwa, Nährstoffe aus Orangen, Äpfeln, Kartoffeln oder Weizenkeimen zu verwerten.

Detailliertere Erkenntnisse über das genaue Zusammenspiel von *B. thetaiotaomicron* mit seinem Wirt ergaben Studien an Mäusen, die zunächst unter völlig keimfreien Bedingungen – also ohne Mikrobiom – aufgezogen und dann ausschließlich mit dieser Bakterie in Kontakt gebracht wurden. Die Forscher der Washington University in St. Louis berichteten 2005, dass die Bakterien aus Polysacchariden kurzkettige Fettsäuren herstellen, die ihnen, aber auch den Mäusen als Nährstoffe dienen. Damit liefern die Untermieter ihrem Wirt zusätzliche Kalorien aus sonst unverdaulichen Ballaststoffen wie etwa Haferkleie. Völlig keimfrei gehaltene Nagetiere müssen daher für die gleiche Gewichtszunahme etwa 30 Prozent mehr Kalorien zu sich nehmen als Nager mit intaktem Mikrobiom.

Die Untersuchung des Mikrobioms hat auch den Ruf der Bakterie *Helicobacter pylori* wiederhergestellt. Sie gehört zu den wenigen Mikroben, die im sauren Milieu des Magens gedeihen. In den 1980er Jahren hatten die australischen Ärzte Barry Marshall und Robin Warren *H. pylori* als eine wichtige Ursache von Magengeschwüren ausgemacht. Daraufhin begannen Ärzte, diese Erkrankungen routinemäßig mit Antibiotika zu behandeln. Die Häufigkeit der von *H. pylori* hervorgerufenen Magengeschwüre hat sich seitdem mehr als halbiert.

Doch so einfach ist die Sache nicht, meint Martin Blaser, Professor für innere Medizin und Mikrobiologie an der New York University, der den Keim seit 25 Jahren erforscht. »Anfänglich dachte ich wie alle, wir hätten es einfach nur mit einem Krankheitserreger zu tun«, sagt er. »Es dauerte ein paar Jahre, bis ich erkannte, dass es sich in Wirklichkeit um eine kommensale Bakterie handelt.« 1998 veröffentlichten Blaser und seine Kollegen eine Studie, der zufolge *H. pylori* dem Menschen hilft, den Säuregrad im Magen zu regulieren, und damit eine Umgebung schafft, die ihm selbst und dem Wirt gleichermaßen nützt. Wenn der Magen zu viel Säure für die Mikroben produziert, beginnen *H. pylori*-Stämme mit dem so genannten *cagA*-Gen Proteine herzustellen, die dem Magen signalisieren, die Säureproduktion zu drosseln. Bei entsprechend anfälligen Menschen hat das *cagA*-Protein jedoch einen unerfreulichen Nebeneffekt: Es verursacht ebenjene Magengeschwüre, die der Mikrobe ihren schlechten Ruf eingebracht haben.

Ein gutes Jahrzehnt später wies Blaser dann nach, dass *H. pylori* neben der Säureregulation noch eine weitere Aufgabe im Verdauungstrakt erfüllt. Schon seit Jahren kannten die Forscher zwei Hormone, die im Magen produziert werden und die Aufgabe haben, den Appetit zu steuern: Ghrelin, das dem Gehirn Nahrungsbedarf signalisiert, und Leptin, das unter anderem anzeigt, dass der Magen gefüllt ist. »Wenn man morgens aufwacht und Hunger hat, liegt das an einem hohen Ghrelin-Spiegel«, erläutert Blaser. »Das Hormon fordert Sie zum Essen auf. Nach dem Frühstück sinkt der Ghrelin-Spiegel wieder ab.«

Blaser und seine Kollegen untersuchten nun bei Probanden mit und ohne *H. pylori*-Besiedelung den Ghrelin-Pegel

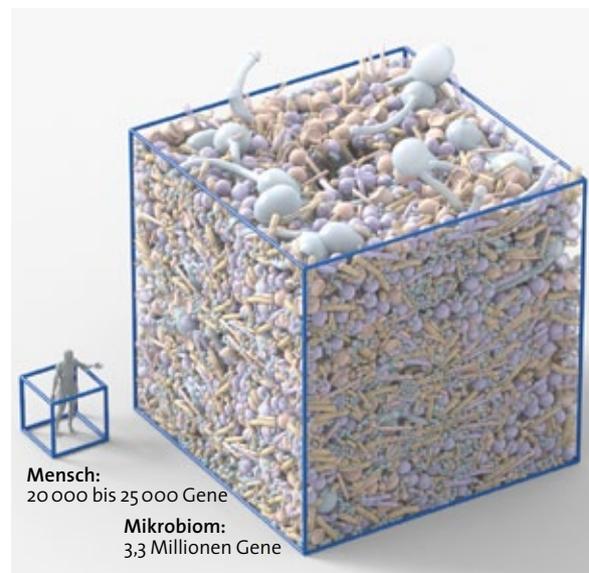
im Blut jeweils vor und nach den Mahlzeiten. Die Ergebnisse waren eindeutig: »In Gegenwart der Bakterie geht der Ghrelin-Spiegel nach dem Essen zurück. Wird sie mit Antibiotika ausgemerzt, verschwindet dieser Effekt«, sagt Blaser. »*H. pylori* ist also an der Regulation des Ghrelins beteiligt« – und damit an der Steuerung des Appetits. Wie der Keim das bewerkstelligt, ist bisher noch weit gehend unklar. Doch die Folgen sind offensichtlich: In der Studie stieg das Körpergewicht der Probanden nach der Antibiotikabehandlung an, während es in der Kontrollgruppe gleich blieb. Dies dürfte wohl daran liegen, dass der Ghrelin-Spiegel nun nach dem Essen hoch blieb, statt wie normal abzusinken. Die Probanden waren also länger hungrig und aßen dementsprechend zu viel.

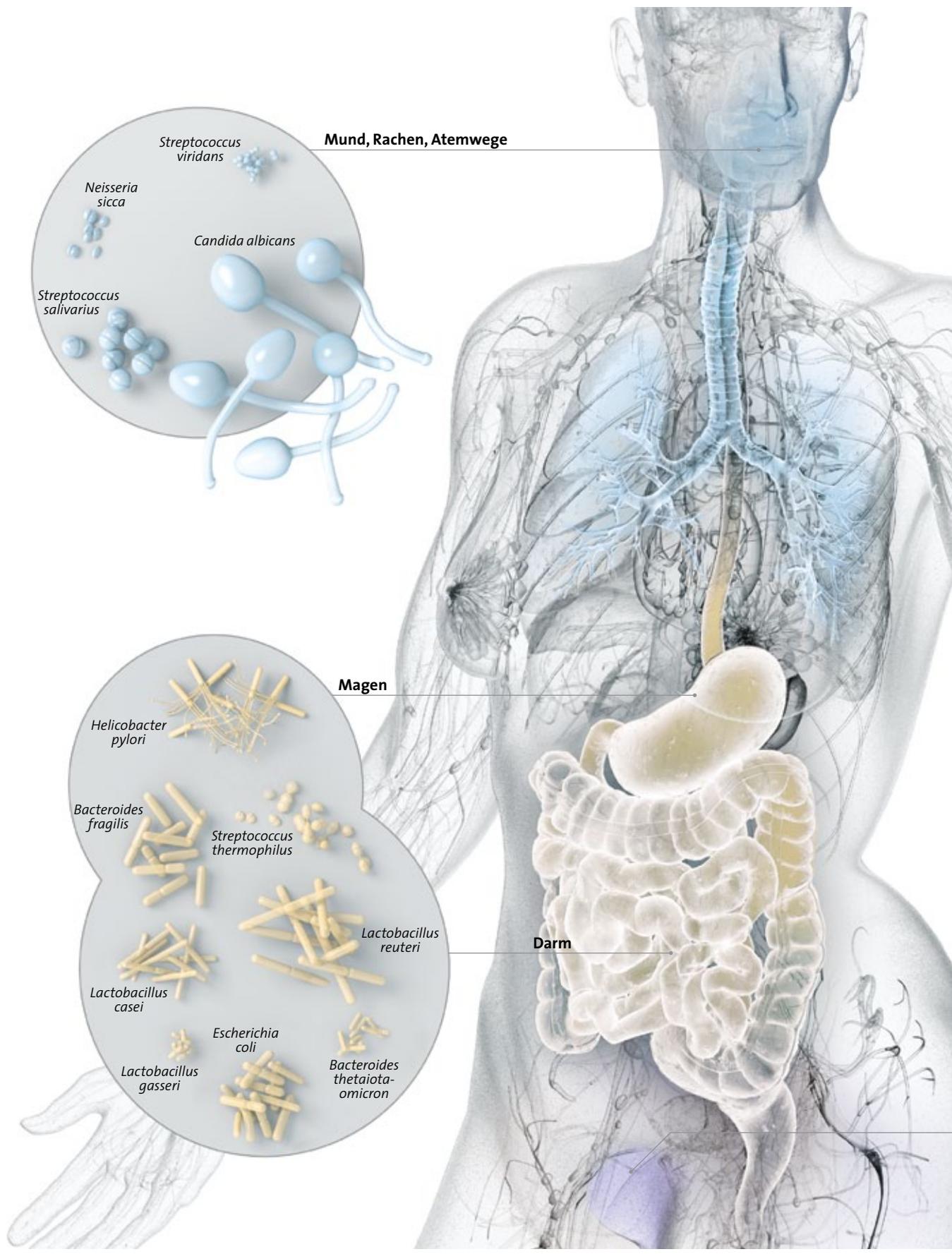
Generation Antibiotika

Vor zwei oder drei Generationen beherbergten noch mehr als 80 Prozent aller US-Bürger die Mikrobe. Heute fällt ein Test darauf bei weniger als sechs Prozent der amerikanischen Kinder positiv aus. »Eine ganze Generation wächst ohne *H. pylori* auf, der das Ghrelin in ihrem Magen regulieren könnte«, stellt Blaser fest. Zudem sind bei Kindern, die häufiger mit hohen Dosen von Antibiotika behandelt wurden, auch andere Veränderungen der mikrobiellen Flora zu beobachten. Bis zum Alter von 18 Jahren hat ein US-Amerikaner im Durchschnitt bereits 10- bis 20-mal Antibiotika geschluckt, etwa wegen Mittelohrentzündungen. Blaser glaubt,

Kleine Helfer

Die nützlichen Bakterien im Darm und auf der Haut des Menschen enthalten zusammen weit mehr unterschiedliche Gene als unsere eigenen Zellen. Forscher untersuchen nun genauer, welche der vielen bakteriellen Gene ihrem menschlichen Wirt nützen und wie sie das tun.





Mund, Rachen, Atemwege

Streptococcus viridans
Neisseria sicca
Candida albicans
Streptococcus salivarius

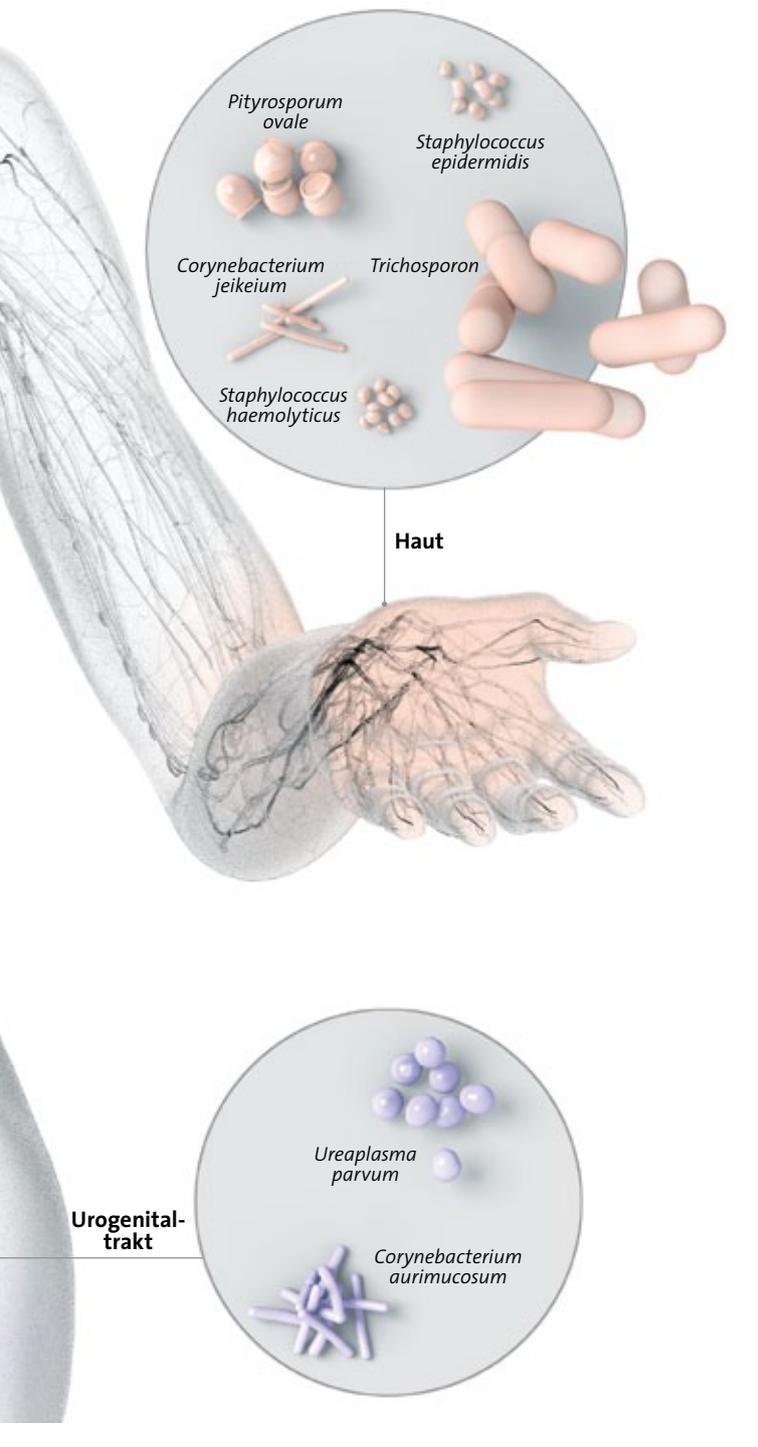
Magen

Helicobacter pylori
Bacteroides fragilis
Streptococcus thermophilus
Lactobacillus reuteri
Lactobacillus casei
Escherichia coli
Lactobacillus gasseri
Bacteroides thetaiotaomicron

Darm

Für jeden Job die richtige Mikrobe

Überall in und auf unserem Körper finden sich verschiedenste Arten von Mikroorganismen, die ganz unterschiedliche Aufgaben erfüllen. Sie helfen uns gesund zu bleiben, beispielsweise indem sie Krankheitserregern den Zutritt erschweren. Einige Bakterienarten, etwa *Bacteroides fragilis*, üben zudem besonders nützliche Funktionen aus, indem sie die Reifung und Regulation des Immunsystems unterstützen (siehe Grafik S. 32).



dass dies die Darmflora verändert, was die zunehmende Fettleibigkeit bei Heranwachsenden mitverursachen könnte. Die Zusammensetzung des Mikrobioms könnte nämlich laut Blaser mit darüber entscheiden, ob aus bestimmten unspezialisierten Stammzellen Muskel-, Knochen- oder aber Fettzellen hervorgehen. Antibiotikabehandlungen in jungen Jahren, die so manche Bakterienspezies aus dem Mikrobiom eliminieren, könnten die normalen Signalmechanismen stören und damit eine Überproduktion von Fettzellen verursachen.

Die Ergebnisse einer im August 2012 veröffentlichten Studie der New Yorker Forscher an 11 000 Kindern deuten in die gleiche Richtung: Wer im ersten halben Lebensjahr Antibiotika bekam, hatte eine gut 20 Prozent höhere Wahrscheinlichkeit, mit drei Jahren übergewichtig zu sein. Auch in Deutschland wird der Nachwuchs oft mit Antibiotika behandelt. Laut einer Studie der Bertelsmann-Stiftung erhielt 2009 jedes zweite Kind unter den Drei- bis Sechsjährigen solche Medikamente.

Damit könnte das rasche Verschwinden von *H. pylori* und anderen Bakterienarten aus dem menschlichen Mikrobiom zusammen mit der besseren Verfügbarkeit energiereicher Nahrungsmittel und dem fortlaufenden Rückgang körperlicher Arbeit möglicherweise eine weltweite Epidemie der Fettleibigkeit auslösen. »Wir wissen noch nicht, wie sehr sich Adipositas auf die Veränderung der mikrobiellen Gemeinschaft zurückführen lässt«, meint Blaser dazu, »aber ich bin sicher, dass ihr Anteil nicht vernachlässigbar ist.«

Der aktuelle Trend zum Kaiserschnitt hat gewichtige Folgen

Der verbreitete Einsatz von Antibiotika ist dabei aus Blasers Sicht nicht die einzige Ursache der derzeit ablaufenden, in der menschlichen Geschichte wohl beispiellosen Umwälzungen in unserem Mikrobiom. So führt die dramatische Zunahme an Kaiserschnittgeburten in den letzten Jahrzehnten dazu, dass wichtige bakterielle Kommensalen nicht mehr bei der Passage des Geburtskanals weitergegeben werden – etwa Laktobakterien aus der mütterlichen Vagina, die dem Säugling helfen, Muttermilch zu verdauen.

In den USA wie auch in Deutschland kommen inzwischen mehr als 30 Prozent der Kinder via Schnittentbindung zur Welt, während in städtischen Zentren Chinas mit seiner Ein-Kind-Politik sogar zwei Drittel aller Entbindungen auf dem Operationstisch und nicht im Kreißsaal stattfinden. Die betroffenen Babys werden dann eher zufällig besiedelt, etwa von Mikroben aus der Luft oder aus dem Kreißsaal. Entsprechend weisen die Kinder eine abweichende Mikroflora auf, oft sogar noch Jahre später. Auch hier scheint Fettleibigkeit eine mögliche Folge zu sein, wie eine Untersuchung von über 1000 Kindern in Massachusetts zeigte: Bei Kaiserschnittkindern lag der Anteil der übergewichtigen rund doppelt so hoch wie bei natürlich geborenen.

In vielen Gegenden der Welt geht zudem die Kinderzahl stark zurück, so dass der Nachwuchs weniger oder keine Geschwister hat. Damit fallen wichtige Quellen für kolonisie-

rende Mikroorganismen weg. Selbst die an sich höchst wünschenswerte Verfügbarkeit sauberen Wassers, die jedes Jahr Millionen Menschen vor dem Tod durch Infektionen bewahrt, reduziert auch die Vielfalt der nützlichen Bakterienarten, denen wir ausgesetzt sind. Insgesamt wachsen immer mehr Menschen in einer mikrobiell verarmten Umwelt auf.

Bakterien wie *B. thetaiotaomicron* und *H. pylori* spielen demnach ungeahnt komplexe Rollen im menschlichen Organismus. Wie geht nun aber der Körper mit all den Unter-

miethern um? Eigentlich sollte sich das Immunsystem, das nach klassischem Verständnis körpereigene Zellen von fremden unterscheidet, im Dauerkrieg mit den zahllosen Eindringlingen befinden. Weshalb also der Darm nicht ständig Schauplatz hitziger Gefechte zwischen menschlichen Immunzellen und Billionen Bakterien ist, bleibt vorerst eines der großen ungelösten Rätsel der Immunologie.

Immerhin: Einige wenige Hinweise geben faszinierende Einblicke in die fein abgestimmte Balance zwischen Mikrobiom und Immunzellen, die sich in den letzten rund 200 000 Jahren etabliert hat. Im Lauf der Evolution haben sich zahlreiche Regulationsmechanismen im Immunsystem entwickelt, die für gewöhnlich verhindern, dass es zu aggressiv vorgeht und das eigene Gewebe angreift oder aber zu nachlässig wird und gefährliche Krankheitserreger übersieht. So spielen beispielsweise T-Zellen eine wichtige Rolle beim Erkennen und Bekämpfen von mikrobiellen Eindringlingen. Außerdem verursachen sie die typische Schwellung, Rötung und Erwärmung, die bei einer Entzündungsreaktion gegen einen Krankheitserreger auftreten. Doch kaum hat der Körper die Produktion von entzündungsfördernden T-Zellen hochgefahren, stellt er auch schon regulatorische T-Zellen her, die der Aktivität der ersteren entgegenwirken.

Normalerweise werden die regulatorischen Zellen aktiv, bevor die entzündungsfördernden zu heftig dreinschlagen. »Das Problem ist nämlich, dass viele der Maßnahmen proinflammatorischer T-Zellen zur Infektionsabwehr – etwa das Freisetzen aggressiver Stoffe – letztlich auch unser eigenes Gewebe schädigen«, sagt Mazmanian vom CalTech. Glücklicherweise produzieren regulatorische T-Zellen ein Protein, das den Eifer der entzündungsfördernden zügelt. Sie dämpfen also die Entzündungsreaktion und verhindern, dass das Immunsystem die körpereigenen Zellen und Gewebe angreift. Solange ein ausgewogenes Verhältnis zwischen den aggressiven und den mäßigenden T-Zellen besteht, bleibt der Organismus gesund.

Lange Jahre waren die Forscher der Auffassung, das Immunsystem würde diese Balance völlig selbstständig austarieren. Doch auch hier zeigte sich, wie wenig wir unser Schicksal bestimmen. Mazmanian und andere Forscher finden nämlich immer mehr Hinweise darauf, dass ein gesundes, reifes Immunsystem auf die ständige Mitarbeit nützlicher Bakterien angewiesen ist. »Die Vorstellung, Bakterien könnten die Funktion unserer Immunabwehr optimieren, widerspricht dem herrschenden Dogma«, erklärt er, »doch es kristallisierte sich deutlich heraus, dass die Kommensalen wesentliche Eigenschaften unseres Immunsystems bestimmen.«

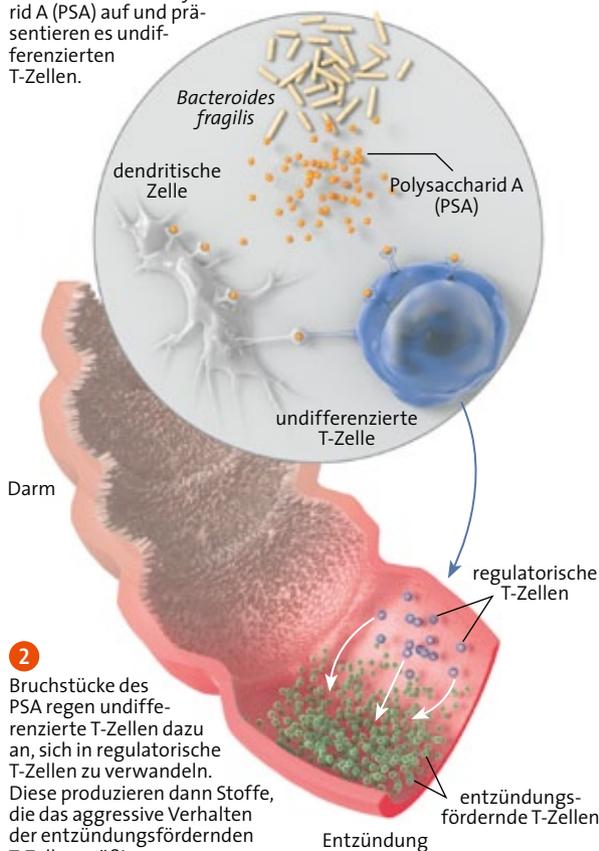
Laut Mazmanian und seinem Team hilft eine Mikrobe namens *Bacteroides fragilis*, die etwa 70 bis 80 Prozent aller Menschen bewohnt, dem Immunsystem die Balance zu wahren, indem es dessen antientzündliche Mechanismen stärkt. Die Forscher hatten beobachtet, dass keimfrei aufgezogene Mäuse eine defekte Immunabwehr besaßen, wobei vor allem die regulatorischen T-Zellen nicht mehr richtig arbeiteten. Als das Team den Mäusen *B. fragilis* zuführte, kamen die ent-

Immunregulation im Darm

Untersuchungen an Mäusen, die unter sterilen Bedingungen aufgezogen wurden, zeigten, dass *Bacteroides fragilis* eine wichtige Rolle für die Gesundheit des Darms spielt. In einer Studie bekamen keimfreie Mäuse einen *B.-fragilis*-Stamm, der das Zuckermolekül Polysaccharid A (PSA) produziert. Ihr Darm blieb gesund, wohingegen Mäuse, die einen *B.-fragilis*-Stamm ohne die Fähigkeit zur PSA-Produktion erhielten, eine chronisch-entzündliche Darmerkrankung (Colitis) ausbildeten. Wie die Forscher nachwiesen, stimulierte die Anwesenheit von PSA die Entwicklung regulatorischer T-Zellen, die wiederum die aggressiven T-Zellen ausschalteten.

1

Zellen des Immunsystems, so genannte dendritische Zellen, nehmen ein von *Bacteroides fragilis* produziertes Molekül namens Polysaccharid A (PSA) auf und präsentieren es undifferenzierten T-Zellen.



2

Bruchstücke des PSA regen undifferenzierte T-Zellen dazu an, sich in regulatorische T-Zellen zu verwandeln. Diese produzieren dann Stoffe, die das aggressive Verhalten der entzündungsfördernden T-Zellen mäßigen.

Bakterien beeinflussen Medikamentenwirkung

Auch Pharmakologen interessieren sich zunehmend für das Darmmikrobiom. Denn die kleinen Mitbewohner scheinen die Effekte von Medikamenten mittels verschiedener Mechanismen verändern zu können – etwa indem sie die Stoffe so umwandeln, dass sie entweder stärker oder schwächer wirken. Die Bakterie *Eggerthella lenta* inaktiviert beispielsweise das Herzmedikament Digoxin.

zündungsfördernden und -hemmenden T-Zellen ins Gleichgewicht – das Immunsystem der Nager fing wieder an, normal zu funktionieren.

Was passiert dabei genau? In den frühen 1990er Jahren begannen Wissenschaftler verschiedene Zuckermoleküle zu untersuchen, die aus der Zellwand von *B. fragilis* ragen und an denen das Immunsystem die Bakterie erkennt. 2005 konnten Mazmanian und seine Kollegen dann zeigen, dass eines dieser Moleküle die Reifung des Immunsystems fördert: das Polysaccharid A. Wie die Forscher später entdeckten, veranlasst Polysaccharid A das Immunsystem zur verstärkten Produktion regulatorischer T-Zellen, welche die proinflammatorischen T-Zellen daran hindern, die Bakterie anzugreifen. Stämme von *B. fragilis* ohne Polysaccharid A überleben in der Darmschleimhaut nicht, denn die Immunzellen attackieren diese Mikroben, als wären sie Krankheitserreger.

Der Preis der Mikrobenbekämpfung

Bis 2011 hatten Mazmanian und seine Mitarbeiter den kompletten molekularen Signalweg aufgeklärt, der diesen Effekt vermittelt. Es war das erste Mal, dass der vollständige Mechanismus einer solchen Kooperation zwischen Bakterien und Säugetieren, die Experten Mutualismus nennen, beschrieben wurde. »*B. fragilis* hilft uns mit einer überaus nützlichen Leistung, die wir mit unserer eigenen Genauausstattung aus unbekanntem Gründen nicht zu Wege bringen«, sagt Mazmanian. »Die Mikrobe übernimmt dabei in gewissem Maß sogar die Kontrolle über das Immunsystem.« Und dadurch funktioniert dieses besser. Andere Mikroorganismen dürften das Immunsystem ähnlich beeinflussen, fügt Mazmanian hinzu. »Das ist nur das erste bislang entdeckte Beispiel; es gibt zweifellos noch viele andere.«

Doch auf Grund der Veränderungen der Lebensgewohnheiten im letzten Jahrhundert verschwindet *B. fragilis* ebenso wie *H. pylori* aus unserem Mikrobiom. »Unsere Anstrengungen, Krankheitserreger weit gehend aus der Umgebung zu verbannen, treffen auch nützliche Mikroorganismen«, sagt Mazmanian. »Das geschieht zwar in guter Absicht, aber wir zahlen einen Preis dafür.«

Im Fall von *B. fragilis* könnte der Preis in einer Zunahme von Autoimmunerkrankungen bestehen. Fehlt Polysaccharid A, welches das Immunsystem zur vermehrten Produktion re-

gulatorischer T-Zellen anregt, beginnen die aggressiveren Immunzellen alles anzugreifen, was in ihre Nähe kommt – einschließlich der körpereigenen Gewebe. Mazmanian führt die in letzter Zeit beobachtete sieben- bis achtfache Zunahme von Autoimmunerkrankungen wie Morbus Crohn, Diabetes mellitus Typ 1 und multiple Sklerose auch auf den Rückgang der Besiedlung mit nützlichen Bakterien zurück. »An all diesen Erkrankungen sind genetische und Umweltfaktoren beteiligt«, sagt Mazmanian. »Ich glaube, dass die Umweltkomponente in den Veränderungen unseres Mikrobioms besteht, die das Immunsystem beeinflussen.« Bei Menschen mit entsprechender genetischer Veranlagung könnten diese Umweltfaktoren zu Autoimmunerkrankungen und anderen gesundheitlichen Störungen führen.

So lautet zumindest die aktuelle Hypothese. Der Zusammenhang zwischen dem Verschwinden nützlicher Bakterien und der Häufung von Autoimmunerkrankungen ist bisher nur eine Korrelation. Ursache und Wirkung zu unterscheiden, ist hier ebenso schwierig wie bei der Fettleibigkeit. Fördern Veränderungen der Darmflora Autoimmunerkrankungen oder schaffen überschießende Abwehrreaktionen und Fettleibigkeit ungünstige Bedingungen für unsere mikrobiellen Mitbewohner? Mazmanian ist davon überzeugt, dass Ersteres zutrifft. Doch »die Beweislast liegt bei uns, den Wissenschaftlern«, sagt er. »Jetzt müssen wir die Kausalbeziehung nachweisen, indem wir die zu Grunde liegenden Mechanismen entschlüsseln. Da wartet noch ein schönes Stück Arbeit auf uns.« ~

DIE AUTORIN



Jennifer Ackerman ist eine preisgekrönte Wissenschaftsjournalistin und Autorin mehrerer populärwissenschaftlicher Bücher, darunter »24 Stunden: Ein Tag im Leben deines Körpers«. Zurzeit schreibt sie ein Buch über die Intelligenz von Vögeln.

QUELLEN

- Blaser, M. J.:** Who Are We? Indigenous Microbes and the Ecology of Human Diseases. In: EMBO Reports 7, S. 956–960, 2006
Lee, Y. K., Mazmanian, S. K.: Has the Microbiota Played a Critical Role in the Evolution of the Adaptive Immune System? In: Science 330, S. 1768–1773, 2010
Qin, J. et al.: A Human Gut Microbial Gene Catalogue Established by Metagenomic Sequencing. In: Nature 464, S. 59–65, 2010
Trasande, L. et al.: Infant Antibiotic Exposures and Early-Life Body Mass. In: International Journal of Obesity 10.1038/ijo.2012.132, 2012

WEBLINKS

www.spektrum.de/mikrobiom
Interaktive Grafik mit Informationen über einige der wichtigsten Mikroorganismen, die in und auf unserem Körper leben

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1165730

Verkannte Giganten

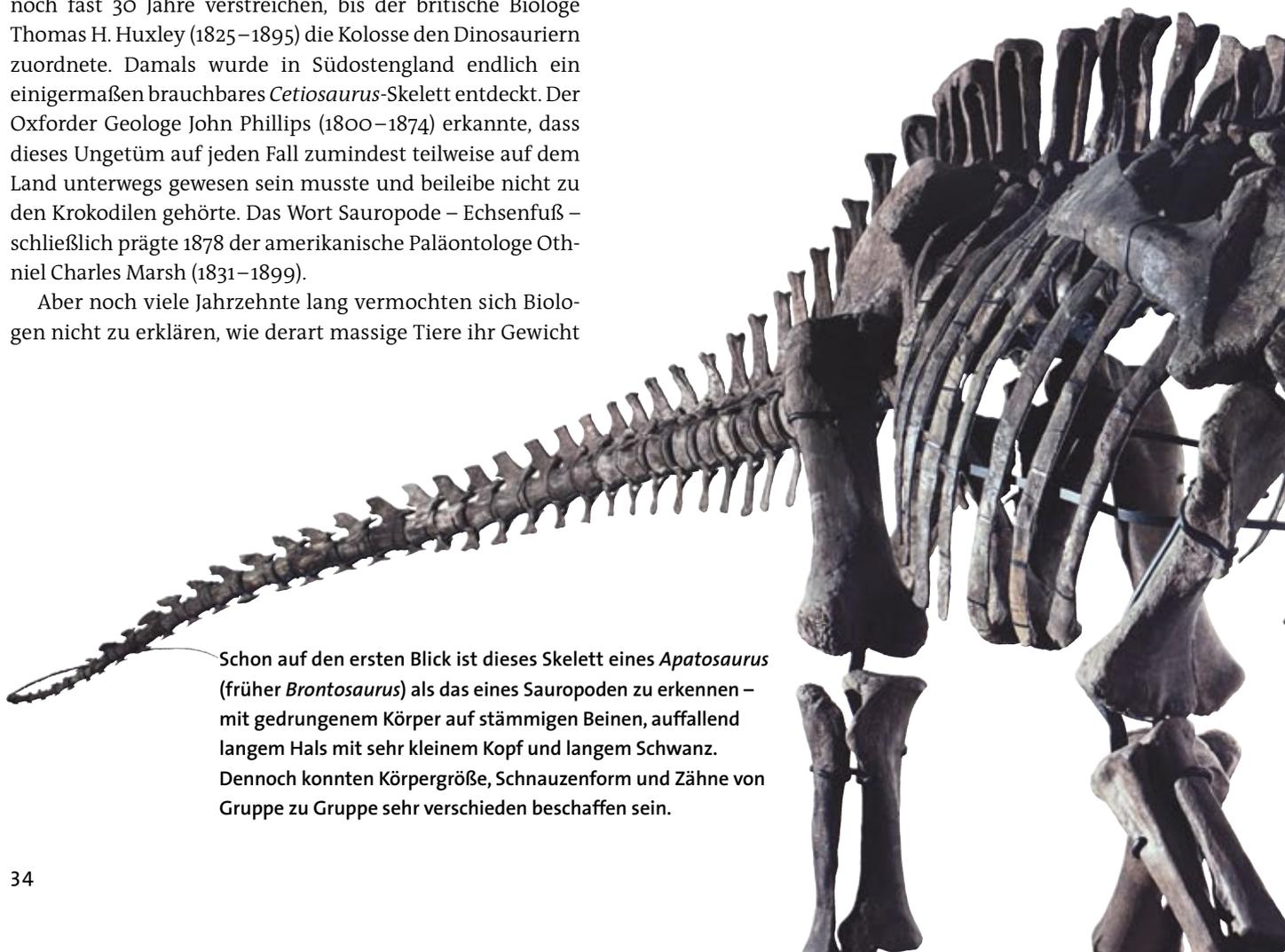
Sie waren die größten und schwersten Landtiere aller Zeiten – und entgegen einer weit verbreiteten Ansicht evolutionär sehr wendig. Die Sauropoden behaupteten sich bis zum Untergang der Dinosaurier am Ende der Kreidezeit bestens – dank immer neuer Anpassungen an sich wandelnde Umwelten.

Von Kristina A. Curry Rogers und Michael D. D’Emic

An den langhalsigen Giganten mit dem viel zu kleinen Kopf rätseln Naturforscher herum, seit sie deren überdimensionale Knochenfossilien zu Gesicht bekamen. Spätestens in den 1820er und 1830er Jahren tauchten in England die ersten solchen Zeugnisse auf. Als der britische Zoologe und Paläontologe Richard Owen (1804–1892) den Dinosauriern Anfang der 1840er Jahre ihren Namen gab und sie als eine eigene Gruppe abgrenzte, schloss er diese Riesentiere nicht mit ein. Denn er hielt sie für im Meer lebende Krokodile und hatte für sie die Gattungsbezeichnung *Cetiosaurus* geprägt, was so viel heißt wie »Meeresmonsterechse« oder »Walechse«. Letztlich sollten noch fast 30 Jahre verstreichen, bis der britische Biologe Thomas H. Huxley (1825–1895) die Kolosse den Dinosauriern zuordnete. Damals wurde in Südostengland endlich ein einigermaßen brauchbares *Cetiosaurus*-Skelett entdeckt. Der Oxforder Geologe John Phillips (1800–1874) erkannte, dass dieses Ungetüm auf jeden Fall zumindest teilweise auf dem Land unterwegs gewesen sein musste und beileibe nicht zu den Krokodilen gehörte. Das Wort Sauropode – Echsenfuß – schließlich prägte 1878 der amerikanische Paläontologe Othniel Charles Marsh (1831–1899).

Aber noch viele Jahrzehnte lang vermochten sich Biologen nicht zu erklären, wie derart massige Tiere ihr Gewicht

tragen konnten. Und weil die Sauropoden zu keinem Lebensraum so recht zu passen schienen – weder zum Meer noch zum Land –, bekamen sie den Ruf schlecht angepasster, weil viel zu groß geratener Pflanzen fressender Ungetüme: zu schwerfällig, um sich längere Zeit in der Erdgeschichte zu behaupten, und darum von vornherein einem baldigen Untergang geweiht. Zumindest, glaubten Paläontologen, handelte es sich um archaische Dinosaurier, die bald von moderneren Vertretern der Gruppe überflügelt und an den Rand gedrängt worden waren. Noch 1991 hieß es, an der höchsten Blüte dieser Reptilien hätten sie keinen



Schon auf den ersten Blick ist dieses Skelett eines *Apatosaurus* (früher *Brontosaurus*) als das eines Sauropoden zu erkennen – mit gedrungener Körper auf stämmigen Beinen, auffallend langem Hals mit sehr kleinem Kopf und langem Schwanz. Dennoch konnten Körpergröße, Schnauzenform und Zähne von Gruppe zu Gruppe sehr verschieden beschaffen sein.

Anteil gehabt und wären nur so lange erfolgreich gewesen, bis spezialisiertere, mit größeren Gehirnen ausgestattete Pflanzenfresser erschienen. Lediglich in der Periode des Juras, der Phase vor etwa 145 bis 200 Millionen Jahren, konnten die Sauropoden demnach bestehen. Doch in der Kreidezeit – also vor 65,5 bis 145 Millionen Jahren, mit der die Dinosaurierzeit zu Ende ging – gewannen angeblich Gruppen wie die Hadrosaurier (Entenschnabeldinosaurier) und die Ceratopsier (Horndinosaurier) die Oberhand. Damals hielten sich, wie es schien, nur auf der Südhalbkugel letzte Sauropoden.



FOTO: CHRISTOPHER GRIFFITH, CARNEGIE MUSEUM OF NATURAL HISTORY, PITTSBURGH, USA

AUF EINEN BLICK

WAHRE HERRSCHER DER SAURIERZEIT

1 Noch lange nach der Entdeckung ihrer Fossilien im frühen 19. Jahrhundert galten die **Sauropoden** oder Elefantenfußsaurier als sehr altertümliche, schlecht angepasste Dinosaurier, die sich weder für das Leben im Wasser noch auf dem Land wirklich eigneten und deswegen angeblich bald wieder ausstarben.

2 Erst Funde der letzten Jahrzehnte zeigten, dass die riesigen **Pflanzenfresser** fast 150 Millionen Jahre lang sehr erfolgreich und anpassungsfähig waren. Noch bis zum Ende der Dinosaurier vor rund 65 Millionen Jahren brachten sie zahlreiche neue Arten hervor, die sich auch mit der damals aufkommenden Vielfalt der **Blütenpflanzen** bestens arrangierten.

3 Ihren Erfolg verdankten sie einer **Kombination von Reptilien- und Säugetiereigenschaften** sowie Anlehnungen an Merkmale von Vögeln. Zudem verstanden sie es, sich wandelnden Umweltbedingungen rasch zu begegnen.

Heute wissen Paläontologen: Dieses Szenario war grundfalsch. In den letzten Jahrzehnten haben sie auf der ganzen Welt Sauropodenfossilien entdeckt, die eine völlig andere Geschichte erzählen. Allein in den vergangenen zehn Jahren kamen über 60 neue Arten zu Tage. Anscheinend konnten sich diese gigantischen Tiere über weite Abschnitte des Erdmittelalters, somit rund 150 Millionen Jahre lang, bestens durchsetzen (siehe Bild S. 38/39). Viele von ihnen waren wahre Kolosse mit einer Körpermasse an den Grenzen des biologisch Machbaren.

Die Forscher sind nun dabei, die offenen Fragen über die phänomenalen Riesen zu klären. Dank spektakulärer Funde und neuer Analysemöglichkeiten gewannen sie bereits Einblicke in Wachstum, Fortpflanzung, Ernährung und das Anpassungsvermögen gegenüber dramatischen Umweltveränderungen – was die alten Vorstellungen über die Elefantenfußdinosaurier in fast jeder Hinsicht auf den Kopf stellt.

Unerforschte Fossilien in den Lagern von Museen

Wie so viele sind auch wir beide einem solchen Monstrum das erste Mal als Schulkinder im Museum begegnet. Ehrfürchtig staunend haben wir zu dem kleinen Kopf am schier endlos langen Hals hochgeschaut, der alles im Saal weit überragte, sogar die anderen ausgestellten Dinosaurier. Dass solch ein Riesentier einmal auf der Erde gelebt hatte, konnten wir uns kaum vorstellen. Die ersten aufgerichteten Skelette von »klassischen« Sauropoden – allesamt aus dem Jura – tauchten in Museen Ende des 19. Jahrhunderts auf, und um die Jahrhundertwende strebte jedes größere Naturkundemuseum den Besitz eines *Diplodocus*, *Camarasaurus*, *Brachiosaurus* oder *Brontosaurus* an. Das größte aufgerichtete Skelett steht im Berliner Museum für Naturkunde. In jenen Jahren landeten in diesen Forschungsstätten dermaßen viele Sauropodenfossilien, dass mancherorts noch heute eingegippte Stücke in den Katakomben oder Regalen der Untersuchung harren.

Jene »klassischen« Sauropoden repräsentieren allerdings, wie wir erst jetzt erkennen, nur einen kleinen Ausschnitt der gesamten, vielfältigen Gruppe. Die ersten riesenhaften Arten traten vor rund 210 Millionen Jahren auf, in der späten oder Obertrias (siehe Bild S. 38/39). Damals ereignete sich ein Massensterben, dem etliche Reptiliengruppen zum Opfer fielen. Deren Verschwinden öffnete den Dinosauriern den Weg zu ihrem Erfolg. Zwar hatte es sie vorher schon gegeben: Ihre frühesten Fossilien kennen Paläontologen aus rund 230 Millionen Jahre alten Ablagerungen der Südhalbkugel. Aber jene Frühformen bewegten sich auf den Hinterbeinen und waren noch ziemlich klein. Aus ihnen gingen dann später so bekannte Gruppen hervor wie die Fleisch fressenden Theropoden – zu denen *Tyrannosaurus rex* gehört – und eben auch die Elefantenfußdinosaurier.

Als bisher älteste Zeugnisse von echten Sauropoden gelten 225 Millionen Jahre alte Fußspuren in Argentinien und

Nordamerika. Deren Verursacher liefen offenbar schon auf vier stämmigen »Elefanten«-Beinen. Nur wenig jünger sind die frühesten bekannten fossilen Skeletteile, die bereits den typischen Körperbau zeigen: der lange, sich verjüngende Hals und Schwanz, der auffallend kleine Schädel und die säulenförmigen Beine, die ein gewaltiges Gewicht zu tragen vermochten. Zu diesen Funden zählen *Isanosaurus* aus Thailand, *Gongxianosaurus* aus China oder *Vulcanodon* aus Simbabwe. Viele Sauropoden besaßen über 100 Wirbel, und schon damals waren sie quasi wandelnde Wirbelsäulen.

Auch wenn dieser Grundbauplan zeit ihres Daseins erhalten blieb, wurde er später in vielem noch ausgefeilter. Zudem förderte das Auseinanderbrechen der Erdplatten die Aufspaltung der Sauropoden in zahlreiche Linien und immer neue Gattungen und Arten. Bis zu ihrem Ende erlebte die Gruppe wiederholt Aufschwünge und Einbrüche. Es gab nicht nur die eine Blütezeit im Jura, sondern auch später noch weitere mit ebenfalls sehr großen Arten. Beispielsweise traten in der Kreidezeit so bedeutende Gruppen auf wie die stämmigen, teils über 30 Meter messenden Titanosaurier oder die etwas kleineren, 20 Meter langen Rebbachisauriden mit ihrer schaufelförmigen Schnauze. Die neueren Entdeckungen beweisen den Erfolg der Sauropoden in vieler Hinsicht. Sie waren nicht nur sehr weit verbreitet und vielfältig, manche Evolutionslinien existierten auch auffallend lange.

Wie mag ihnen das gelungen sein? Wie konnten solche Kolosse überhaupt leben und in der Welt zurechtkommen? Anscheinend trafen bei ihnen in einzigartiger Weise Reptilieneigenschaften mit Merkmalen zusammen, die eigentlich Säugetieren zugeschrieben werden. Owen irrte zwar, als er diese Kreaturen den Echsen zugesellte, doch in gewisser Weise trifft seine Bezeichnung »Walechsen« den Kern.

Die Sauropoden legten Eier, wie die meisten Reptilien und alle Dinosaurier. 1997 entdeckten der Paläontologe Luis Chiappe vom Natural History Museum of Los Angeles County und sein Team bei Auca Mahuevo in Argentinien in fast 80 Millionen Jahre alten Sedimenten einen Eiablageplatz von Titanosauriern mit tausenden kugelförmigen versteinerten Eiern. In manchen davon fanden sich Embryonen, die ersten von Sauropoden überhaupt. Teilweise sind sogar Haut und Eihüllen fossil erhalten.

Das war der erste konkrete Hinweis auf die Fortpflanzungsgewohnheiten dieser Tiere. Die Eier waren nur 13 bis 15 Zentimeter groß und wurden zu 20 bis 40 Stück in gegrabene flache Mulden gelegt. Die große Anzahl an Nestern am selben Ort lässt vermuten, dass Titanosaurier große Gruppen bildeten. Mindestens sechsmal scheinen sie besagtes Gebiet zur Eiablage gewählt zu haben. Überzeugende Hinweise auf eine Brutpflege gibt es allerdings nicht. Eher spricht die Dichte der Gelege dafür, dass sie Eier und Nachwuchs sich selbst überließen. Während große Säuger wie Elefanten oder Wale auf ein einzelnes Junges setzen, das sie intensiv umsorgen, folgten die Sauropoden offenbar dem typischen Reptilien-

»Es gab nicht nur die eine Blütezeit im Jura, sondern später noch weitere«



muster, viel Nachwuchs zu erzeugen, sich dann aber nicht weiter darum zu scheren.

Gar nicht reptilienmäßig war nach heutiger Kenntnis hingegen das Wachstumsschema der Sauropoden. Kein anderes Tier musste oder muss von der Geburt bis zum Erwachsenendasein jemals so viel wachsen. Die Jungen maßen anfangs keinen halben Meter und wogen zunächst unter zehn Kilogramm, während die Erwachsenen der größten Arten 30 Meter Länge hatten und 25 bis über 40 Tonnen gewogen haben mögen. Dagegen wiegen neugeborene Kälber von Afrikanischen Elefanten, deren Bullen sechs Tonnen und mehr auf die Wage bringen, nicht selten schon 120 Kilogramm.

Die meisten frühen Dinosaurierforscher übertrugen einfach die Wachstumsraten anderer Reptilien auf die Sauropoden. Schon die kleineren ihrer Arten hätten dann etwa 60 Jahre gebraucht, bis ihre Größenzunahme sich abflachte und sie endlich fortpflanzungsfähig wurden. Erst mit über 100 Jahren hätten sie volle Erwachsenengröße erreicht. Aber wer sich mit dem Wachsen so viel Zeit lässt, bleibt auch für Fressfeinde über lange Jahre hin angreifbar.

Wachstumsspuren in den Knochen

Das Bild begann sich in den 1960er Jahren entschieden zu wandeln. Damals machte sich der französische Paläontologe Armand de Ricqlès vom Collège de France in Paris daran, die innere Mikrostruktur fossiler Knochen unter anderem von Dinosauriern zu untersuchen. Er wollte damit Hinweise auf Wachstumsmuster und somit die Lebensgeschichte der Tiere finden. Denn solche Fossilien lassen oft noch die einstige Verteilung der Knochenmineralien und Hohlräume für Blutgefäße erkennen sowie Spuren, die ein Knochenumbau beim Wachstum oder mit der Geschlechtsreife hinterließ. Wie es demnach aussieht, wuchsen die Sauropoden in einem geradezu rasanten Tempo. Zumindest beeilten sie sich wesentlich mehr als heutige Reptilien. Sie kamen darin wohl eher modernen großen Säugern gleich, von denen viele kein Jahrzehnt bis zur Geschlechtsreife benötigen (siehe »Rasanter Riesenwuchs bei Dinosauriern«, SdW 5/2006, S. 26).

Ein so schnelles Wachstum muss mit einem besonders hohen Nahrungsbedarf einhergegangen sein. Wie es ihnen gelang, ihren enormen Appetit zu stillen, gehört allerdings noch zu den offenen Fragen. Sie fraßen Pflanzen, und die verschiedenen Arten taten das jeweils auf ihre eigene Weise. Manche bissen in derbe, harte Vegetation, andere wählten zartes, weicheres Futter, das sie vermutlich abbissen oder abstreiften. Solche Unterschiede erschlossen Forscher schon früher aus der Form der Zähne und winzigsten Abriebspuren daran, Rekonstruktionen der Kiefermuskulatur und Analysen der Biomechanik beim Öffnen und Schließen der Kiefer.

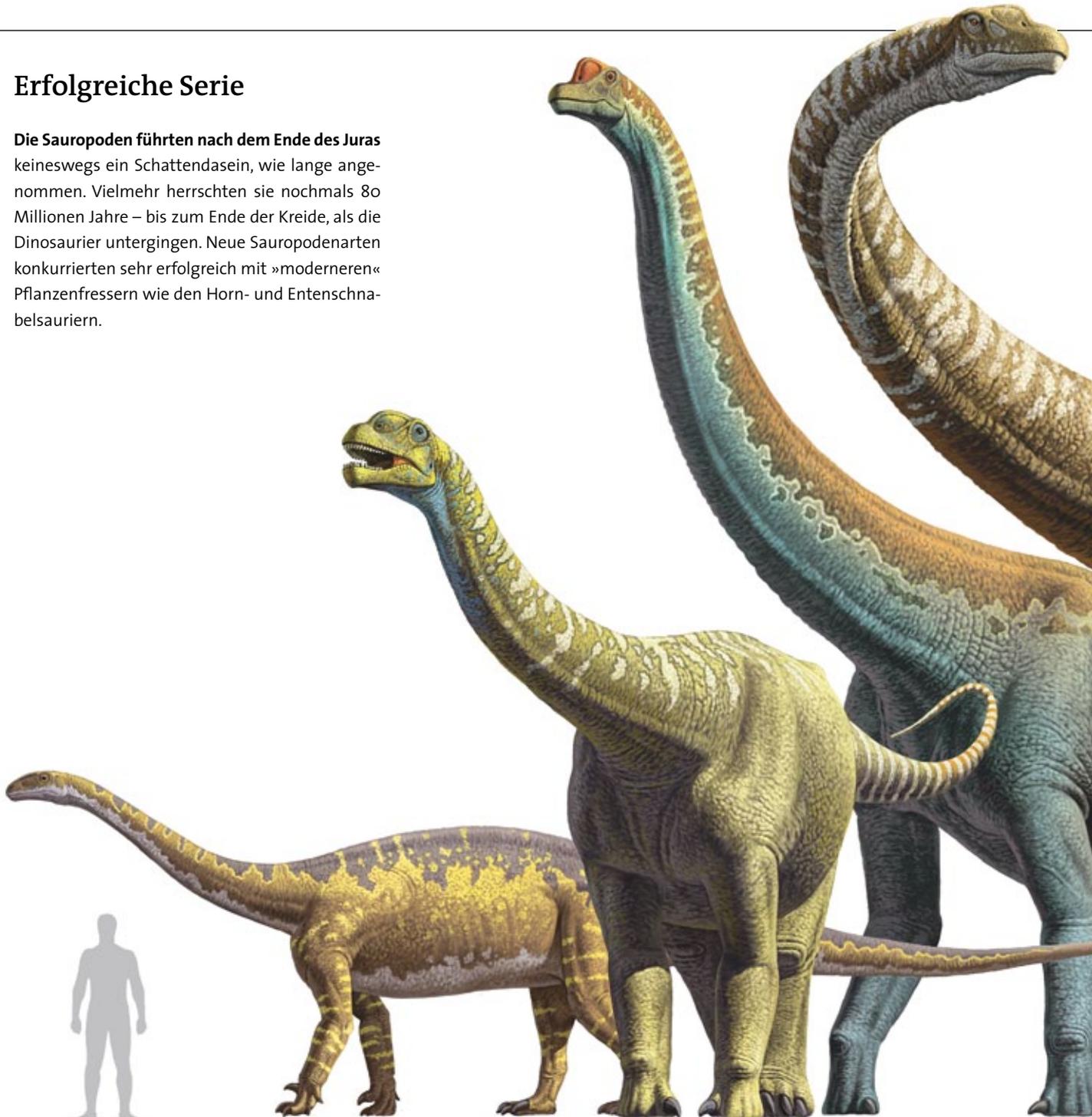
Die Sauropoden kauten ihre Nahrung kaum – darin sind sich die Forscher ziemlich einig. Somit wurde das Futter wohl erst im Magen-Darm-Trakt gründlich zerkleinert. Eine Zeit lang dominierte die Ansicht, dass die Tiere Magensteine – Gastrolithen – besaßen, die die Nahrung zermahlten, ähnlich wie bei Vögeln. Im Westen Nordamerikas finden sich oftmals glatt polierte Steine in Formationen mit ihren Fossilien. Dieser These widersprachen jedoch vor einigen Jahren Oliver Wings, heute am Museum für Naturkunde Berlin, und Martin Sander von der Universität Bonn. Die beiden Paläontologen hatten untersucht, wie sich Steine in Vogelmägen verändern und abbauen. Sie stellten fest, dass die vermeintlichen Sauropodengastrolithen nicht die charakteristische raue, unregelmäßige Oberfläche der Vogelmahlsteine aufweisen. Gegen die These spricht außerdem die Seltenheit solcher glatten Steine im Bauchraum der Skelette und die oft fragwürdige Zuordnung. Wings und Sander schlossen daraus, Sauropoden hätten die Nahrung mit Hilfe bakterieller Gärung aufgeschlossen, so wie heutzutage etwa Nashörner. Sie besaßen ja einen sehr langen Verdauungstrakt.

Und welche Bedeutung hatte ihr Markenzeichen, der lang gestreckte Hals, beim Fressen? Früher hieß es, damit hätten sie hoch in die Baumwipfel gereicht und sich so Ressourcen erschlossen, die für kleinere Tiere nicht erreichbar waren. Verschiedene Forschungen zeigen nun, dass diese Vorstellung zu pauschal ist. John Whitlock von der University of British Columbia in Vancouver hat Ernährungsstrategien von Diplodocoiden rekonstruiert. Diese lebten vom Spätjura bis zur Spätkreide, und zu ihnen zählen Giganten wie *Apatosaurus* (siehe Bild S. 34/35) und *Diplodocus*. Für seine Untersuchungen verglich er die Schnauzenformen und Abriebspuren an den Zähnen. Hiernach waren manche Arten Generalisten, die alle möglichen Sorten von Futter fraßen. Andere hatten sich auf bestimmte Pflanzen spezialisiert. Manche ästen niedrige Gewächse, andere bedienten sich an Bäumen. Den Studien anderer Forscher zufolge variierte bei den Sauropoden die Beweglichkeit des Halses. Nur einige von ihnen konnten hoch in die Bäume gelangen, andere dafür den Hals besonders gut weit nach unten biegen. All das dürfte erklären helfen, wieso sich die verschiedenen Arten in den gleichen Ökosystemen offenbar wenig Konkurrenz machten.

Gleichzeitig mit dem Aufstieg der Blütenpflanzen in der Kreidezeit entstanden bei den Sauropoden zahlreiche Anpassungen an diese neuartige Nahrung. Das passt nicht zu

Erfolgreiche Serie

Die Sauropoden führten nach dem Ende des Juras keineswegs ein Schattendasein, wie lange angenommen. Vielmehr herrschten sie nochmals 80 Millionen Jahre – bis zum Ende der Kreide, als die Dinosaurier untergingen. Neue Sauropodenarten konkurrierten sehr erfolgreich mit »moderneren« Pflanzenfressern wie den Horn- und Entenschnabelsauriern.



Mesozoikum

● *Antetonitrus*

● *Camarasaurus*

● *Giraffatitan*

TRIAS

Untertrias Mitteltrias Obertrias

Millionen Jahre vor heute

Forscher kennen heute 164 Gattungen der Sauropoden (schwarze Balken und farbige Kreise). Angegeben ist jeweils die Mitte ihrer Daseinsdauer. Das Bild zeigt die farbige markierten Gattungen.

235
Karnium

228
Norium

▲ älteste Dinosaurierfossilien

JURA

Unterjura

204
Rhaetium

201,6
Hettangium

197
Sinemurium

190
Pliensbachium

183
Toarcium

Mitteljura

176
Aalenium

172
Bajocium

168
Bathonium

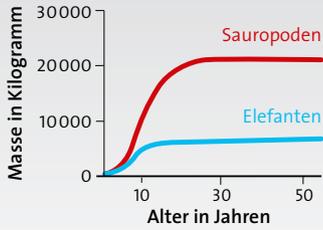
165
Callovium

161
Oxfordium

— Koexistenz von 6 Gattungen vor 193 Millionen Jahren

RASANTES WACHSTUM

Sauropoden wuchsen eher säugetierähnlich, viel schneller als Reptilien sonst. Schon nach wenigen Jahrzehnten erreichten sie ihre volle Größe.



EFFEKTIVE ATMUNG

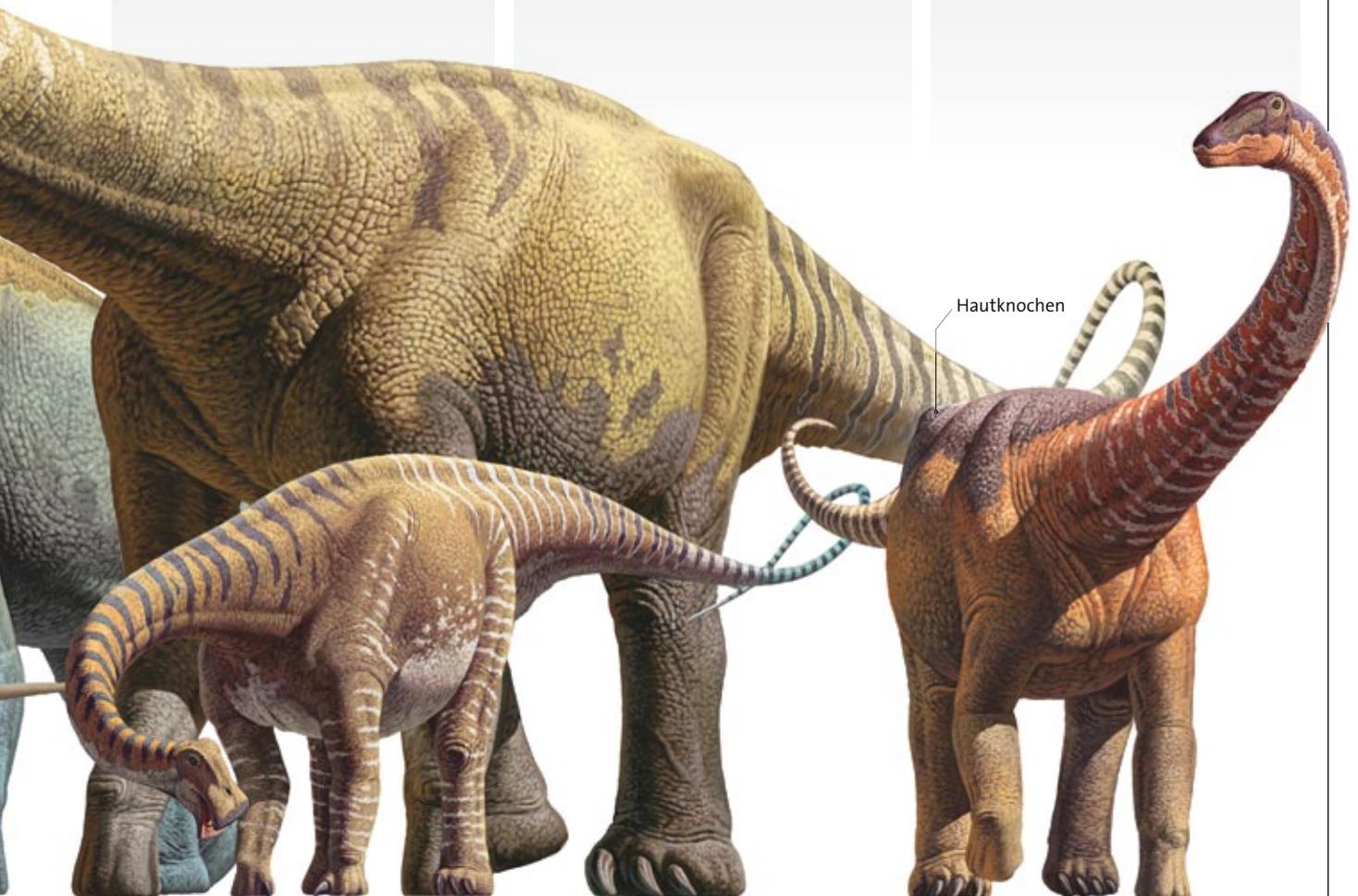
Hohle Wirbel machten die Tiere leichter. Womöglich bildeten die Lungen in sie hinein Luftsäcke ähnlich wie bei Vögeln – was die Sauerstoffversorgung der Giganten verbessert haben könnte.



KALZIUMRESERVEN

Manche Sauropoden trugen in der Haut dicke Knochenplatten, die in Notzeiten die Mineralversorgung sichergestellt haben mögen. Denn bei älteren Tieren sind diese Knochen hohl.

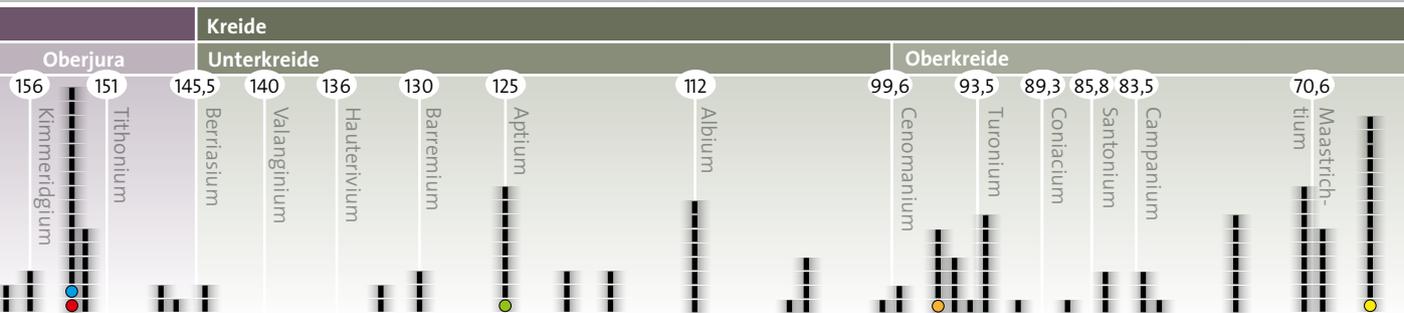
Hautknochen eines Titanosauriers im Anschnitt



● *Nigersaurus*

● *Argentinosaurus*

● *Rapetosaurus*



ILLUSTRATIONEN: RAÜL MARTIN; WIRBELDETAIL (OBEN MITTE) NACH: DANIELA SCHWARZ-WINGS, MUSEUM FÜR NATURKUNDE, BERLIN; GRAFIKEN: JEN CHRISTIANSEN; ZEITSKALA NACH: GEOLOGICAL SOCIETY OF AMERICA; WACHSTUMSKURVEN (OBEN LINKS) NACH: KRISTINA A. CURRY ROGERS UND MICHAEL D. D'EMIC

der alten Ansicht, dass sie in dieser Phase nur noch ein Schattendasein führten. Ihnen seien, glaubte man, nun andere Pflanzenfresser überlegen gewesen, die mit den frisch aufgetauchten Gewächsen angeblich viel besser zurechtkamen, etwa Entenschnabel- und Horndinosaurier. Diese waren mit immerfort nachwachsenden Zahnbatterien ausgestattet, die wie ein einziger mächtiger Zahn funktionierten. Was konnten ungeschlachte Viecher mit Riesenleibern, kleinen Köpfen und schwachen Gebissen dem schon entgegensetzen?

Nach neuerer Erkenntnis traten die Sauropoden jedoch in der Kreide vielfältiger auf als je zuvor, was diesen Evolutionsabschnitt für die Forschung besonders interessant macht. Die Gruppe entwickelte sich jetzt in sehr verschiedene Richtungen mitsamt neuen körperlichen Erscheinungen. Sie fand auch diverse Wege, eine breite Palette von Pflanzen zu erschließen. *Nigersaurus* beispielsweise, der vor 115 Millionen Jahren lebte, gehörte zu den schon erwähnten Rebbachisauriden (siehe Bild S. 38/39, Mitte). Paul Sereno von der University of Chicago und seine Kollegen entdeckten die Fossilien in den späten 1990er Jahren im Niger. Das Tier besaß ein breites, kastenförmiges Gebiss mit vorn quer zum Kiefer stehenden Zahnbatterien, die sich monatlich erneuerten – bis zu doppelt so schnell wie bei Horn- und Entenschnabelsauriern. Es benötigte wohl stets frische, scharfe Zähne, um unten am Boden Pflanzen abzubeißen. Denn nach der Ausrichtung des Gleichgewichtsorgans im Innenohr zu urteilen, richtete es seine Schnauze gewöhnlich nach unten. Andere Sauropoden hielten den Kopf meist eher waagrecht.

Inwiefern die Zunahme von Blütenpflanzen während der Kreidezeit den Speiseplan dieser Saurier bereicherte, zeigen mikroskopische Studien an Koprolithen – fossilen Kotballen. Silikathaltige so genannte Phytolithen darin stammen von gegessenen Pflanzen. In Kotfossilien von Titanosauriern entdeckten Vandana Prasad vom Birbal-Sahni-Institut für

Paläobotanik in Lucknow in Nordindien und ihre Kollegen Spuren von mindestens fünf Grassorten, aber auch welche etwa von Magnolien, Nadelhölzern und Palmen, wie sie 2005 berichteten. Das bedeutet nicht nur, dass manche Sauropoden eine Vielzahl von Pflanzen vertilgten, sondern auch, dass es moderne Gräser 30 Millionen Jahre früher gab als bisher gedacht. Wie für alle Pflanzenfresser, die schnell wachsen müssen, lohnte es sich auch für diese, nicht wählerisch zu sein. Sie stürzten sich also geradezu auf die neuartige Vegetation, und viele von ihnen stopften in sich hinein, was immer sie fanden oder erreichen konnten.

Hohle Knochen – auch im Dienst der Atmung

Die Atmung der Sauropoden funktionierte wahrscheinlich weder wie bei Reptilien noch wie bei Säugetieren. Die Forscher vermuten, dass sie vielmehr ähnlich wie Vögel atmeten. Bei Säugetieren vermischt sich die frische eingeatmete Luft mit der verbrauchten in der Lunge. Vögel aber haben von der Lunge abzweigende Luftsäcke, die es erlauben, dass stets frische Luft wie auf Einbahnstraßen nachfließt und von der Lunge besser ausgenutzt wird. Die Luftsäcke dringen auch in Hohlräume von Knochen vor, etwa von Wirbeln. Ganz ähnlich wie diese sehen innere und äußere Höhlungen und versteifende Strukturen in Sauropodenwirbeln aus. Die stärksten Aussparungen finden sich in den Wirbeln von Hals und oberem Rumpf. Manche Arten wiesen aber auch welche an den Hüft- und sogar an den Schwanzwirbeln auf.

Sicherlich war die Hauptfunktion davon eine beträchtliche Gewichtseinsparung, die ja auch bei Vögeln eine Rolle spielt. Die riesigen Halswirbel des nordamerikanischen Kolosses *Sauroposeidon* etwa waren zu über drei Viertel luftgefüllt. Zugleich könnten die Hohlstrukturen aber einem Luftsacksystem gedient haben, dank dessen die Sauropoden



Mitunter finden sich bei Gelegen von Sauropoden Schlangenfossilien. In dem in der Illustration nacherzählten Fall maß die Nesträuberin über drei Meter. Jeffrey Wilson von der University of Michigan in Ann Arbor und Kollegen entdeckten die Versteinerungen 1984 in Indien.



MEHR WISSEN BEI
Spektrum.de



Unser Online-Dossier »Saurier«
finden Sie unter

www.spektrum.de/saurier

effektiver atmeten. Womöglich verhalf ihnen das zu einem gleichmäßigen erhöhten Stoffwechsel und zu mehr Aktivität, was dem raschen, starken Wachstum zugutegekommen sein mag.

Tiere dieser Größe hatten von Raubfeinden wohl nichts mehr zu befürchten, nicht einmal vom zwölf Meter langen *Allosaurus*. Schon halbwüchsig hätten viele Sauropoden auf ausgewachsene Elefanten herabgeblickt. Die Kehrseite war aber, dass so ein Riese Zeiten von Nahrungs- oder Wasserknappheit umso empfindlicher zu spüren bekam. Es könnte jedoch sein, dass sogar in diesem Fall spezielle Anpassungen gegen Engpässe halfen.

Ein paar Titanosauriern wuchsen in der Haut bizarre Knochenplatten, so genannte Osteoderme. Ähnliches gibt es auch heute, man denke nur an die Knochenpanzer von Krokodilen oder Gürteltieren. Bei den Dinosauriern kam dergleichen gar nicht selten vor. *Stegosaurus* beispielweise beeindruckt wegen der riesigen, breiten »Dornen«, die seinen hochgekrümmten Rücken verzierten. Doch wo genau die Hautknochen bei Sauropoden saßen und was sie bedeuteten, war bisher ein Rätsel.

Wir selbst haben kürzlich zwei große Knochenplatten untersucht, die auf Madagaskar bei zwei Titanosaurierskeletten gefunden worden waren, einem jugendlichen und einem erwachsenen *Rapetosaurus*. Die vom großen Tier ist 57 Zentimeter lang, gut 27 Zentimeter dick und hat ein Volumen von fast zehn Litern – der massivste bisher aufgetauchte Osteoderm eines Wirbeltiers. Analysen von Computertomogrammen und Bohrkernen dieser Fossilien ergaben, dass die innere Knochensubstanz im Lauf des Lebens zu einem beträchtlichen Teil verschwand. Vermutlich wurde sie durch Weichgewebe ersetzt. Bei dem großen Exemplar machte das fünf Liter aus, über die Hälfte des ursprünglichen Knochengewebes.

Schutzschilde können das kaum gewesen sein – sie wären bei einem starken Aufprall oder kräftigen Biss zerbrochen. Außerdem besaß ein *Rapetosaurus*, wohl ebenfalls wie einige andere Titanosaurier, nur wenige solche Knochenplatten. Auch zur Wärmeregulation, wie für manche Fälle diskutiert – etwa *Stegosaurus* –, konnten sie nicht gedient haben, denn dazu passen weder das geringe Oberflächen-Volumen-Verhältnis noch die spärliche Anzahl. Wir glauben vielmehr, dass sie Mineralspeicher darstellten. Dank ihrer konnten Titanosaurier selbst in unwirtlichen Zeiten weiterwachsen und Eier legen. Ähnliches gewähren Osteoderme bei einigen heutigen Tieren.

Bei allen Wirbeltieren werden bei Bedarf Knochenminerale eingesetzt, um den Blutkalziumspiegel aufrechtzuerhalten. In manchen Zeiten kann der Abbau steigen, etwa zur Eiablage oder bei Nahrungsmangel. Er nimmt auch mit dem Lebensalter zu, was beim Menschen zu Osteoporose führen kann. Weil Hautknochenplatten stark durchblutet sind, eignen sie sich gut dazu, Mineralnachschieb zu liefern. Für die Titanosaurier Madagaskars in der Spätkreide, aber auch andernorts wäre diese Funktion sehr gut vorstellbar. Die Insel erlebte damals wiederholt heftige Dürrephasen. Raubsaurier wie der sieben Meter lange *Majungasaurus* wurden zu Kannibalen, und unzählige Tierarten gingen unter – darunter Frösche, Vögel und sogar einige Sauropoden.

Mit ihrer Größe und ihrer Wachstumsgeschwindigkeit stießen die Elefantenfußdinosaurier offenbar an die Grenze des biologisch Möglichen. Aber sie landeten mit all ihrer Extravaganz nicht etwa in einer evolutionären Sackgasse, sondern blieben 150 Millionen Jahre lang äußerst erfolgreich. ~

DIE AUTOREN



Kristina A. Curry Rogers und **Michael D. D'Emic** sind Wirbeltierpaläontologen. Curry Rogers arbeitet am Macalester College in St. Paul (Minnesota). Sie erforscht Leben und Evolution von Sauropoden und hat deren Fossilien in verschiedensten

Weltgegenden aufgespürt, unter anderem in Argentinien und Simbabwe. D'Emic arbeitet an der Georgia Southern University in Statesboro. Sein Schwerpunkt sind frühkreidezeitliche Sauropoden von Montana und Wyoming. Besonders interessieren ihn die Titanosaurier.

QUELLEN

Curry Rogers, K. A., Wilson, J. A.: The Sauropods: Evolution and Paleobiology. University of California Press, Berkeley 2005

Curry Rogers, K. A. et al.: Sauropod Dinosaur Osteoderms from the Late Cretaceous of Madagascar. In: Nature Communications 2, 564, 2011

Sander, P. M. et al.: Biology of the Sauropod Dinosaurs: the Evolution of Gigantism. In: Biological Reviews 86, S. 117–155, 2011

Whitlock, J. A.: Inferences of Diplodocoid (Sauropoda: Dinosauria) Feeding Behavior from Snout Shape and Microwear Analyses. In: PLoS One 6, e18304, 2011

Wings, O., Sander, P. M.: No Gastric Mill in Sauropod Dinosaurs: New Evidence From Analysis of Gastrolith Mass and Function in Ostriches. In: Proceedings of the Royal Society of London B 274, S. 635–640, 2007

LITERATURTIPPS

Saurier und Urvögel. Spektrum der Wissenschaft, Digest 5/1997
Tiere der Urzeit. Spektrum der Wissenschaft, Dossier 1/2005
Sonderhefte von »Spektrum der Wissenschaft« unter anderem über verschiedene Fragen zu Dinosauriern

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1165731

Das geheimnisvolle Innenleben der Zellen

Unter dem Mikroskop gibt es noch ungeahnt viel zu entdecken: In jüngster Zeit stießen Biologen auf eine Vielfalt neuer, faszinierender Strukturen – die offenbar ganz unterschiedliche Aufgaben erfüllen.

Von Roberta Kwok

Vor vier Jahren stand Chalongrat Noree vor einer zunächst abschreckend wirkenden Aufgabe: Hunderte von Hefekulturen detailliert unter dem Mikroskop zu untersuchen. In jeder war ein anderes Protein mit Fluoreszenzfarbstoffen markiert. So hoffte der Doktorand an der University of California in San Diego neue Strukturen im Inneren der Zellen zu entdecken.

Und in der Tat zeigten sich schon bald erste Ergebnisse: Binnen eines Monats fand Noree eine große Zahl verschiedener Proteine, die sich jeweils zu Aggregaten oder langen Strängen zusammenlagern. »Stellen Sie sich vor, Sie stoßen jede Woche auf eine bislang unbekannte intrazelluläre Struktur«, beschreibt der Zellbiologe Jim Wilhelm, Norees Doktorvater, die Situation. »Es war wie ein Glücksspielautomat, der jedes Mal Geld ausspuckt, wenn man den Hebel zieht.«

Damit wirken die üblichen Darstellungen der Zelle, auf denen in erster Linie Kern, Mitochondrien, Ribosomen und Golgiapparat zu sehen sind (siehe Bild rechts), zunehmend überholt. Neue Techniken und ein bisschen Glück brachten eine komplexe Welt von Schläuchen, Säckchen, Klümpchen, Fäden und Kapseln zum Vorschein. Zwar stellten sich einige dieser Gebilde schlussendlich als bereits seit Jahrzehnten be-

kannt heraus, doch viele wurden tatsächlich erst vor Kurzem entdeckt. Zum Beispiel fand Wilhelms Team sechs verschiedene Typen von Filamenten, die zuvor nicht beschrieben oder zumindest kaum beachtet worden waren.

Rätselhafte Verbindungsleitungen

Zu den Strukturen, die Forscher jetzt wieder vermehrt beachten, gehören die so genannten Nanotubes: zwischen den Zellen aufgespannte Röhrchen aus Zellmembranen. Im Jahr 2000 probierte Amin Rustom, damals Doktorand an der Universität Heidelberg, einen neuen Farbstoff für die Betrachtung von Tumorzellen aus Ratten unter dem Mikroskop aus. Dabei ließ er einige der üblichen Waschprozeduren weg – mit einem überraschenden Resultat. »Er sagte: ›Ich sehe da was. Keine Ahnung, was es ist, aber es sieht interessant aus‹«, erinnert sich sein Doktorvater, der Zellbiologe Hans-Hermann Gerdes, der heute an der norwegischen Universität Bergen arbeitet. Die von Rustom entdeckten Röhrchen waren derart pfeilgerade, dass Gerdes sich anfangs fragte, ob es sich nicht schlicht um Kratzer auf der Zellkulturschale handelte.

Letztlich kam das Team 2004 aber zu dem Schluss, dass es sich bei den beobachteten Strukturen, die so lang werden können wie mehrere Zellen, tatsächlich um Kanäle handle. Sie könnten beispielsweise kleine Organellen von einer Zelle zur anderen transportieren. Im gleichen Jahr äußerte eine Arbeitsgruppe um den Immunologen Daniel Davis am Imperial College in London die Vermutung, Immunzellen würden auf solchem Weg Signale austauschen. Davis erzählt: »Es gab unter den Zuhörern unserer Vorträge stets einige, die sagten, sie hätten diese Fäden schon in den siebziger oder achtziger Jahren gesehen.« Doch niemand hatte damals den seltsamen Röhrchen größere Aufmerksamkeit geschenkt.

Weitere Studien entdeckten Nanotubes in vielen anderen Zelltypen von Säugetieren. Davis' Arbeitsgruppe fand heraus, dass Leukozyten sie nutzen, um Krebszellen zu vernichten: entweder um diese wie mit einem Fangseil zu sich heranzuziehen oder um darüber todbringende Signale zu übertragen.

AUF EINEN BLICK

ZELLFABRIKEN UND PROTEINSCHLANGEN

1 In den letzten Jahren fanden Forscher eine ganze Reihe bislang unbekannter oder zumindest unbeachteter **Strukturen innerhalb von Zellen**. Ihre Aufgaben sind teilweise noch unklar.

2 **Nanotubes** verbinden Zellen untereinander und könnten zum Transport von Stoffen oder Signalen dienen. **Molekulare Fabriken** in Form zusammengeballter Enzyme und Mikrokompartimente spielen wohl eine wichtige Rolle im Stoffwechsel der Zelle.

3 **Exosomen** hoffen Forscher zum gezielten Transport von therapeutischen Wirkstoffen einsetzen zu können. Schließlich entdeckten Wissenschaftler in Zellen auch riesige **Proteinfäden** aus Tausenden von Enzymen des gleichen Typs.

Einer Untersuchung von Gerdes und seinen Kollegen aus dem Jahr 2010 zufolge leiten die Membranröhrchen auch elektrische Impulse. Auf diese Weise könnten sich Zellen untereinander koordinieren, etwa wenn sie zu ihrem Bestimmungsort wandern oder bei der Wundheilung. Selbst Viren wie HIV oder Prionen – falsch gefaltete infektiöse Proteine – könnten sich auf diese Weise ausbreiten.

Manche Forscher bezweifeln allerdings, dass es sich bei Nanotubes tatsächlich um Kanäle handelt. »Es ist nicht eindeutig bewiesen, dass sie eine durchgängige Röhre bilden«, meint etwa Jennifer Lippincott-Schwartz, Zellbiologin an den National Institutes of Health in Bethesda. Zudem wurden die Strukturen bisher hauptsächlich in Zellkulturen untersucht. Es wäre aufschlussreich, ihre Entstehung in lebenden Organismen experimentell zu blockieren, erklärt Davis. Das Problem: Oft stören solche Manipulationen darüber hinaus lebenswichtige Vorgänge in den Zellen.

Miniaturfabriken im Zytoplasma

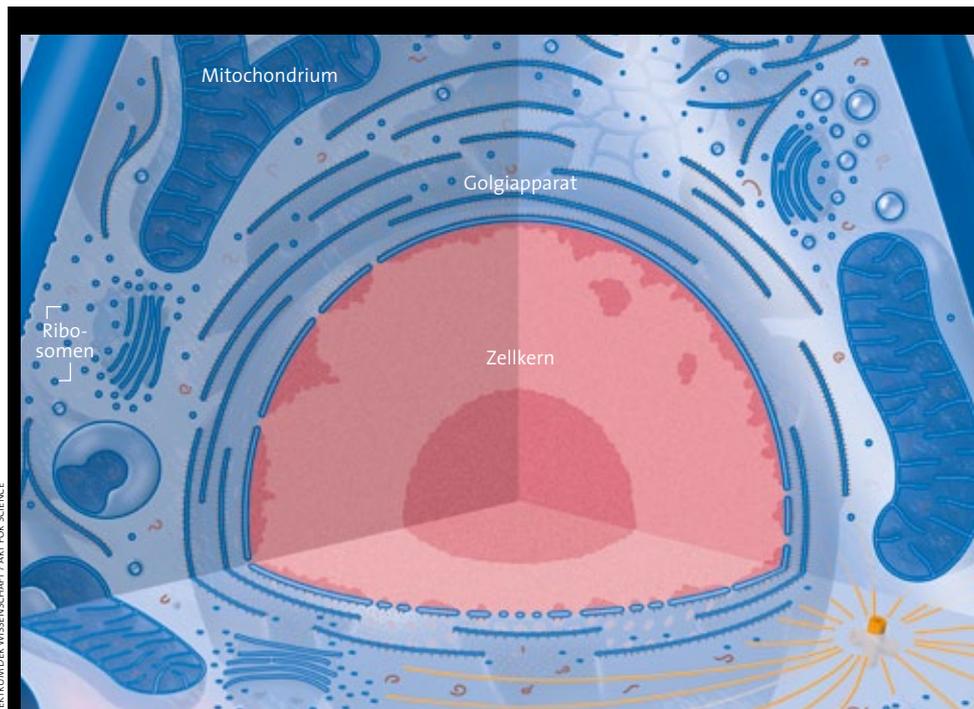
Andere Zellstrukturen könnten dafür sorgen, dass Stoffwechselforgänge effizienter ablaufen. Denn: Befänden sich die beteiligten Proteine nicht sehr nahe beieinander, würden Zwischenprodukte in dem »unglaublichen Wirrwarr von Enzymen im Zellinneren vermutlich verloren gehen«, glaubt der Biochemiker Stephen Benkovic von der Pennsylvania State University. Dass sich Proteine oft zu Aggregaten anordnen, um bestimmte Aufgaben zu erfüllen, wissen Forscher schon länger. So ist zum Beispiel ein großer Enzymkomplex für das Kopieren von DNA zuständig.

Doch Benkovic und andere Wissenschaftler spekulieren, dass sich auch Stoffwechsellzyme in einer Art vielstufiger Fließbandproduktion zusammenfinden, in der möglicher-

weise instabile Moleküle sicher von einem Zwischenschritt zum nächsten gelangen. Tatsächlich fand Benkovic's Arbeitsgruppe Hinweise auf eine solche Stoffwechselfabrik, die einen Vorläufer von Purinnukleotiden synthetisiert – das sind wichtige Bestandteile der DNA und RNA. Das Team markierte jedes einzelne der beteiligten Enzyme mit einem Fluoreszenzfarbstoff und beobachtete ihr Verhalten in lebenden Zellen unter dem Mikroskop. Bei Purinmangel in den Zellen lagerten sich die Einzelproteine zu Komplexen zusammen. Diese »Purinosomen« sind in einem dichten Geflecht aus Proteinfasern eingebettet: den Mikrotubuli. Ihre Produkte lassen sich in den zellulären Energieträger Adenosintriphosphat umwandeln. Daher spekuliert Benkovic, dass die Minifabriken Energie bereitstellen, die für den Transport von Organellen und Materialien innerhalb der Zelle entlang der Mikrotubuli gebraucht wird.

Edward Marcotte, ein Systembiologe an der University of Texas in Austin, mahnt jedoch zur Vorsicht beim Interpretieren solcher Beobachtungen. Gemeinsam mit Kollegen fand er 180 verschiedene Typen von Proteinaggregaten in Hefezellen, die zuvor unter nährstoffarmen Bedingungen gewachsen waren. Es sei jedoch unklar, sagt Marcotte, ob diese Cluster einen Zweck erfüllen – etwa indem sie die Stoffwechseffizienz steigern oder als Vorratslager dienen – oder ob sie lediglich auf Fehlfunktionen wegen der schlechten Versorgung zurückzuführen sind.

Einige Wissenschaftler untersuchen wiederum so genannte Mikrokompimente bei Bakterien. Diese polyederförmigen Proteinkapseln sind bereits seit rund 50 Jahren bekannt und ähneln den Hüllen einfach gebauter Viren. Doch während Letztere genetisches Material enthalten, befinden sich in den Mikrokompimenten Enzyme, die wichtige biochemi-



UNVOLLSTÄNDIGES BILD
Eine typische Lehrbuchzeichnung des Zellinneren zeigt neben dem Kern (im Bild rot) verschiedene Organellen wie Mitochondrien, Golgiapparat und Ribosomen. Doch inzwischen haben Biologen darüber hinaus noch viele weitere intrazelluläre Strukturen entdeckt – und laufend werden es mehr.

SPEKTRUM/DER WISSENSCHAFT / ART FOR SCIENCE

sche Reaktionen durchführen. Beispielsweise wandeln sie in so genannten Carboxysomen Kohlendioxid in Kohlenstoffverbindungen um, die für die Zelle nutzbar sind. Die Proteinkapseln könnten verschiedene Aufgaben erfüllen: die Effizienz der Reaktionen steigern, schädliche Zwischenprodukte vom Rest der Zelle isolieren und die Enzyme vor Substanzen schützen, die ihre Arbeit beeinträchtigen.

Im Jahr 2005 klärten Proteinkristallografen die Detailstruktur der Kapseln auf. Todd Yeates von der University of California in Los Angeles fand gemeinsam mit Kollegen heraus, dass sich einige der beteiligten Kapselproteine zu den flachen sechseckigen Wänden des Containers zusammenlagern. Jede dieser »Kacheln« weist in der Mitte eine Öffnung auf, durch die kleinere Moleküle hindurchschlüpfen können.

Mikrokompartimente lagern sich darüber hinaus auch in Reihen aneinander. Pamela Silver, Professorin für synthetische Biologie an der Harvard Medical School in Boston, berichtete gemeinsam mit Kollegen 2010, dass die Carboxysomen bei Zyanobakterien annähernd gleichmäßig entlang einer Linie durch die lang gestreckte Zelle angeordnet sind. Dadurch erhält bei der Teilung jede der Tochterzellen etwa gleich viele Carboxysomen.

Einige Biologen versuchen nun, Mikrokompartimente für industrielle Zwecke zu nutzen, indem sie verschiedene Enzyme hineinpacken. Zum Beispiel planen Yeates und sein Team,

Biokraftstoffe in den Containern herzustellen. Anderen Forschern gelang es bereits, fluoreszenzmarkierte Enzyme aus anderen Organismen in die Kapseln zu bringen. Es ist also offenbar möglich, den Inhalt der Enzymbehälter zu verändern.

Noch sind Mikrokompartimente ein wenig erkundetes Forschungsgebiet. So wissen die Forscher kaum etwas darüber, wie die Enzyme im Inneren der Kapseln angeordnet sind, sagt Chery Kerfeld, Strukturbiologin am kalifornischen Lawrence Berkeley National Laboratory. »Wir haben keine Ahnung, wie es da drinnen aussieht.«

Transportkapseln – nicht Müllsäcke!

Auch Exosomen ziehen inzwischen vermehrt die Aufmerksamkeit der Forscher auf sich. Zellen bilden diese kleinen, membranumhüllten Bläschen in ihrem Inneren und spucken sie dann aus. Entdeckt wurden sie bereits in den 1980er Jahren, blieben dann aber für rund ein Jahrzehnt völlig unbeachtet – weil die Forscher sie lediglich für eine Art zellulärer Müllsack hielten. Das Interesse daran nahm 1996 schlagartig zu, als die Zellbiologin Graça Raposo und ihre Mitarbeiter vom Institut Curie und dem Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) in Paris Exosomen untersuchten, die von B-Zellen – bestimmten Immunzellen – stammten. Das Team arbeitete mit dem Elektronenmikroskop, das damals nicht besonders beliebt war, »einfach weil es als altmodisch galt«, sagt Raposo. Doch unter anderem mit dieser althergebrachten Technik gelang es ihr nachzuweisen, dass die unscheinbaren Membranbläschen durchaus eine wichtige Aufgabe erfüllen: Sie präsentieren an ihrer Oberfläche Proteinbruchstücke von Krankheitserregern und regen dadurch Immunzellen zu Abwehrreaktionen an.

2007 machte eine Entdeckung des Teams um den Allergologen Jan Lötvall von der Universität Göteborg in Schweden die Sache noch spannender. Die Forscher berichteten, dass Exosomen Boten-RNA transportieren. Andere Zellen nehmen diese auf und nutzen sie als Bauanleitung für die Syn-

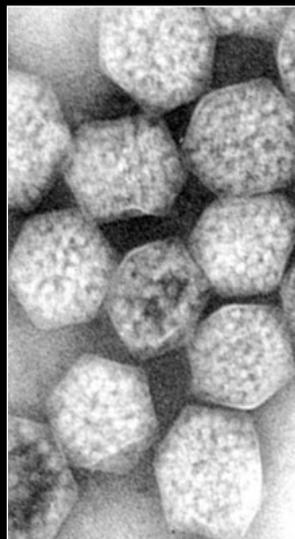
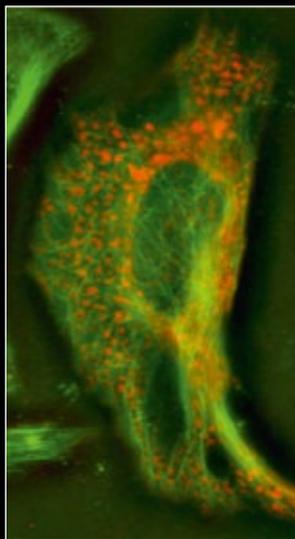
W I S wissenschaft
in die schulen!



Didaktische Materialien für den Unterricht zum Thema
»Zellen« kostenfrei heruntergeladen unter:

www.wissenschaft-schulen.de/zellen

INNS, RUSTOM, A. ET AL. NANOTUBULAR HIGHWAY FOR INTERCELLULAR ORGANELLAR TRANSPORT. IN: SCIENCE 309, S. 1037-1041, 2010. FIG. 1B. MITTEL: GEN. VON J. HANSEN, HERMANN, GEDDES, DUNSCHE, CENIC, HANCT, T. VON MITTE. AN, S. ET AL. MICROTUBULE-ASSISTED MECHANISM FOR FUNCTIONAL METABOLIC MACROMOLECULAR COMPLEX FORMATION. IN: PNAS 107, S. 18872-18878, 2010. FIG. 3C. MIT FRDL. GEN. VON STEPHEN J. BEKOVIC, ABRILCK MIT FRDL. GEN. VON PNAS PERMISSIONS; RECHTS: TANAKA, S. ET AL. ATOMIC-LEVEL MODELS OF THE BACTERIAL CARBOXYSONE SHELL. IN: SCIENCE 319, S. 1083-1086, 2008. FIG. 1B. MIT FRDL. GEN. VON TODD O. YEATES; ABRILCK GENEHMIGT VON AAAS / C/C



KOMMUNIKATIONSKANÄLE

Nanotubes sind dünne, membranumhüllte Röhren, die sich zwischen verschiedenen Zellen erstrecken. Eventuell übertragen sie Signale (links).

ZELLFABRIKEN

Manche Stoffwechsellzyme bilden Aggregate (im Bild rot), möglicherweise um so effizienter zu arbeiten (Mitte).

MIKROKOMPARTIMENTE

In regelmäßig aufgebauten, abgetrennten Räumen können biochemische Reaktionen weitgehend isoliert vom restlichen Zellmilieu ablaufen (rechts).



ZELLSCHLANGEN

Manche Enzyme bilden lange Filamente. Diese können als Gerüststrukturen dienen, aber auch zur Regulation biochemischer Reaktionen im großen Maßstab.

these von Proteinen. Die vermeintlichen Müllbeutel übermitteln demnach wichtige Informationen zwischen Zellen.

Nun möchten Wissenschaftler die Exosomen nutzen, um therapeutische Wirkstoffe gezielt an bestimmte Stellen des Körpers zu transportieren. Sie hoffen, dass die natürlich gebildeten Partikel seltener toxisch wirken oder eine Immunreaktion auslösen als andere Vehikel, etwa künstliche Lipidbläschen und Proteinhüllen. Letztes Jahr berichtete der Neurowissenschaftler Matthew Wood von der englischen University of Oxford zusammen mit Kollegen über einen erfolgreichen Versuch mit Mäusen: Die Forscher stellten Exosomen her, die mit Hilfe eines künstlich eingeführten Moleküls auf ihrer Oberfläche speziell an Nervenzellen andocken. Diese Vehikel beluden sie mit RNA, die in den Zielzellen die Produktion des Enzyms Beta-Sekretase hemmen sollte, das an der Entstehung der Alzheimerdemenz beteiligt ist. Tatsächlich lieferten die Partikel ihre RNA-Fracht wie geplant bei den Neuronen ab und bremsten dort die Synthese des Proteins ohne erkennbare schädliche Effekte. Andere Forscher versuchen, Exosomen aus Körperflüssigkeiten zu isolieren und ihren Inhalt zu analysieren, um so Krebserkrankungen zu diagnostizieren – oder aber mit Hilfe der Membransäckchen Immunreaktionen gegen Tumoren auszulösen.

Proteinfäden als Regulationsmittel

Mehrere Forschergruppen entdeckten inzwischen auch riesige Proteinfäden, die aus Hunderten oder gar Tausenden von Enzymmolekülen bestehen und manchmal die gesamte Zelle durchspannen. So identifizierte das eingangs erwähnte Team um Jim Wilhelm unter anderem die CTP-Synthase, die einen wichtigen Baustein für DNA und RNA liefert, als solches filamentbildendes Enzym in Hefe. Zwei andere Arbeitsgruppen fanden ungefähr gleichzeitig CTP-Synthase-Filamente bei Tauflieden und Bakterien. Einer der beteiligten Forscher, der Zellbiologe Ji-Long Liu von der University of Oxford, bezeichnete sie als Cytoophidia (»Zellschlangen«) – wegen ihrer schlangenförmigen Gestalt in Taufliedenzellen. Wilhelm vermutet, dass andere Wissenschaftler dieselben

Filamente bereits in den 1980er Jahren entdeckten, aber das Protein, aus dem sie bestehen, nicht identifizierten.

Solche Proteinaggregate könnten Zellen erlauben, große Mengen eines Enzyms schlagartig an- und auszuschalten, spekuliert Wilhelm. Falls etwa die Moleküle innerhalb eines Filaments inaktiv wären, könnte die Zelle sie aktivieren, indem sie einfach den ganzen Strang auflöst.

Bei einigen Bakterien erfüllen derartige Fäden anscheinend auch strukturelle Aufgaben, wie sie die Aktinfilamente als Teil des Zytoskeletts in komplexeren Zellen übernehmen. Wie Zemer Gitai und seine Kollegen von der Princeton University in New Jersey herausfanden, kontrollieren CTP-Synthase-Filamente das Ausmaß der Krümmung des kommaförmigen Bakteriums *Caulobacter crescentus*. Zellen mit zu wenig CTP-Synthetase rollen sich eng zusammen, während solche, in denen ein Überschuss herrscht, eine lang gestreckte Form annehmen. Das lässt darauf schließen, dass *C. crescentus* die Enzymfilamente dazu nutzt, die korrekte Gestalt zu erhalten. Allerdings ist noch unklar, welche Bedeutung die gebogene Form für das Bakterium hat.

Einige Wissenschaftler vermuten inzwischen, dass Aktin dem Enzym Glukokinase ähnelt, das eine wichtige Rolle bei der biologischen Energiegewinnung durch Abbau von Traubenzucker spielt. Sollte dies zutreffen, könnte das Zellskelett aus Filamenten entstanden sein, die ursprünglich den Stoffwechsel regulierten, erklärt Gitai.

Obwohl die Aufgaben dieser vielfältigen, faszinierenden Strukturen noch nicht alle bekannt sind, ist es also nach wie vor ein spannendes und lohnendes Unterfangen, Zellen und ihren inneren Aufbau genauer zu untersuchen. ~

DIE AUTORIN



Roberta Kwok ist freie Journalistin und lebt in Burlingame, Kalifornien.

QUELLEN

Alvarez-Erviti, L. et al.: Delivery of siRNA to the Mouse Brain by Systemic Injection of Targeted Exosomes. In: Nature Biotechnology 29, S. 341–345, 2011

Noree, C. et al.: Identification of Novel Filament-Forming Proteins in *Saccharomyces Cerevisiae* and *Drosophila Melanogaster*. In: Journal Cell Biology 190, S. 541–551, 2010

Rustom, A. et al.: Nanotubular Highways for Intercellular Organelle Transport. In: Science 303, S. 1007–1010, 2004

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1159806

Warten auf die Katastrophe

Forscher haben veränderte Vogelgrippeviren erzeugt, die sich von Mensch zu Mensch verbreiten könnten. Nun debattieren Experten über die Freiheit und Verantwortung der Wissenschaft.

Von Fred Guterl

Im Frühjahr 1983 brach auf Geflügelfarmen im Osten Pennsylvanias die Vogelgrippe aus. Tiermediziner hatten das verursachende Virus zunächst als relativ harmlos eingestuft, doch während der Erreger sich in den Zuchtbetrieben ausbreitete, entstand ein neuer Virusstamm. Zahlreiche Tiere starben daran, und die Farmer begannen, um ihre Existenz zu bangen. In ihrer Not bat die Regierung Pennsylvanias das US-Landwirtschaftsministerium um Hilfe, worauf die Behörde Experten entsendete, die in einer Einkaufsmeile außerhalb der Stadt Lancaster eine Zentrale einrichteten. Um die Epidemie einzudämmen, ließ das Ministerium in den Gegenden von Pennsylvania bis Virginia insgesamt 17 Millionen Vögel töten.

Zu dieser Zeit traf Yishihiro Kawaoka, ein junger Wissenschaftler aus Japan, in den USA ein und begann am St. Jude Childrens Research Hospital in Memphis zu forschen. Sein Chef, der Virologe Robert Webster, vermutete, dass menschliche Grippeerreger aus Vogelviren entstehen. Seiner These zufolge kursieren die Vorläuferviren unter Enten und Gänsen, ohne für uns gefährlich zu sein – bis irgendwann ein Stamm aus ihnen entsteht, der sich in den oberen Atemwe-

gen des Menschen vermehren kann. Webster meinte, man müsse erst die Vogelgrippe besser verstehen, bevor man die Influenza beim Menschen effektiver bekämpfen könne. Als er im November 1983 erfuhr, dass die Geflügelseuche in Pennsylvania bedrohliche Dimensionen annahm, ließ er alles stehen und liegen und eilte ins Zentrum der Epidemie.

Kawaoka blieb derweil in Memphis, um Proben zu untersuchen, die er aus dem Seuchengebiet erhalten hatte. Er extrahierte daraus die Viren und züchtete sie im Labor. Dann infizierte er damit gesunde Hühner und wartete ab, was passieren würde. Das schockierende Ergebnis: Sämtliche infizierten Tiere starben – eine Mortalitätsrate von hundert Prozent. Als Kawaoka die verendeten Tiere untersuchte, stellte er fest, dass der Erreger beinahe alle Organe angegriffen hatte, ähnlich wie es manche Stämme des Ebolavirus beim Menschen tun.

Warum waren die Viren noch im April 1983 harmlos gewesen und hatten sich bis zum November in Killer verwandelt? Bei einem genauen Vergleich entdeckte Kawaoka, dass zwischen den Stämmen vom April und November nur minimale Unterschiede bestanden. »Tatsächlich war die neue, brandgefährliche Virusvariante infolge einer einzigen Mutation entstanden«, erinnert er sich heute. »Das bedeutet, dass hochpathogene Influenzaviren jederzeit unvermittelt auftauchen können.«

Kawaoka erkannte: Die Wissenschaftler mussten dringend mehr darüber herausfinden, unter welchen Umständen die Vogelgrippe für Menschen gefährlich werden kann. Nur dann wäre es möglich, bedrohliche Entwicklungen früh zu erkennen und rechtzeitig mit Impfungen und anderen Maßnahmen gegenzusteuern. Besonders interessierte ihn, ob ein tödliches Vogelgrippevirus wie jenes, das 1983 auf den Hühnerfarmen wütete, auch auf den Menschen überspringen könnte – und wie sich das Erbgut des Erregers hierfür verändern müsste.

Erst drei Jahrzehnte später fand der japanische Forscher eine Antwort. Er fusionierte ein Vogelgrippevirus vom Typ H5N1 mit einem Schweinegrippevirus vom Typ H1N1. Mit dem entstehenden Hybriderreger infizierte er Frettchen, die in der Influenzaforschung oft als menschenähnliches

AUF EINEN BLICK

UMSTRITTENE VIRENEXPERIMENTE

1 Vögel sind natürliche Wirte von **Influenzaviren**, die gelegentlich auf den Menschen überspringen. Vor allem Virusstämme vom Typ H5N1 wiesen bisher eine hohe **Mortalitätsrate** auf, wenn sie Menschen infizierten. Die Opfer hatten meist direkten Kontakt zu Vögeln.

2 Nach den Attentaten vom 11. September 2001 hat die US-Regierung ihre Ausgaben für **biologische Sicherheit** massiv erhöht. Mit den Geldern konnten Wissenschaftler unter anderem **künstlich veränderte H5N1-Viren** erzeugen, die auch unter Säugern übertragbar sind.

3 Kritiker argumentieren, die modifizierten H5N1-Stämme seien eine Gefahr, und verlangen strengere Auflagen für entsprechende Studien. Befürworter meinen, die **Forschung über gefährliche Viren** helfe, bedrohliche Entwicklungen in der Natur rechtzeitig zu erkennen – und eine Reglementierung solcher Untersuchungen schade mehr, als sie als nütze.

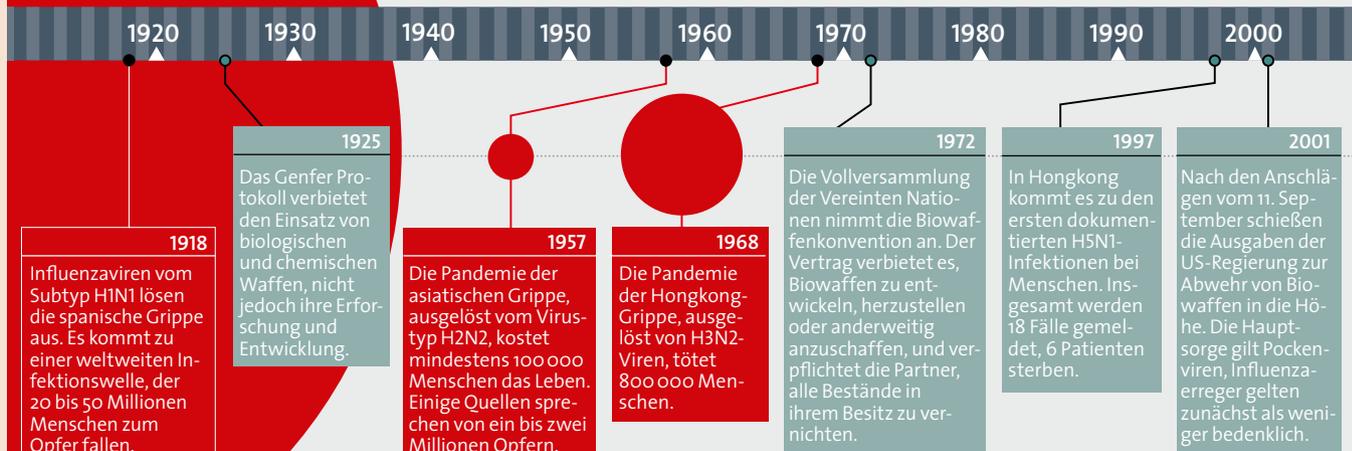


Könnte ein im Labor erzeugter Vogelgrippe-
erreger, der von Mensch zu Mensch über-
tragen wird, bei einer Pandemie ähnlich viele
Opfer fordern wie eine Atombombe?

KYLE BEAN UND SAM HOFFMAN

Evolution einer Biowaffe

Inflenzaviren haben immer wieder Pandemien ausgelöst. Seit den 1990er Jahren kam es unter Zuchtgeflügel in Asien wiederholt zu Masseninfektionen mit dem Subtyp H5N1. Experten befürchten, dass ein solcher Vogelgrippeerreger die Fähigkeit erlangen könnte, von Mensch zu Mensch zu springen. Die Schweinegrippe-Pandemie im Jahr 2009 hat deutlich gemacht, wie schnell sich Inflenzaviren, in diesem Fall des Typs H1N1, in der Bevölkerung verbreiten können. Bei solchen Ansteckungsraten haben die Gesundheitsbehörden nur wenig Zeit zu reagieren.



ROTE KREISE: RELATIVE ZAHL DER PANDEMIE-TODESOPFER

Tiermodell dienen. Später beobachtete er, dass das Virus mittels Tröpfcheninfektion von Tier zu Tier übersprang.

Dieses Ergebnis sprach dafür, dass aus Vogelgrippeviren des Typs H5N1 tatsächlich Erreger hervorgehen können, die sich von Mensch zu Mensch verbreiten. Kawaoka reichte seine Ergebnisse zur Veröffentlichung bei der Fachzeitschrift »Nature« ein.

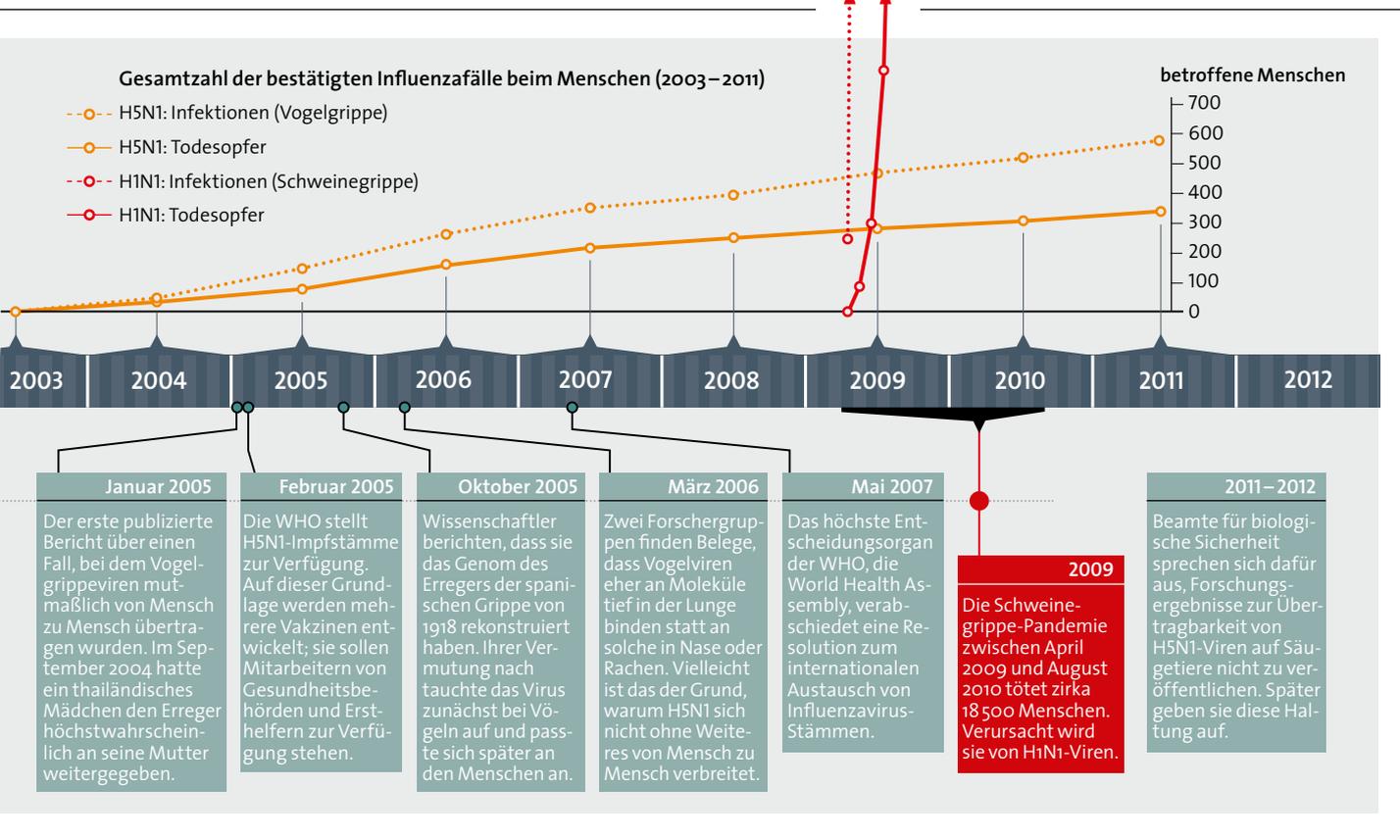
Unabhängig davon war es auch dem Virologen Ron Fouchier vom Erasmus Medical Center in Rotterdam gelungen, H5N1-Viren zu erzeugen, die potenziell auf Menschen übertragbar sind. Fouchiers Arbeitsgruppe hatte Frettchen mit genetisch veränderten Viren infiziert, die bestimmte Anpassungen an Säugetierwirte zeigten. Nach mehrmaliger Übertragung auf Artgenossen hatten die Erreger schließlich die Fähigkeit erlangt, sich per Tröpfcheninfektion unter den Tieren zu verbreiten. Nun wollte Fouchier seine Arbeit im Fachjournal »Science« publizieren.

Doch die amerikanische Regierung erfuhr von den Studien. Im Dezember 2011 drängten US-Beamte für biologische Sicherheit auf einen Aufschub der Veröffentlichungen und verlangten ein Forschungsmoratorium. Sie waren besorgt, dass eines der künstlich erzeugten Viren für Menschen ähnlich tödlich sein könnte wie das Vogelgrippevirus von 1983 für Hühner. In diesem Fall könnten die Forschungsergebnisse dazu missbraucht werden, biologische Waffen herzustellen. Denkbar erschien auch, dass ein solches Virus unbeabsichtigt aus dem Labor entweicht, indem es einen Mit-

arbeiter infiziert. Experten begannen öffentlich darüber zu streiten, wie gefährlich die neuen Erreger für Menschen seien und unter welchen Auflagen die Arbeit mit H5N1-Inflenzaviren erfolgen müsse. Ein Grundsatzkonflikt brach auf: Die wissenschaftliche Praxis, die von freier Forschung und intensivem Informationsaustausch profitiert, kollidierte mit der Notwendigkeit, die Menschheit vor potenziellen Massenvernichtungswaffen zu schützen.

Die erste dokumentierte »Geflügelpest« wütete 1878 auf Hühnerfarmen in einem ländlichen Bezirk Norditaliens. Zunächst dachte man, es handle sich um eine besonders aggressive Form der Cholera. Erst 23 Jahre später gelangte man zu der Erkenntnis, dass Viren die Ursache gewesen sein mussten. 1955 erkannten Wissenschaftler: Der Erreger gehörte zu den Influenza-A-Viren und besaß Ähnlichkeiten mit Grippeviren des Menschen. Das brachte den Virologen Robert Webster wenig später zu der Vermutung, es könnte einen Zusammenhang zwischen Influenzaerkrankungen bei Vögeln und Menschen geben.

Websters These, dass Vögel ein Reservoir für Vorläufer von humanpathogenen Viren darstellen, gilt heute als gesichert. Im Magen-Darm-Trakt von Wildvögeln überdauern Inflenzaviren, die ihre Wirte zwar nicht krank machen, aber über die Ausscheidungen der Tiere verbreitet werden. Infizieren sich damit Hühner auf einem Bauernhof oder in einer Geflügelfarm, so gelangt der Erreger oft auch in engen Kontakt mit Schweinen und weiteren Nutztieren, wodurch er mit zahlreichen anderen Viren in Wechselwirkung tritt. Genau dies ge-



FEN CHRISTIANSEN, NACH: WHO (INFLUENZAFÄLLE BEIM MENSCHEN); ZEITLEISTE NACH: H5N1-AVIAR INFLUENZA-TIMELINE OF MAJOR EVENTS, WHO 13. DEZ. 2011

schiebt auf Tiermärkten und kleinen Höfen in China und Südasiens. Influenzaviren sind bekannt dafür, dass sie sich genetisch häufig verändern – nicht nur durch Mutationen, sondern auch mittels Gentransfer von anderen Viren. Wenn unterschiedlichste Nutztiere engen Kontakt zueinander haben, kommt es zu einem intensiven Austausch von Erbmaterial zwischen ihren Krankheitserregern. Deshalb konzentrierte sich die Aufmerksamkeit von Influenzaforschern in den vergangenen Jahrzehnten auf H5N1-Stämme auf Geflügelarmen Asiens.

Unvermittelt zum Killer geworden

Influenza-A-Viren lassen sich anhand der Typen ihrer Oberflächenproteine Hämagglutinin und Neuraminidase einteilen – daher das »H« und das »N« in der Virusbezeichnung. Der Geflügelseuchenerreger von 1983 beispielsweise war vom Typ H5N2. Könnte man Viren menschliche Charaktermerkmale zuschreiben, wäre H5N1 als rastlos und unberechenbar zu bezeichnen. So rief er in Wildvögeln lange Zeit keine ernsthaften Krankheitssymptome hervor. Doch 2005 veränderte er sich offenbar plötzlich und löste am Qinghai-See in China eine Epidemie aus, bei der tausende Enten, Gänse, Möwen und Kormorane verendeten. Innerhalb der vergangenen zehn Jahre infizierte er zudem Zibetkatzen in Vietnam und Tiger in einem thailändischen Zoo – mit tödlichen Folgen.

Auch Menschen fielen ihm zum Opfer. Während eines Vogelgrippeausbruchs 1997 in Asien starb ein dreijähriger Jun-

ge in Hongkong. Das war der erste dokumentierte menschliche Todesfall im Zusammenhang mit H5N1. Bis Ende des Jahres stieg die Zahl der Toten auf sechs. Um die Epidemie einzudämmen, ordneten die Regierungsbehörden Chinas und seiner Nachbarländer die vorsorgliche Tötung von Millionen Zuchtvögeln an. Dennoch kam es 2004 zu neuen Ausbrüchen in Thailand, Vietnam, China und Indonesien. Alles in allem sind bis heute etwa 360 Fälle dokumentiert, bei denen Menschen an H5N1-Infektionen starben; die meisten von ihnen hatten vorher engen Kontakt zu Vögeln. Das klingt zwar nach nicht sehr viel, jedoch liegt die Mortalitätsrate einer solchen Infektion nach Angaben der Weltgesundheitsorganisation WHO bei 60 Prozent. Zum Vergleich: Der Erreger der spanischen Grippe von 1918, die 20 bis 50 Millionen Menschen das Leben kostete, hatte eine Mortalitätsrate von zwei bis drei Prozent.

Im vergangenen Herbst wurden die Arbeiten von Kawaoka und Fouchier dann doch publiziert. Seither diskutieren Wissenschaftler darüber, wie oft H5N1-Infektionen beim Menschen tatsächlich tödlich verlaufen. Einige Experten, allen voran Peter Palese, Leiter des Fachbereichs Mikrobiologie an der Mount Sinai School of Medicine in New York, vermuten, dass milde Verläufe von H5N1-Infektionen oft unerkannt bleiben – mit der Folge einer zu hoch eingeschätzten Sterblichkeitsrate. Andere meinen, dass durch H5N1 verursachte Todesfälle mitunter nicht dokumentiert würden, was die Mortalitätsrate niedriger erscheinen ließe, als sie tatsächlich ist. Kawaoka und Fouchier beobachteten in ihren Experi-

menten, dass nur wenige Frettchen, die mit künstlich veränderten H5N1-Viren infiziert wurden, daran starben. Wir kennen die Gefahr, die von diesen Erregern ausgeht, also nur ungenau. Doch dass H5N1 das Potenzial besitzt, sich von Mensch zu Mensch zu verbreiten, ist Besorgnis erregend.

Im September 2001 verschickten Terroristen Sporen des Milzbranderreger *Bacillus anthracis* per Post in den USA. Fünf Menschen starben an den Infektionen – eine Anschlagserie, die Angst und Schrecken verbreitete, zumal die amerikanische Bevölkerung nach den Angriffen vom 11. September 2001 ohnehin verunsichert war. Die US-Regierung erhöhte ihre Ausgaben für Biowaffenabwehr daraufhin massiv. Seit 2001 hat sie hier mehr als 60 Milliarden Dollar investiert – in das Einlagern von Impfstoffen, die Überwachung von Krankheitsfällen und die Grundlagenforschung an potenziellen Biowaffen wie dem Influenzavirus. Das National Institute of Allergy and Infectious Diseases (NIAID), der Hauptgeldgeber in diesem Bereich, verdreifachte das Budget für Influenzaforschung 2003 von 17 Millionen auf 50 Millionen Dollar und verdoppelte es im Folgejahr noch einmal auf 100 Millionen Dollar. 2009 erreichten die Ausgaben einen Rekordwert von 300 Millionen Dollar. Auch Kawaoka profitierte davon: Seit 2006 hat er nach Angaben der National Institutes of Health (NIH) jährlich rund 500 000 Dollar für Forschungen über

das pandemische Potenzial von H5N1-Influenzaviren erhalten. Fouchier bekam seine Forschungsgelder ebenfalls im Rahmen einer Förderung durch das NIAID.

Allerdings überwog nach dem 11. September zunächst die Befürchtung, dass Pockenviren als Biowaffen verwendet werden könnten. Denn eine Infektion damit führt in jedem dritten Fall zum Tod, zudem können die Erreger jahrelang in Wirtspopulationen ausharren. Das Pockenvirus gilt seit 1979 als ausgerottet, Proben davon werden nach offiziellen Angaben an nur zwei Orten unter Verschluss aufbewahrt: in Atlanta (USA) und in Koltsovo (Russland). Es gibt jedoch hartnäckige Gerüchte über weitere, illegale Proben. Deshalb beschafften die USA nach dem 11. September etwa 300 000 Dosen Pockenimpfstoff, die nun an geheimen Orten gelagert werden.

Influenzaviren kamen im Jahr 2005 auf die Biowaffenagenda. Wissenschaftlern war es gelungen, das Virus der Grippepandemie von 1918 zu rekonstruieren, und zwar aus Gewebeproben von menschlichen Überresten, die im arktischen Permafrostboden überdauert hatten. Einige Experten äußerten Bedenken, ob solche Forschungen nicht zu viele Sicherheitsrisiken aufwerfen – unter ihnen Paul Keim, der Vorsitzende des National Science Advisory Board for Biosecurity der USA (NSABB). Ihre Befürchtungen haben sich inzwischen

Ein unberechenbarer Erreger

Das Vogelgrippevirus H5N1 hat viele mysteriöse Eigenschaften. Es ist weit verbreitet, aber schwer nachzuweisen. Es tötet mutmaßlich mehr als die Hälfte der infizierten Menschen – doch Tausende, die mit dem Virus in Kontakt kamen, wurden offenkundig in keiner Weise beeinträchtigt. Es scheint nur noch wenige Mutationen davon entfernt, sich von Mensch zu Mensch zu verbreiten – doch trotz jahrzehntelanger, rasch fortschreitender Evolution hat es diese Befähigung bislang nicht erworben. Die fünf größten Rätsel von H5N1:

1 Warum ist das Virus derart erfolgreich?

Es gibt viele verschiedene H5N1-Stämme. Der hochpathogene Stamm, der den Forschern die größten Sorgen bereitet, tauchte erstmals 1996 auf. Seine Bezeichnung »Gs/Gd« rührt daher, dass er zunächst in domestizierten Gänsen in der chinesischen Provinz Guangdong nachgewiesen wurde. Von dort sprang er auf Wildvögel zurück – ein sehr ungewöhnliches Verhalten. Der Erreger hat sich weltweit verbreitet und kann auch Säugetiere einschließlich des Menschen infizieren. Am stärksten betroffen ist Ägypten: Seit 2009 gab es dort die meisten Krankheitsfälle in der Bevölkerung. Die Fähigkeit des Virus, Artgrenzen zu überwinden, ist vermutlich eine Anpassung an die Verhältnisse auf chinesischen Bauernhöfen und Tiermärkten. Hier kommen viele potenzielle Wirtsorganismen in engen Kontakt miteinander.

2 Wo zirkuliert das Virus derzeit?

Wildvögel sind ein Reservoir, doch da in der Regel nur wenige Tiere erkranken, ist das Virus schwer nachzuweisen. Wie verbreitet es unter Menschen ist, weiß niemand. Zudem gibt es kaum Er-

kenntnisse darüber, wie das menschliche Immunsystem auf den Erreger reagiert und unter welchen Umständen es zur Ansteckung kommt. Einige Forscher meinen, dass das Virus sehr viele Menschen infiziert, in den meisten Fällen aber nur milde oder gar keine Symptome auslöst. Andere halten das für unwahrscheinlich, da dann viel mehr leichte Krankheitsverläufe diagnostiziert werden müssten.

3 Was macht das Virus so tödlich?

H5N1 trägt mehrere Mutationen in seinen drei Polymerasegenen, die es ihm erlauben, sich in den infizierten Organismen aggressiv zu vervielfältigen. In Frettchen, Mäusen und Vögeln befällt es nicht nur Lunge und Darm, sondern auch andere Organe wie das Gehirn. Bei Menschen scheint es bislang hauptsächlich Atemwegsprobleme zu verursachen. Das Virus kann eine massive Immunantwort mit überschießenden Entzündungsreaktionen auslösen, die zum Lungenversagen führen.

Rätselhaft bleibt, warum schwere Krankheitsfälle so selten auftreten. Die weitaus meisten Personen, die massiv mit dem Vi-

zwar relativiert, da die Schweinegrippe-Pandemie von 2009 einem großen Teil der Weltbevölkerung zumindest teilweise Immunität gegen das (weit aggressivere) Virus von 1918 verlieh. H5N1-Viren jedoch sind dem menschlichen Immunsystem unbekannt, daher gibt es keine natürliche Resistenz gegen diesen Typ.

Infektionswelle im Eiltempo

Mittlerweile gehen viele Verteidigungsspezialisten davon aus, dass die von Kawaoka und Fouchier hergestellten Viren potenziell gefährlicher sind als Pockenerreger. Denn die Influenza ist deutlich ansteckender und verbreitet sich schneller in der Bevölkerung. Dadurch haben die zuständigen Behörden weniger Zeit, um Impfstoffe und Medikamente bereitzustellen. »Was die Übertragbarkeit angeht, liegt Influenza eindeutig auf dem Spitzenplatz«, erklärt Michael Osterholm, Direktor am Zentrum für Infektionskrankheiten der University of Minnesota und Mitglied des Beratergremiums NSABB. Ein hochansteckendes H5N1-Virus mit einer Mortalitätsrate um 60 Prozent, wie sie bei Opfern der Vogelgrippe beobachtet wurde, sei eine Furcht einflößende Vorstellung. Wie Osterholm betont, könnte H5N1 selbst bei 20-fach geringerer Mortalitätsrate mehr Opfer fordern als das Pandemievirus von 1918. Das NSABB sprach sich lange Zeit

dafür aus, die Forschungsergebnisse von Kawaoka und Fouchier unter Verschluss zu halten, gab diese Haltung aber im vergangenen März auf.

Die meisten Experten für biologische Sicherheit stimmen darin überein, dass modifizierte Vogelgrippeviren – und speziell die H5N1-Typen, die sich unter Säugetieren verbreiten – potenzielle Biowaffen sind, die unter strikter Kontrolle gehalten werden müssen. »Ihre pure Existenz stellt ein Risiko dar«, sagt Richard H. Ebright, Experte für die Abwehr biologischer Waffen und Biochemiker an der Rutgers University in New Jersey, USA. »Sie birgt die Gefahr einer unbeabsichtigten Freisetzung und des Missbrauchs als Kampfmittel.«

Verärgert sind die Spezialisten vor allem darüber, dass die Experimente ohne vorherige Analyse von Nutzen und Risiken erfolgten. Im Jahr 2007 schrieben John Steinbruner und seine Kollegen vom Zentrum für internationale und sicherheitsrelevante Studien in Maryland (USA) einen Bericht, in dem sie empfahlen, »den Handlungsspielraum im Bereich der Grundlagenforschung einzuschränken, wo die individuelle Unabhängigkeit aus guten Gründen besonders geschätzt wird«. Dies fand zunächst kaum Beachtung. Nachdem aber die Arbeiten von Fouchier und Kawaoka ins Blickfeld geraten waren, verlangte die US-Regierung nach fundierten Einschätzungen, wie riskant Forschungen an H5N1 und am Pande-

rus in Kontakt kommen, zeigen keinerlei Symptome; oft lassen sich bei ihnen nicht einmal Antikörper gegen den Erreger nachweisen. Erkrankungen scheinen unter nahen Verwandten gehäuft aufzutreten, was dafür spricht, dass die Krankheitsanfälligkeit zum Teil genetisch bedingt ist. Kürzlich publizierte Forschungsergebnisse deuten auf eine Beteiligung des Gens *IFITM3* hin. Es kodiert für ein Protein der Immunabwehr, das die Vermehrung von Influzaviren im menschlichen Körper bremst.

4 Wird das Virus die Fähigkeit erlangen, sich unter Menschen zu verbreiten?

Bislang scheinen sich Menschen nur bei engem Kontakt mit infizierten Vögeln anzustecken. Um Infektionswellen in der Bevölkerung auszulösen, müsste sich das Virus so verändern, dass es per Tröpfcheninfektion übertragbar ist. Die Arbeiten von Kawaoka und Fouchier haben gezeigt, dass das im Prinzip eintreten kann. Eine der größten Fragen zu H5N1 lautet, warum es nicht schon längst passiert ist. Denn viele Virusvarianten, die in Wildtieren überdauern, sind nur wenige Mutationen von dieser kritischen Veränderung entfernt. Zudem reproduziert sich das Virus oft fehlerhaft, so dass es sich evolutionär schnell wandelt.

Das Auftauchen einer leicht übertragbaren Virusvariante muss jedoch nicht zwangsläufig in eine Katastrophe münden. Denn möglicherweise würde ein solcher Erreger eine geringe Pathogenität aufweisen. Durch die Luft übertragbare H5N1-Viren könnten bevorzugt Zellen in den oberen Atemwegen befallen und nicht mehr den verheerenden Schaden tief in der Lunge anrichten, den Wildstämme verursachen.



MEHR WISSEN BEI
Spektrum.de



Eine ausführlichere Version dieses Textes
finden Sie unter

<http://tinyurl.com/8g6daxg>

5 Lauern noch andere Gefahren?

H5N1 könnte sich mit dem Subtyp H1N1 vermischen, der 2009 die Schweinegrippe-Pandemie verursachte. Beide Virenvarianten haben in Experimenten spontan Gene ausgetauscht, wenn sie dieselbe Zelle infizierten. Wahrscheinlich tun sie das auch in der Natur, denn beide besitzen die Fähigkeit, Schweine anzustecken. Versuche haben gezeigt, dass die entstehenden Hybridviren mitunter besser an menschliche Zellen angepasst sind und eine höhere Virulenz aufweisen als ihre Vorläufer.

Andere Virussubtypen haben ebenfalls das Potenzial, eine Pandemie zu verursachen. Ein Kandidat ist H9N2. Es überdauert im Allgemeinen unbemerkt in asiatischem Geflügel, kann aber auch Menschen infizieren und Erbmaterial mit saisonalen Grippeviren austauschen. Einige H9N2-Stämme haben bereits Eigenschaften erworben, mit deren Hilfe sie sich leichter unter Säugetieren verbreiten. Ein anderer Anwärter ist das weit verbreitete H7N7, das vor etwa zehn Jahren 89 Menschen in den Niederlanden infizierte und einen davon tötete.

Ed Yong / © Nature

mievirus von 1918 seien. Steinbruner und andere sprechen sich nun für ein internationales Aufsichtsgremium mit der Befugnis aus, potenziell gefährliche Studien zu überwachen und gegebenenfalls zu reglementieren, wie es die WHO bereits bei Arbeiten mit Pockenerregern tut.

»Hundertprozentige Sicherheit wäre damit nicht zu erreichen, aber wir könnten die Norm durchsetzen, dass solche Experimente nicht mehr im stillen Kämmerlein stattfinden«, erläutert Steinbruner. Ein manipuliertes H5N1-Virus, das sich unter Säugern verbreiten kann, sei eine Waffe, die das Vernichtungspotenzial von Atombomben erreiche oder übertreffe. »Da reicht es nicht, wenn einzelne Wissenschaftler vorsichtig arbeiten – es bedarf institutionalisierter Sicherheitsmechanismen.«

Grenzen der Freiheit

Wie restriktiv sollen diese Vorgaben sein? Untersuchungen an H5N1 geheim zu halten, würde Wissenschaftler und Gesundheitsbehörden über eine globale Bedrohung im Unklaren lassen. Viele Sicherheitsexperten empfehlen deshalb, Forschungsarbeiten über Influenzaviren, die zwischen Säugern übertragbar sind, auf Labors der höchsten Sicherheitsstufe zu beschränken. Diese Einrichtungen müssten noch deutlich sicherer sein als jene, in denen Kawaoka und Fouchier ihre Experimente durchführten, lautet die Forderung. Das hätte zur Folge, dass nur noch wenige Wissenschaftler entsprechende Arbeiten durchführen könnten.

Auf der anderen Seite gibt es zahlreiche Forscher, die die Arbeiten von Kawaoka und Fouchier leidenschaftlich verteidigen. Je mehr wir über H5N1 wüssten, so argumentieren sie, desto besser könnten wir uns vor der Bedrohung durch natürlich auftretende, gefährliche Virusvarianten schützen. Gelänge es herauszufinden, welche Mutationen dem H5N1-Virus eine hohe Mortalitätsrate und Übertragbarkeit verleihen, dann könnten Experten die in Wildtieren vorkommenden Stämme auf bedrohliche Veränderungen hin beobachten. Dieser Einwand ist nicht von der Hand zu weisen, denn wenn ein neues humanpathogenes Influenzavirus erst einmal aufgetaucht ist und sich zu verbreiten beginnt, ist es zu spät, um die erste Infektionswelle zu verhindern. Meist dauert es ein halbes Jahr oder noch länger, bis ein neuer Grippeimpfstoff in ausreichender Menge vorliegt. Als die US-Gesundheitsbehörden beispielsweise auf den Schweinegrippeausbruch im Jahre 2009 aufmerksam wurden, hatte sich das Virus bereits in weiten Teilen Mexikos und der Vereinigten Staaten verbreitet und war dabei, eine Pandemie auszulösen.

Eine der von Kawaoka entdeckten Erbgutveränderungen, die eine Übertragbarkeit des H5N1 von Mensch zu Mensch ermöglichen, ist bereits bei natürlich vorkommenden Erregern beobachtet worden. Dies lässt befürchten, dass ein für Menschen tödlicher H5N1-Stamm unvermittelt auftauchen könnte. Kawaoka schrieb dazu im Fachblatt »Nature«: »Da (entsprechende Mutationen) auch in der Natur vorkommen, ist es meines Erachtens unverantwortlich, die zu Grunde lie-

genden Mechanismen nicht zu erforschen.« Fouchier verteidigte seine Arbeit mit denselben Argumenten.

Es nützt allerdings nicht viel, die genetischen Merkmale eines potenziell tödlichen Influenzavirus im Detail zu kennen, ohne entsprechende großflächige Überwachungen durchführen zu können. Während früherer Ausbrüche der Vogelgrippe beispielsweise haben Virologen zwar systematisch die Tiermärkte in Südchina überprüft, die Kontrollen aber nicht auf den Rest des Landes und andere Teile Südasiens ausgedehnt. Und in den Vereinigten Staaten hindern Viehzüchter häufig Gesundheitsbeamte daran, ihre Schweine zu untersuchen – obwohl es mittlerweile als wahrscheinlich gilt, dass Vorläufer des Schweinegrippevirus schon seit Jahren auf amerikanischen Farmen zirkuliert hatten, bevor sie sich 2009 in Mexiko verbreiteten. Hier gibt es noch viele Verbesserungsmöglichkeiten.

Doch auch ein noch so gutes Überwachungsprogramm bietet keinen hundertprozentigen Schutz vor Epidemien. »Wir sind heute zwar besser auf Krankheitsausbrüche vorbereitet als noch vor der Schweinegrippe-Pandemie 2009«, sagt Nancy Cox, Direktorin der Influenza-Abteilung an den Centers for Disease Control and Prevention, einer US-Gesundheitsbehörde. »Doch das Auftreten eines hochinfektösen und hochpathogenen Influenzavirus beim Menschen würde die Welt noch immer überrumpeln. Ich glaube auch nicht, dass wir in ausreichender Weise vorsorgen können, solange wir nicht über einen Impfstoff verfügen, der universell gegen alle Influenzastämme wirkt.« Ein solcher Impfstoff ist jedoch nicht in Sicht. Und so befinden wir uns in der misslichen Situation, dass wir einerseits zu viel wissen – und andererseits zu wenig. ~

DER AUTOR



Fred Guterl ist Redaktionsleiter bei »Scientific American«.

QUELLEN

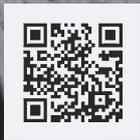
Lupiani, B., Reddy, S.M.: The History of Avian Influenza. In: Comparative Immunology, Microbiology and Infectious Disease 32, S. 311–323, 2009

Reid, A.H. et al.: Evidence of Absence: The Genetic Origins of the 1918 Pandemic Influenza Virus. In: Nature Reviews Microbiology 2, S. 909–914, 2004

Steinbruner, J. et al.: Controlling Dangerous Pathogens. Bericht des Zentrums für internationale und sicherheitsrelevante Studien in Maryland (CISSM), School of Public Policy, University of Maryland, März 2007

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1165733



Jonathan Nott

Chefdirigent der Bamberger Symphoniker – Bayerische Staatsphilharmonie

Um mehr über Jonathan Nott zu erfahren, scannen Sie den QR-Code mit der entsprechenden App Ihres Smartphones oder gehen Sie direkt auf www.focus-entscheider.de/nott

PROVINZ FINDET NUR IM KOPF STATT.

Das Entscheidende im

FOCUS

Der lange Weg zum Higgs

Nach Jahrzehnten der Suche scheint das flüchtige Teilchen endlich gefunden zu sein, dessen besondere Eigenschaften eine neue Ära der Physik andeuten. Beteiligte Forscher lassen die entscheidenden Wochen und Monate bis zur offiziellen Verkündung der Entdeckung am 4. Juli 2012 Revue passieren – und riskieren einen Blick in die Zukunft.

Von Guido Tonelli, Sau Lan Wu und Michael Riordan

Am späten Abend des 14. Juni dieses Jahres machten sich einige Gruppen von Studenten und Post-docs am Large Hadron Collider (LHC) daran, ein bislang verschlossen gehaltenes Datenpaket zu untersuchen. Die gigantische Maschine am CERN, Europas Labor für Teilchenphysik bei Genf, hatte in den Monaten davor gewaltige Datenmengen produziert.

Die mehr als 6000 Physiker, die an den Großexperimenten des LHC arbeiten, gingen jedoch extrem vorsichtig vor, um ihre Auswertung nicht versehentlich zu verfälschen. So hatten sie beschlossen, zunächst bis Mitte Juni überhaupt nicht auf die Ergebnisse zu achten, also eine Art Blindstudie

durchzuführen. Erst dann sollten alle Informationen zusammengebracht und untersucht werden. In jener Nacht schufteten die Jungforscher hektisch, um neue Indizien herauszufiltern. Zwar ist der LHC eine riesige Kollisionsmaschine mit zahlreichen Experimenten, doch nur die beiden größten davon – ATLAS und CMS – hatten die Aufgabe, das so genannte Higgs-Boson aufzuspüren. Dies ist das lange gesuchte Teilchen, welches das Standardmodell der Teilchenphysik komplettieren soll: die theoretische Beschreibung der subatomaren Welt.

Jeder der Detektoren registriert laufend in seinem Inneren die subatomaren Produkte aus unzähligen Protonenkollisionen, darunter vielleicht auch das flüchtige Higgs-Boson. Jedoch müssen die Messgeräte Unmengen von Teilchen Spuren durchforsten, während der unaufhörliche Strom von Hintergrundteilchen mit niedriger Energie permanent droht, möglicherweise interessante Signale zu überdecken. Es ist, als wollte man aus einem Feuerwehrschauch trinken und dabei versuchen, mit den Zähnen einige winzige Goldkörnchen herauszufischen.

Glücklicherweise wussten die Forscher ziemlich genau, wonach sie suchten. Nach dem katastrophalen Start des LHCs 2008 – nur neun Tage nach Beginn der Experimente schmolz eine Verbindungsnaht zwischen zwei Magneten, bildete sich ein gewaltiger Funkenüberschlag, der wiederum ein nahes Gefäß durchbohrte, setzte Tonnen von Helium frei und riss teure supraleitende Magnete aus ihrer Verankerung – konnten die Forscher seit 2011 große Datenmengen sammeln; ge-

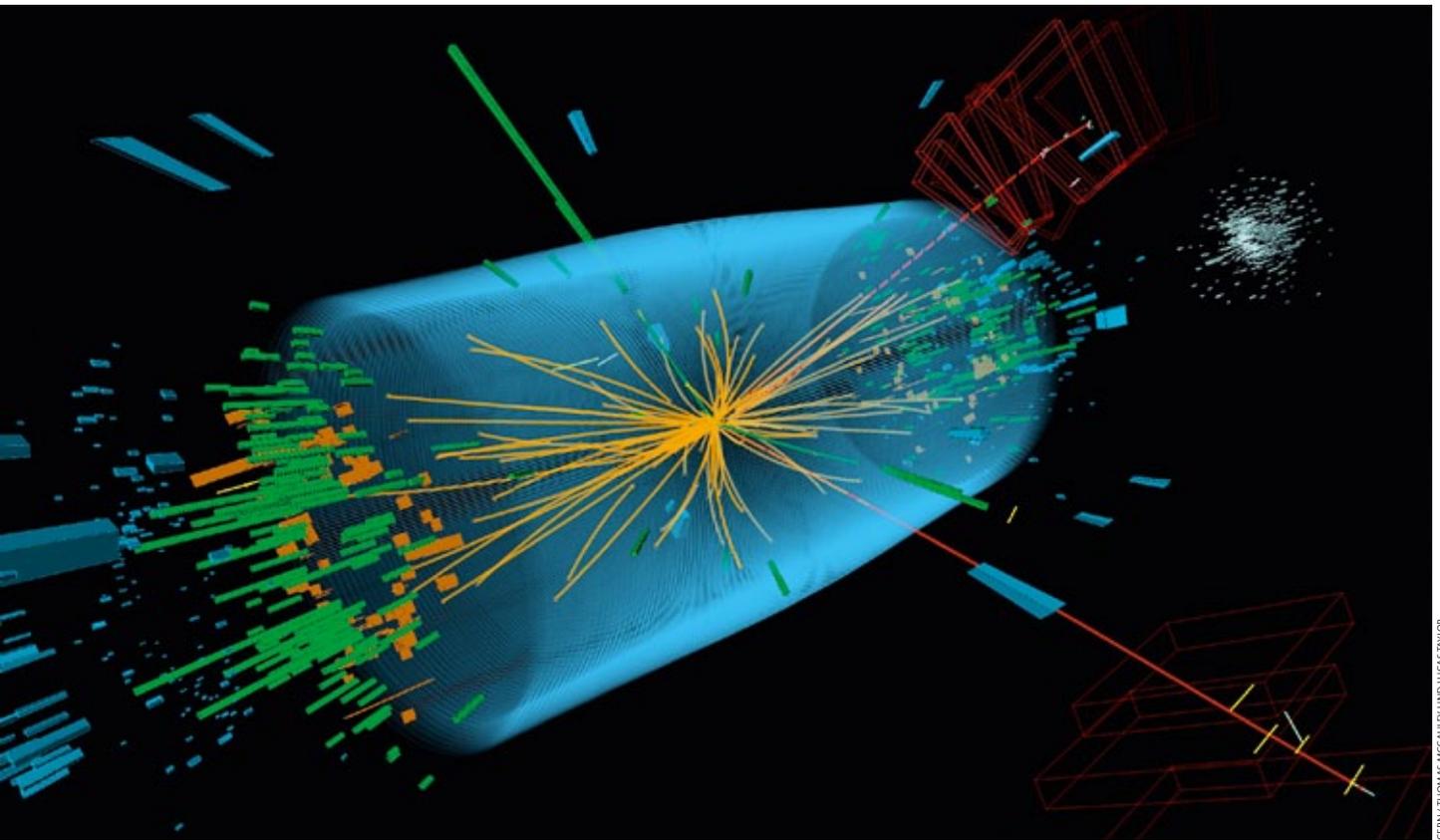
AUF EINEN BLICK

SCHLUSSTEIN ODER GRUNDSTEIN?

1 Jahrzehntelang suchten Physiker nach dem **Higgs-Boson**, dem letzten fehlenden Bestandteil im Standardmodell der Teilchenphysik. Zwei gigantische Experimente am Large Hadron Collider des CERN stießen bereits 2011 auf erste Hinweise darauf.

2 Die Forscher verbargen die **Ergebnisse der Versuchsdurchläufe** vom Frühjahr 2012 in einer »Blindstudie« zunächst sogar vor sich selbst, um jede Verfälschung der Daten zu vermeiden. Erst Mitte Juni untersuchten sie die Resultate direkt.

3 Sie deuten klar auf ein »higgsartiges« Teilchen mit etlichen der Eigenschaften, wie sie die Theoretiker erwarteten. Zudem erlebten die Forscher bereits einige Überraschungen, die Anzeichen für **eine künftige Physik** liefern.



CERN / THOMAS MACALEY UND LUCAS TAYLOR

nügend, um darin bereits auf erste Anzeichen von Higgs-Teilchen zu suchen.

Nachdem die Herbstrunde der Kollisionsläufe abgeschlossen war und der LHC für seine winterliche Wartungspause präpariert wurde, hielten ATLAS-Sprecherin Fabiola Gianotti und einer von uns (Tonelli), seinerzeit Sprecher des CMS, im überfüllten CERN-Auditorium ein Sonderseminar. Beide Detektoren hatten inzwischen unabhängig voneinander interessante Hinweise auf das Higgs-Teilchen in ihren Daten entdeckt. Zudem bestätigten sich die Datensätze gegenseitig. Sowohl ATLAS als auch CMS berichteten von mehreren Dutzend Ereignissen über dem erwarteten Hintergrund von Kollisionen, bei denen zwei Photonen mit einer Gesamtenergie von 125 Milliarden Elektronvolt oder 125 GeV herausgeschossen (1 GeV ist in der Teilchenphysik die Standardeinheit von Masse und Energie; sie entspricht einer Protonenmasse).

Häufung ungeklärter Signale

Solche Photonenpaare könnten der Theorie nach Zerfallsprodukte der kurzlebigen Higgs-Bosonen sein. Jedes der beiden Experimente entdeckte außerdem einige zusätzliche Ereignisse, bei denen vier geladene Leptonen (Elektronen oder Myonen) ähnlicher Energie entstanden waren. Auch diese könnten von Higgs-Bosonen stammen (siehe Kasten S. 56/57). Eine solche Häufung unabhängiger Signale, die zur gleichen Erklärung passten, hatte es bis dahin noch nicht gegeben. Sie legte nahe, dass es sich dabei nicht nur um Zufall oder Messfehler handelte. Doch nach den strengen Regeln

Kollision zweier Protonen im CMS-Detektor des CERN: Das Ereignis zeigt typische Spuren vom Zerfall eines Higgs-Bosons, wie sie das Standardmodell vorhersagt – hier in ein Elektronenpaar (grüne Linien) sowie ein Myonenpaar (rote Linien).

der Teilchenphysiker genügte noch keines dieser Signale aus dem Jahr 2011, um schon als »Entdeckung« zu gelten.

Nur allzu oft hatten sich Spitzen oder kleine Hügel in den Messkurven als Scheineffekte oder statistische Fluktuationen herausgestellt. Die folgenden Kollisionsexperimente vom Frühjahr 2012, die in elf Wochen mehr Daten produzierten als die im gesamten Jahr 2011, hätten diese zarten Daten spitzen jederzeit auch wieder beseitigen und ins Hintergrundrauschen schieben können.

Konnten sich die kleinen Datenberge tatsächlich auf ein Higgs-Boson zurückführen lassen und nicht nur ein statistisches Artefakt bleiben, dann stieg die Chance, mit den neuen Messsignalen eine offizielle Entdeckung verkünden zu können – zugleich das Ende einer jahrzehntelangen Suchaktion und der Beginn einer neuen Ära im Verständnis von Materie und Kosmos.

Denn das Higgs-Boson ist nicht nur irgendein weiteres Partikel im Teilchenzoo, sondern vielmehr Eckstein eines geistigen Gebäudes, bekannt als das Standardmodell, das mehrere Theorien miteinander vereint, die die moderne Teilchenphysik beschreiben. Die Existenz dieses Teilchens hatte Peter W. Higgs von der University of Edinburgh bereits 1964

postuliert, unabhängig von ihm auch François Englert und Robert Brout in Brüssel sowie drei weitere Theoretiker in London. Das neue Partikel sollte alle Elementarteilchen durch einen raffinierten Mechanismus sozusagen mit Masse versorgen.

Das Gebilde ist der physikalische Ausdruck eines Felds, des Higgsfelds, das den gesamten Kosmos erfüllt und jedem Partikel seine individuelle Masse verleiht. Mit der Entde-

ckung der Quarks und Gluonen in den 1970er Jahren sowie der W- und Z-Bosonen der schwachen Wechselwirkung in den 1980er Jahren, waren fast alle Elemente des Standardmodells bereits bekannt.

Doch obwohl die Theoretiker behaupteten, dass das Higgs-Boson – oder etwas Ähnliches – existieren müsse, konnten sie seine Masse nicht vorhersagen. Daher und aus anderen Gründen wussten sie nicht wirklich, in welcher Ecke

Der subtile Fingerabdruck des Higgs

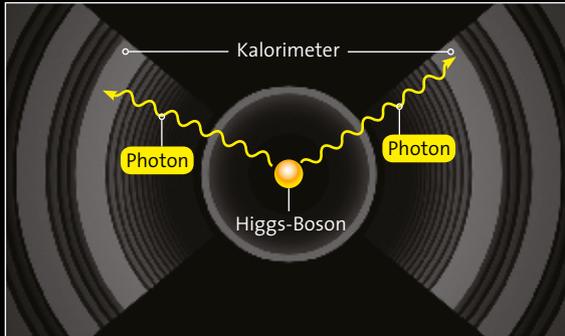
Das Higgs-Boson ist ein äußerst instabiles Teilchen, das in unterschiedlichen Prozessen, auch Kanäle genannt, rasch zerfällt. Leider lassen sich viele dieser Zerfallskanäle nicht leicht von Hintergrund-

ereignissen unterscheiden, die von den rund 500 Millionen Proton-Proton-Kollisionen pro Sekunde stammen. Die Detektoren ATLAS und CMS sind konstruiert, um seltene Vorgänge aufzuspü-

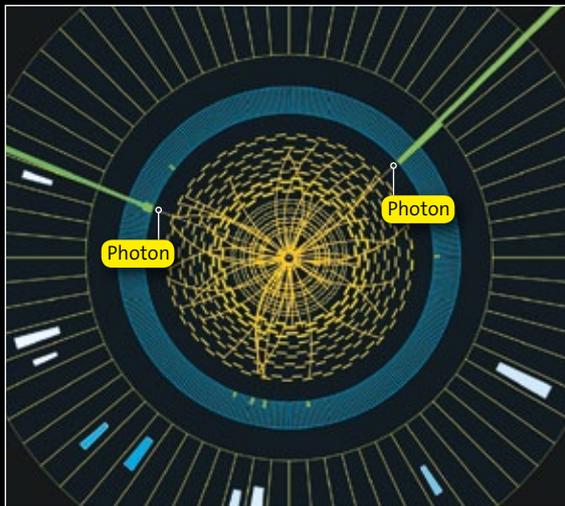
Photonen

Jeder Detektor enthält zahlreiche Kalorimeter: Geräte, die die Teilchenenergie messen. Das innerste Kalorimeter reagiert bevorzugt auf Photonen und absorbiert sie, wobei sie ein winziges elektrisches Signal erzeugen. Wenn ein Higgs in zwei Photonen zerfällt, dann kann der Detektor deren Energie äußerst präzise messen, was den Rückschluss auf die Masse des neu gefundenen Teilchens ermöglicht.

ERWARTET



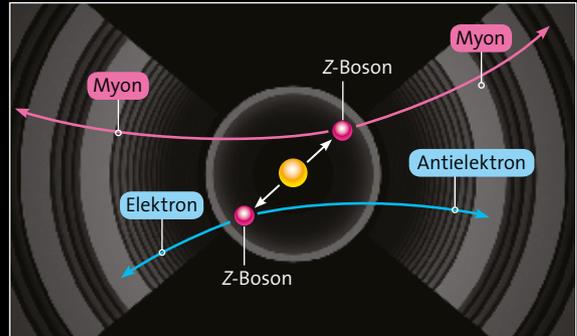
BEOBACHTET



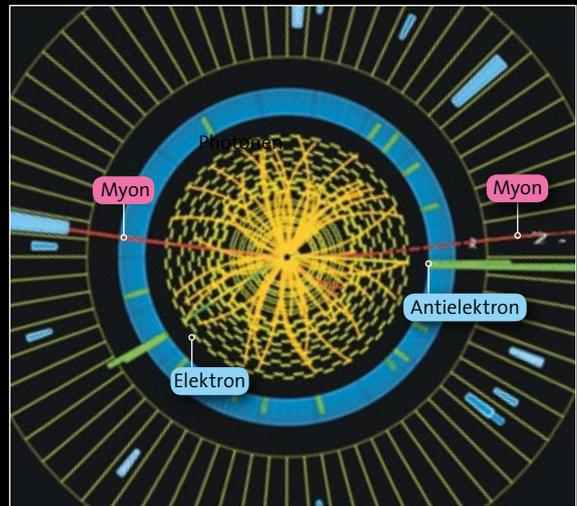
Z-Bosonen

Das Higgs kann auch in Paare von Z-Bosonen zerfallen, aus denen wiederum jeweils ein Elektron und ein Antielektron oder zwei Myonen entstehen. Ein innerer Spurenverfolger und das Kalorimeter registrieren Elektronen, während die Myonen ungebremst wegfliegen und lediglich Spuren hinterlassen. Starke Magnetfelder krümmen die Bahn von Elektronen und Myonen, was reicht, um ihre Energie und damit die Higgs-Masse zu bestimmen.

ERWARTET



BEOBACHTET



des Teilchenzoos sie das unbekannte Gebilde suchen sollten. Ein früher Kandidat mit dem Neunfachen der Protonenmasse tauchte 1984 am Teilchenbeschleuniger DESY in Hamburg auf, verschwand aber bald wieder von der Bildfläche.

Die meisten Forscher waren sich schon damals einig, dass seine Masse mindestens 10- bis 100-fach größer sein musste. Falls dem so war, ließ sich das Higgs nur mit einer viel größeren Maschine entdecken als etwa dem Tevatron des Fermi

National Laboratory bei Chicago. Der sechs Kilometer lange Protonen-Antiprotonen-Beschleuniger ging 1983 in Betrieb. Im gleichen Jahr begann CERN mit dem Bau des Milliarden Euro teuren Large-Electron-Positron(LEP)-Beschleuniger und bohrte dafür in 50 bis 175 Meter Tiefe einen 27 Kilometer langen Ringtunnel, der die französisch-schweizerische Grenze bei Genf viermal kreuzte. Neben anderen Forschungszielen stand das Higgs-Boson auf der LEP-Wunschliste schon da-

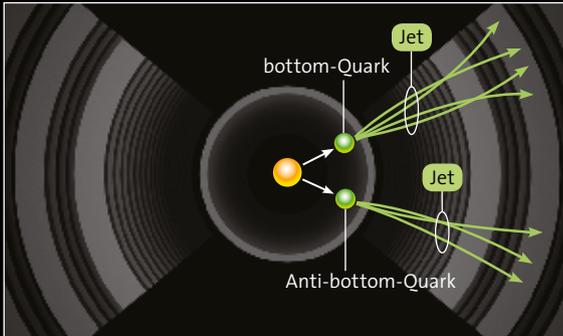
ren, die von einem Higgs-Zerfall stammen könnten, und alle anderen zu ignorieren. Die Grafiken zeigen vier der wichtigsten Zerfallskanäle, nach denen die Experimente Ausschau halten, zusammen

men mit Bildern von higgsartigen Signalen, wie sie CMS 2011 und 2012 beobachtet hat. Da die Entdeckung nur statistisch möglich ist, kann kein Einzelereignis als definitiver Nachweis gelten.

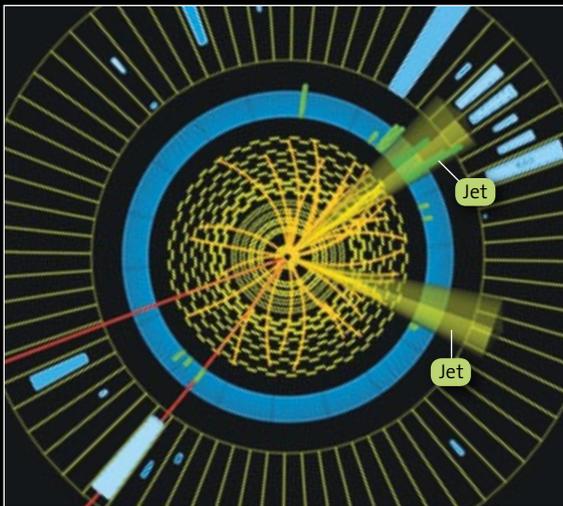
bottom-Quarks

Ein weiteres mögliches Schicksal des Higgs ist der Zerfall in ein bottom-Quark und sein Antiteilchen. Jedes dieser Gebilde zerlegt sich in eng gebündelte »Jets« (Strahlen) von Hadronen, also Partikeln, die wie das Proton aus Quarks aufgebaut sind. Diese dringen durch die Innenschichten des Detektors und geben ihre Energie in den äußeren Kalorimetern ab. Leider erzeugen auch normale Kollisionen Hadronenjets aus bottom-Quarks, was die Entdeckung der Higgs-Ereignisse erschwert.

ERWARTET



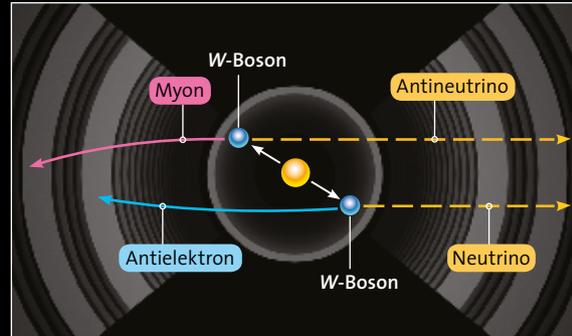
BEOBACHTET



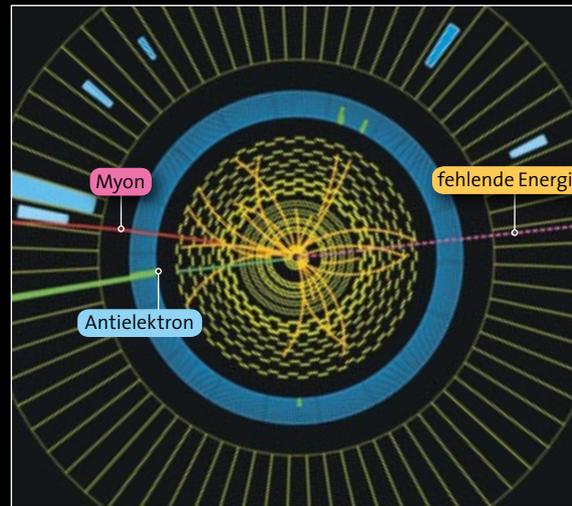
W-Bosonen

Schließlich kann das Higgs auch in zwei W-Bosonen zerfallen, aus denen jeweils ein Elektron, Antielektron oder Myon sowie ein Neutrino oder Antineutrino entsteht. Neutrinos sind schwer nachzuweisen – sie entschwinden spurlos, wobei sie aus der Kollision etwas Energie mitnehmen. Das erlaubt Forschern, auf ihre Präsenz bei einer Kollision zu schließen, behindert aber auch eine exakte Rekonstruktion der Higgs-Masse.

ERWARTET



BEOBACHTET



GEORGE BETSECK/ANAGH/CERN

50 Jahre Higgs-Teilchen

Die Entdeckung eines higgsartigen Teilchens in diesem Sommer markierte den Höhepunkt einer Jahrzehnte währenden Suchaktion. Schon Jahre bevor das Standardmodell theoretisch vollständig war, hatten Forscher bemerkt, dass sie nicht erklären konnten, warum Teilchen überhaupt eine Masse haben. Sie postulierten daher ein neues Feld – heute Higgs-Feld genannt –, das die zunächst masselosen Partikel verlangsamt und ihnen so ihre träge Masse verleiht. Diesem Feld ließ sich auch ein besonderes Teilchen zuordnen – und so begann die Jagd auf das Higgs.



AUGUST 1964

Die Artikel

François Englert und Robert Brout publizieren den ersten Beitrag, und schlagen ein Teilchen vor, das später nach Peter W. Higgs (links) benannt wird, dem Autor des zweiten Beitrags, der etwas später erscheint. G. Kuralnik, C. Hagen und T. Kibble veröffentlichten die dritte Arbeit im November.



JANUAR 1983

Entdeckung des W-Bosons

Einer der letzten fehlenden Bausteine im Standardmodell wird im SPS nachgewiesen, dem Super-Proton-Synchrotron-Beschleuniger im CERN.

AUGUST 1979

Gluonen entdeckt

Am Beschleuniger DESY in Hamburg gelingt den Physikern der Nachweis des Gluons, des Trägerteilchens der starken Kernkraft. Theoretiker berechnen, dass aus der Vereinigung von Gluonen mehr Higgs-Bosonen entstehen sollten als bei jedem anderen Prozess.



JULI 1999

Neuer Beschleuniger in Betrieb

Im 27 Kilometer langen Ringtunnel des CERN wird eine neue Teilchenmaschine, der Large-Electron-Positron-Beschleuniger, fertig gestellt.

mals weit oben. Auch die US-Physiker machten sich seinerzeit in der Reagan-Ära daran, in Texas eine große Maschine zu entwerfen und zu bauen, den Superconducting Super Collider (SSC).

Mit seinen geplanten 40 TeV (40 000 GeV) sollte der SSC das Higgs aufspüren, selbst wenn es eine Masse von bis zu 1000 GeV haben sollte. Doch nachdem sich die Kosten bald auf mehr als zehn Milliarden Dollar verdoppelten, stoppte der amerikanische Kongress das Vorhaben.

Auffällige Resultate kurz vor Abschalten des Tevatrons erbrachten keine Entdeckung

Um weiterforschen zu können, zogen sich die enttäuschten amerikanischen Higgs-Jäger ans Fermilab und ans CERN zurück. Weitere Entdeckungen und Präzisionsmessungen am LEP und Tevatron konnten inzwischen immerhin ausschließen, dass die Higgs-Masse mehr als 200 GeV beträgt. Damit lag das Teilchen aber durchaus noch in der Reichweite dieser Maschinen. Doch ein ganzes Jahrzehnt weiterer Experimente erbrachte keinerlei direkte Hinweise auf »das Higgs«.

Während der letzten Monate der LEP-Laufzeit im Sommer 2000 beschlossen die Physiker, die Energie der Teilchenkollisionen weit über die Konstruktionsgrenzen der Maschine hinauszutreiben. In diesen Wochen tauchten bei den Experimenten plötzlich erste Hinweise auf das Higgs auf. Im September meldeten zwei der vier LEP-Detektoren von Ereignissen, bei denen ein Z-Boson plus ein weiteres mysteriöses Teilchen gemessen wurden, das weiter in zwei bottom-Quarks zerfiel – ein Teilchen, das verdächtig nach einem

Higgs-Boson mit einer Masse von 115 GeV aussah. Der damalige CERN-Direktor Luciano Maiani genehmigte der Maschine eine Verlängerung von sechs Wochen.

Aber in der Zeitspanne registrierten die Experimentatoren lediglich ein einziges weiteres potenzielles Ereignis dieses Typs. Das reichte natürlich nicht. Nach hitziger Debatte beschloss Maiani, den LEP abzuschalten und mit der geplanten Konversion zum LHC zu beginnen – also jener Maschine, die zu dem Zeitpunkt bereits für die Entdeckung des Higgs-Bosons entworfen war.

Der LHC enthält die fortschrittlichsten Technologien, die jemals in einer Anlage vereint wurden. Unter Leitung des Projektmanagers Lyndon Evans bauten Beschleunigerphysiker und Ingenieure die Anlage in den vorhandenen LEP-Tunnel ein. Die wichtigsten LHC-Komponenten bestehen aus 1200 supraleitenden Dipolmagneten – glänzende, jeweils 15 Meter lange Zylinder, von denen jeder rund eine Million Dollar kostete. Hergestellt von deutschen, französischen und italienischen Firmen, enthalten sie zwei Röhren, umgeben von magnetischen Niob-Titan-Spulen, die bei 1,9 Kelvin oder –271 Grad Celsius in flüssiges Helium getaucht sind. In den beiden Röhren kreisen die Protonenstrahlen gegenläufig fast mit Lichtgeschwindigkeit und mit Energien bis zu 7 TeV.

Diese Strahlen ähneln eher Sequenzen von Laserlichtpulsen als einem einzelnen Blitzlicht. Jeder besteht aus fast 1400 »Paketen« mit jeweils bis zu 150 Milliarden Protonen – zum Vergleich: Das ist etwa die Zahl der Sterne in der Milchstraße. Wenn sich zwei dieser Teilchenpakete an ausgewählten Messpunkten begegnen, stoßen im Normalbetrieb 10 bis 30 Pro-

2. NOVEMBER 2000

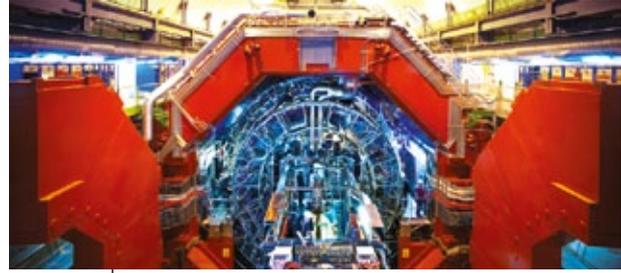
Ende einer Ära

Der LEP-Beschleuniger wird abgeschaltet. Zeitgleich beginnt der Bau des Large Hadron Collider (LHC), mit dem 2012 das Higgs entdeckt wird.

10. SEPTEMBER 2008

Der LHC startet

Am fertig gestellten LHC werden die ersten Protonenstrahlen in die Röhren geschossen.



SEPTEMBER 2000

Letzter Schuss auf das Higgs

Kurz bevor der LEP abgeschaltet werden soll, stoßen die Physiker auf Anzeichen des Higgs. Sechs Wochen später und ohne Ergebnis wird die Maschine trotzdem abgeschaltet. Heute ist bekannt: Die Spur war falsch, die vermutete Masse zu niedrig.

19. SEPTEMBER 2008

Folgenreicher Zwischenfall

Eine Verbindungsstelle zwischen zwei Magneten schmilzt und setzt einen Funken frei, der ein Magnetgefäß durchschlägt und Tonnen von Helium freisetzt. Über 50 Magnete werden aus ihrer Verankerung gerissen oder anders beschädigt.

4. JULI 2012

Higgsartiges Teilchen entdeckt

CERN-Forscher verkünden, dass sie ein higgsartiges Teilchen mit einer Masse von 125 GeV gefunden haben.

tonen miteinander zusammen. In jeder Sekunde produzieren die Paketströme damit insgesamt eine halbe Milliarde Kollisionen.

Wenn Protonen miteinander kollidieren, dann ist das viel »schmutziger« als bei Leptonen wie Elektronen und Positronen. Der Theoretiker Richard Feynman verglich einmal den Vorgang mit zwei Müll-eimern, die aufeinanderkrachen, wobei eben auch eine Menge Müll herausfliegt. Das liegt an den Protonen: Sie sind nicht strukturlos wie die Elektronen, sondern aus Quarks und Gluonen zusammengesetzt. Bei den interessantesten Ereignissen kollidieren zwei Gluonen bei Energien von rund 100 GeV miteinander und gelegentlich sogar bei einem TeV. Mit Hilfe von raffinierten Detektoren, Spezialelektronik und Supercomputern versuchen die Physiker dann, aus Milliarden langweiligen Vorfällen die wenigen interessanten herauszufiltern.

Die Detektoren ATLAS und CMS können beide das Higgs nicht direkt beobachten – dafür ist es einfach zu instabil. Vielmehr halten sie Ausschau nach indirekten Hinweisen darauf, dass es im Zentrum der Kollisionenpunkte entstand und sogleich wieder in leichtere Teilchen zerfiel. Je nach Masse des Higgs-Bosons kann das auf vielfältige Weise geschehen (siehe Grafiken S. 56/57). 2011 konzentrierten sich die Forscher auf seltene Zerfälle in zwei Photonen und vier geladene

»Wenn zwei Protonen miteinander kollidieren, dann gleicht das zwei Mülleimern, die aufeinanderkrachen – es fliegt Müll heraus.«

Leptonen. Der Grund: Diese Reaktionen lassen sich besonders einfach vom schmutzigen Hintergrund unterscheiden, der sonst das gesuchte Signal verdecken könnte.

Die unfallbedingte Verzögerung am LHC gab den Physikern am Fermilab die letzte Gelegenheit, das Higgs als Erste zu entdecken. Kurz vor dem geplanten Abschalten des Tevatron im September 2011 produzierten die Experimente CDF und D-Zero wenige Ereignisse, bei denen Paare von bottom-Quarks mit Energien von 125 und 155 GeV auftraten. Aber ähnlich wie beim Abschalten des LEP konnten die Forscher ihren

Direktor nicht davon überzeugen, die Laufzeit zu verlängern, und so wurde der Tevatron kurz danach eingemottet (siehe »Abschied vom Tevatron« von Tim Folger, SdW 1/2012, S. 46). Diesen März reichten die Fermilab-Forscher übrigens eine genauere Analyse nach, in der sie einen Datenpeak bei 125 GeV gefunden hatten, was mit den Resultaten am CERN übereinstimmt.

Bis zum Mai 2012 produzierte der LHC 15-mal mehr Messdaten als der Tevatron insgesamt – eine Leistung der Physiker unter der Leitung von Stephen Myers. Bei diesen Versuchsläufen gelangte die Arbeit von Tausenden von Physikern am ATLAS und CMS an ihr Ziel, die die Detektoren entwarfen und betrieben, die Computerprogramme schrieben, um neuartige Ereignisse zu erkennen und aus dem Da-

tenwust herauszufiltern. Jeder arbeitete jetzt fieberhaft in Erwartung einer großen Entdeckung. Als dann die Forscher Mitte Juni die Datenpakete öffneten, mussten sie zuerst Unmengen von Messwerten durchforsten.

Nachdem die Studenten und Postdocs die Nacht durchgeschuftet hatten, waren alle auf die Ergebnisse gespannt. Es war ein heißer Nachmittag am 15. Juni, als die CMS-Physiker in Raum 222 des Filtergebäudes strömten, um sich die Berichte der jungen Forscher anzuhören. Bald war der Saal mit hunderten Mitgliedern der Arbeitsgruppen gefüllt, viele mussten am Boden sitzen oder stehen. Die Spannung im Raum ergriff alle Anwesenden.

Der erste Sprecher diskutierte eine mögliche Zerfallsmöglichkeit für das Higgs, einen so genannten »Kanal«, und zwar den in Paare von W -Bosonen. Ein kleiner Überschuss an Ereignissen war bei niedrigen Massen in den Daten aufgetaucht, aber das schwache Signal erregte kein weiteres Aufsehen. Es folgten zwei Präsentationen über den seltenen Vier-Leptonen- sowie den Zwei-Photonen-Zerfall. Jetzt endlich begann es so auszusehen, als würde sich in den Messwerten das Higgs-Boson zeigen.

Hektische Tage, schlaflose Nächte

Die Signale von 2012 häuften sich abermals in der gleichen Gegend der Massenskala – bei 125 GeV –, die die Forscher schon sechs Monate zuvor beschäftigt hatte. Sie bemerkten sogleich, dass sie die neuen Daten eigentlich nur mit den älteren von 2011 kombinieren mussten, um für CMS die Entdeckung des Higgs verkünden zu können. Nach den beiden Kurzvorträgen brandete erstmals Beifall auf.

Ähnliche Enthüllungen gab es beim Vortrag über das ATLAS-Experiment. Spontan wurde in mehreren Gruppen gefeiert, nachdem sie die Auswertungen der neuen Versuchsdurchgänge gesehen hatten. Dennoch sollte es noch eine ganze Woche hektischer Arbeit mit schlaflosen Nächten dauern, bis sich die Physiker so weit sicher waren, dass die Wahrscheinlichkeit für eine zufällige Häufung der Ereignisse klei-

ner war als eins zu drei Millionen. Das entspricht dem harten »Fünf-Sigma-Standard« der Teilchenphysiker, ab dem erst sie von einer »Entdeckung« sprechen (Sigma ist ein statistisches Maß für die Signifikanz von Daten).

Zu diesem Zeitpunkt war die Nachricht von der Entdeckung schon durchgesickert. Das weltweite Interesse wuchs jetzt so stark, dass zunächst strenge Geheimhaltung vereinbart wurde. Vor der offiziellen Präsentation der Ergebnisse sollten keine bruchstückhaften Informationen mehr an

die Öffentlichkeit dringen, vor allem weil sich der genaue Inhalt der Aussagen während der Vorbereitung noch ändern konnte. Außerdem sollten

»Ich glaube, wir haben es!«

Rolf-Dieter Heuer,
Direktor des CERN am 4. Juli 2012

ATLAS-Mitglieder nicht mit ihren CMS-Kollegen über ihre neuen Resultate sprechen und umgekehrt. Einzelne Physiker ließen sich dennoch nicht davon abhalten, die Neuigkeiten zu diskutieren, auf die alle so lange gewartet hatten. Gedämpfte Diskussionen waren auf den Fluren und in der CERN-Cafeteria zu hören. Die Erwartung stieg, und der Druck wuchs, die Sache öffentlich anzukündigen.

Dem Direktor des CERN, Rolf-Dieter Heuer, wurde die Präsentation am 22. Juni kurz in einem Treffen mit Gianotti und Joseph Incandela von der University of California, Santa Barbara, Tonellis Nachfolger als CMS-Sprecher, gezeigt. Heuer entschied, dass die Daten ausreichten, um sie zu veröffentlichen. Umgehend informierte er den CERN-Rat, der die Forschungseinrichtung überwacht, um sie über die schnelle Entwicklung auf dem Laufenden zu halten. Dann beschloss Heuer, am 4. Juli, dem Eröffnungstag der 36. Internationalen Konferenz für Hochenergiephysik in Melbourne, ein CERN-Seminar abzuhalten – und im Anschluss daran eine CERN-Pressekonferenz.

In der Nacht davor warteten bereits hunderte Physiker in den Fluren und Gängen vor dem abgeschlossenen großen Vortragssaal, um einen der wenigen nicht reservierten Sitzplätze zu ergattern. Stephen Myers, Lyndon Evans sowie vier frühere CERN-Direktoren, die am LHC von Anfang an direkt beteiligt waren, saßen in der ersten Reihe. Frisch vom Flugzeug aus Genf betrat Peter Higgs unter Willkommensapplaus den Saal und setzte sich neben den ebenfalls anwesenden François Englert.

Incandela und danach Gianotti bombardierten ihre Zuhörer mit Bildern von ihren neuen Daten und Analysen, die meisten von den Messungen von 2012. Wie schon im Dezember 2011 wiesen die Messkurven der Zwei-Photonen-Kanäle deutliche Peaks bei 125 und 126 GeV auf. Bis zu der Präsentation hatten die Detektoren noch mehrere Dutzend weiterer Ereignisse eingefangen, in denen ein schweres Teilchen bei 125 GeV in vier geladene Leptonen explodiert war. Auch in diesem Kanal ließen sich in den Kurven deutlich kleine Datenhügel ausmachen.

Das überzeugte die Forscher. Kombinierte man das Ergebnis mit den Zwei-Photonen-Zerfällen, folgerten die Teams



von CMS und ATLAS unabhängig voneinander, dass die Wahrscheinlichkeit für eine Zufallsfluktuation in den Messungen bei weniger als eins zu drei Millionen lag. Das Phänomen war demnach real. Als die Fernsehkamera auf Peter Higgs schwenkte, sah man, dass er ein Taschentuch zog, um sich die Augen zu trocknen. »Ich glaube, wir haben es!«, rief Rolf-Dieter Heuer in den Saal. »Wir haben ein neues Teilchen beobachtet, das konsistent mit einem Higgs-Boson ist.«

Nur wenige Physiker bezweifeln zwar, dass ein neues schweres Partikel entdeckt worden war. Aber um was genau handelte es sich eigentlich? Physiker am CERN diskutierten diese Frage nur zögerlich und sprachen lieber von einem »higgsartigen Boson«. Sie bestanden darauf, dass erst noch mehr Messungen nötig wären, um seine Eigenschaften bestimmen zu können. Beispielsweise hat CERN noch nicht zweifelsfrei geklärt, ob das neue Teilchen einen Spin von null hat, wie es das Standardmodell für das Higgs-Boson verlangt. Gleichwohl legt ein Vergleich mit Daten des Tevatron (publiziert am 2. Juli in einem offensichtlichen Versuch, auch ins Rampenlicht zu gelangen) dies ebenfalls nahe. Weiterhin wurden am ATLAS und am CMS mehr Zwei-Photonen-Zerfälle entdeckt, als nach der Theorie zu erwarten war. Fehlte da vielleicht etwas? Oder deutete das auf eine neue Physik?

Theoretiker wie Experimentatoren konzentrieren sich auf die Frage, ob es sich bei dem neuen Teilchen tatsächlich um »das« Higgs-Boson handelt, wie es das Standardmodell vorhergesagt hat. Dies kann durch weitere Präzisionsmessungen geklärt werden, die zeigen, wie es in andere Sekundärpartikel zerfällt. Die offizielle Publikation, die Ende Juli eingereicht wurde, betrachtet auch andere Zerfallskanäle, die dem Standardmodell nicht widersprechen. CMS bleibt bei einer Fünf-Sigma-Entdeckung, während die ATLAS-Ergebnisse an Signifikanz sogar noch zugenommen haben.

Beginn einer aufregenden Phase der Teilchenphysik

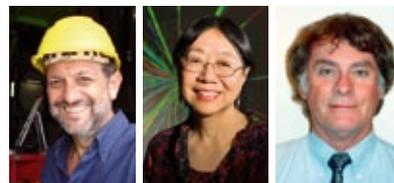
John Ellis und Tevong You analysierten die kombinierten Beobachtungen von LHC und Tevatron. Ergebnis der CERN-Theoretiker: Das neue Teilchen verhält sich in der Tat wie ein Higgs-Boson. Der überraschend starke Zusammenhang des Partikels mit hochenergetischen Photonenpaaren hat bereits heiße Debatten ausgelöst. Weil das Higgs anderen Elementarteilchen Masse verleiht, sollte es mit schwereren Teilchen stärker in Wechselwirkung treten. Photonen selbst haben aber keine Ruhemasse. Daher wechselwirkt das Higgs-Boson mit ihnen indirekt über andere, massehaltige Zwischenteilchen. Zusätzliche überschwere Partikel, wie sie vereinheitlichte Feldtheorien wie die Supersymmetrie fordern, würden den Zerfallsprozess noch verstärken – was laut den ersten Daten offenbar auch passiert. Bestätigt sich diese Entwicklung, würde das starke Hinweisen auf eine Physik jenseits des Standardmodells liefern.

Die epochale Entdeckung des Higgs-Bosons markiert das Ende einer langen Ära der Teilchenphysik sowie den Beginn einer aufregenden neuen Phase, in der Prozesse auf der TeV-Skala untersucht werden können. Nach Jahrzehnten der Flau-

te hat diese Forschungsrichtung neues Leben erhalten, dank erfolgreicher Zusammenarbeit von Theorie und Experiment. Natürlich tauchen jetzt neue Fragen auf, die sich hoffentlich mit weiterer Forschung zum neuen Teilchen und zu seinen potenziellen Partnern beantworten lassen. Spielt es vielleicht eine Rolle bei der kosmischen Inflation, die als jene Kraft angesehen wird, die das Universum an seinem Beginn exponentiell vergrößert hat? Tritt es mit der Dunklen Materie in Wechselwirkung, die nach Meinung vieler Astronomen das Universum ausfüllt? Und schließlich: Welche Hochenergieprozesse schützen das fragile Vakuum vor Instabilitäten, die vielleicht sogar unsere Existenz gefährden könnten?

Während wir jetzt den Triumph des Standardmodells erleben, könnte uns das Higgs-Boson bereits auf die Fährte einer neuen Physik bringen. Das Teilchen eröffnet uns ein großartiges Labor für weitere Experimente. Hat es wirklich alle Eigenschaften, wie die Theorie sie vorhersagt? Die bislang vorliegenden Diskrepanzen in den Daten könnten statistische Fluktuationen sein, die mit weiteren Messreihen in den kommenden Monaten wieder verschwinden. Oder sie deuten auf spannende neue Physik hin. ~

DIE AUTOREN



Guido Tonelli (links) arbeitet seit 1993 am CMS-Experiment des CERN, 2010 und 2011 auch als sein Sprecher. Er ist Professor der

Università degli Studi di Pisa. **Sau Lan Wu** ist Mitglied des ATLAS-Experiments am CERN, außerdem Enrico Fermi Distinguished Professor für Physik an der University of Wisconsin-Madison. **Michael Riordan** ist Wissenschaftshistoriker und Autor zahlreicher Sachbücher, darunter »The Hunting of the Quark« (1987).

QUELLEN

- Aczel, A.D.:** Der Welterklärer. Interview mit Steven Weinberg. In: Spektrum der Wissenschaft 12/2010, S. 34–37
- Collins, G.P.:** Entdeckungsmaschine der Superlative. In: Spektrum der Wissenschaft 9/2008, S. 32–39
- Folger, T.:** Abschied vom Tevatron. In: Spektrum der Wissenschaft 1/2012, S. 46–53
- Kane, G.:** Das Geheimnis der Masse. In: Spektrum der Wissenschaft 2/2006, S. 36–43
- Körkel, T.:** Der LHC nach Higgs. Interview mit Siegfried Bethke. In: Spektrum der Wissenschaft 10/2012, S. 60–66
- Samulak, G.:** Ring der Erkenntnis. In: Spektrum der Wissenschaft 9/2006, S. 80–87

WEBLINKS

<http://atlas.ch>
<http://cms.cern.ch>
 Webseiten des ATLAS-Experiments und des CMS-Experiments am CERN

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1165735

»Urananreicherung mit Lasertechnik – billig und politisch hochbrisant«

Ein neues Verfahren verspricht, die Herstellung von Kernbrennstoff deutlich zu vereinfachen. Doch **Wolfgang Sandner**, Präsident der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, gibt zu bedenken: Zugleich wird mit »Silex« auch die Verbreitung von Nuklearwaffen erleichtert.

Spektrum der Wissenschaft: Herr Professor Sandner, die Deutsche Physikalische Gesellschaft warnt vor einem neuartigen Verfahren zur Anreicherung von natürlichem Uran. Warum?

PROF. WOLFGANG SANDNER: Die Firmen Hitachi und General Electric wollen das so genannte Silex-Verfahren in einer Fabrik im US-Bundesstaat North Carolina verwirklichen. Silex heißt »Separation of Isotopes by Laser Excitation«, Isotopentrennung durch Laseranregung. Ende September erteilte die US-Atomaufsichtsbehörde NRC dem Verfahren die Zulassung. Jetzt kann man davon ausgehen, dass die Fabrik tatsächlich gebaut wird. Die DPG möchte vor einer unkontrollierten Verbreitung der Technologie warnen, da sie zur Herstellung von waffenfähigem Uran genutzt werden könnte.

Das Silex-Verfahren setzt Laser ein, um Uran anzureichern. Bisher werden dafür vor allem Zentrifugen verwendet. Was macht das neue Verfahren gefährlicher?

SANDNER: Mit Lasern lässt sich Uran pro Durchlauf deutlich stärker anreichern als in Zentrifugen. Man schätzt, dass Silex mindestens zehnmal so effizient ist, denkbar ist aber auch ein Faktor 100 oder 1000. Eingeweihte Beobachter halten es für möglich, dass innerhalb von zwölf Tagen etwa ein Kilogramm relativ hoch angereichertes Uran gewonnen werden kann. Mit Gaszentrifugen fallen in dieser Zeitspanne nur Grammengen an; darum müssen Zentrifugen zu Tausenden, wenn nicht sogar zu Zehntausenden hintereinandergeschaltet werden.

Sie glauben diesen kühnen Behauptungen?

SANDNER: Wenn sich zwei so große Firmen der Sache annehmen, muss man das schon ernst nehmen. Und Experten bestätigen die Aussagen der Hersteller.

Eigentlich sind Sie Laserphysiker. Wie sind Sie mit dem Thema Urananreicherung in Berührung gekommen?

SANDNER: In den 1980er Jahren habe ich mittels Lasern sehr hoch angeregte Atome hergestellt. Dabei werden verschiedene Isotope eines Elements durch unterschiedliche Wellenlängen angeregt. Das kann man verwenden, um diese zu trennen, so auch bei Uran. Natürliche Uranvorkommen bestehen bloß zu 0,7 Prozent aus Uran-235, der Rest ist Uran-238. Aber nur Uran-235 ist spaltbar; deswegen muss man seinen Anteil im Uran erhöhen, um es in Kernreaktoren zu nutzen.

»Spektrum der Wissenschaft« hat schon im April 1982 von dieser Möglichkeit berichtet. Damals hieß es, das Laser-Verfahren zur Urananreicherung stünde kurz vor dem Durchbruch. Wieso hören wir erst jetzt wieder davon?

SANDNER: In Deutschland und vielen anderen Ländern wurde die Forschung in den 1980er Jahren eingestellt. Denn

die damals bekannten Methoden erwiesen sich als unwirtschaftlich. Die Laser waren zu teuer und die Ausbeuten zu gering.

Die Physiker Horst Struve und Michael Golds-

worthy haben in Australien weiter an dem Verfahren gearbeitet und 1988 das Unternehmen Silex Systems Limited gegründet. Haben Sie eine Erklärung dafür, wie ihnen nach all den Jahren der Durchbruch gelungen ist?

SANDNER: Wesentliche Teile des Verfahrens sind geheim. Man weiß, dass Uran als gasförmige Verbindung – Uranhexafluorid – mit einem 16-Mikrometer-Laser beschossen wird. Das regt selektiv nur diejenigen Uranhexafluorid-Moleküle, die Uran-235 enthalten, zu Schwingungen an. Die anderen, in denen Uran-238 steckt, bleiben im Grundzustand.

»Wir warnen vor einer unkontrollierten Verbreitung der Technologie, da sie zur Herstellung von waffenfähigem Uran dienen kann«



Wolfgang Sandner ist Direktor am Max-Born-Institut für Nichtlineare Optik und Kurzzeitspektroskopie sowie Professor an der Technischen Universität Berlin. Seit April 2010 steht der 63-Jährige außerdem der Deutschen Physikalischen Gesellschaft (DPG) als Präsident vor.

Braucht man dazu einen speziellen Laser?

SANDNER: Prinzipiell reichen CO₂-Laser, wie sie etwa in Automobilfabriken zum Schneiden und Schweißen von Karosserieblechen eingesetzt werden. Allerdings muss man die Laserstrahlung so anpassen, dass sie die genaue Anregungsfrequenz des Uranhexafluorids trifft. Solche Verfahren sind zwar bekannt, aber sie auf den großtechnischen Maßstab zu übertragen, ist schwierig. Doch das eigentliche Problem ist der nächste Schritt. Nachdem man die Uran-235-Moleküle in Schwingung versetzt hat, muss man sie von den anderen trennen. Wie das in Silex gelingt, ist das große Geheimnis.

Haben Sie eine Vermutung?

SANDNER: Es gibt verschiedene chemische und physikalische Möglichkeiten. Man könnte zum Beispiel die bereits angeregten Moleküle mit einem weiteren Laser ionisieren und die Isotope dann mit einem elektrischen oder magnetischen Feld trennen. Solche Ionisationsmethoden wurden jedoch schon früher untersucht und als ineffizient abgetan.

Und auf anderem Weg?

SANDNER: Die Entwickler des Verfahrens könnten beispielsweise ausnutzen, dass sich ein vibrierendes Molekül leichter aufbrechen lässt – wiederum durch einen Laser oder durch Stöße mit anderen Molekülen. Anhand der unterschiedlichen Massen der Fragmente könnte man dann die verschiedenen Isotope voneinander trennen. Aber auch das Gegenteil ist denkbar: Angeregte Moleküle lagern sich möglicherweise eher aneinander und bilden einen schweren Komplex, wenn die Temperatur tief genug sinkt. Auch hier würde man die gewünschten Isotope anhand der Masse dieser Komplexe von den übrigen trennen.

Pro Prozessschritt ließe sich offenbar eine Anreicherung von 14 Prozent erreichen. Wie kommt man auf die für waffenfähiges Uran benötigten 80 Prozent?

SANDNER: Wenn das Uranhexafluorid während eines Anreicherungsstadiums nicht verunreinigt wird, kann man es einfach in die nächste Stufe stecken, den Prozess wiederholen und so den Gehalt an Uran-235 immer weiter erhöhen. Sollten jedoch Verunreinigungen auftreten, wird die Sache schwieriger. Aber auch das hängt vom Trennmechanismus ab – über den wir nichts wissen.

Angenommen, man kann damit Uran beliebig stark anreichern – könnte man Silex-Fabriken nicht genauso gut kontrollieren wie herkömmliche Anlagen?

SANDNER: Nicht unbedingt. Zentrifugen werden häufig komplett oder als schwer zu tarnende Einzelteile gekauft; das fällt bei Rüstungskontrollen sofort auf. Silex ist hingegen modular aufgebaut, und die meisten Teile sind für sich genommen harmlos. Die Laser könnten auch zum Schweißen benutzt werden; zur Veränderung der Laserfrequenz genügt ein Hochdruck-Gaszylinder. Sonst braucht man nur noch Vakuumtanks und eventuell Kühlorrichtungen, die ebenso unverdächtig sind. Silex-Anlagen können vermutlich viel kleiner gebaut werden als vergleichbare Zentrifugensysteme, die stets geräumige Fabrikhallen benötigen. Somit ließen sie sich leicht vor der Satellitenaufklärung verbergen: Sie wären kaum von einer großen Supermarkthalle zu unterscheiden. Das schafft ein Problem, denn bei der gegenwärtigen Lage der Dinge ist die Beobachtung aus dem Weltall eines der wichtigsten Instrumente, um verdächtige Anreicherungsstätten zu identifizieren.

Die Hersteller widersprechen dieser Behauptung. Sie betonen, dass auch Silex eine riesige Fertigungsanlage benötigen wird, und verweisen auf die Größe der Anlage in North Carolina.

SANDNER: Dennoch spricht alles dafür, dass Silex deutlich kompakter sein kann als jede Zentrifugenanlage. Das gilt vielleicht nicht für das jetzige Demonstrationsobjekt, wohl

Ein riskantes Geschäft

Die Urananreicherung mittels Laser ist billiger und effektiver als andere Verfahren zur Gewinnung von Kernbrennstoff mit einem erhöhten Anteil des Isotops Uran-235. Kritiker

mahnen, dass gerade diese Vorzüge die missbräuchliche Verwendung erleichtern – insbesondere die Proliferation, das heißt die Weitergabe von Kernwaffentechnik.

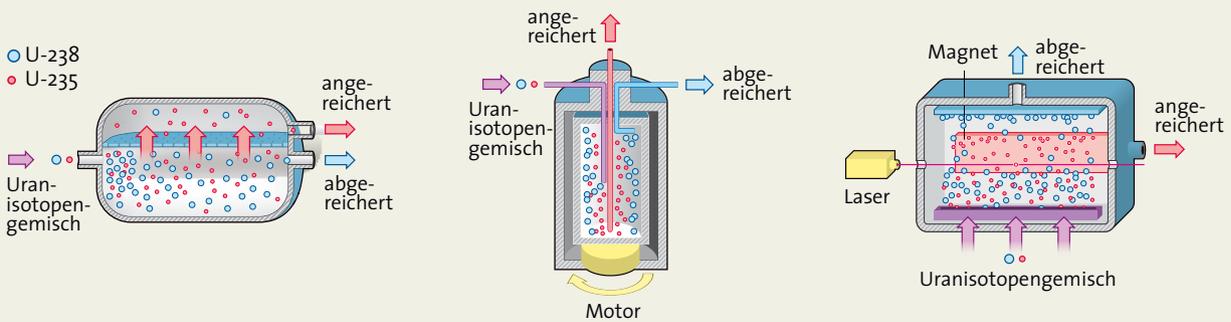
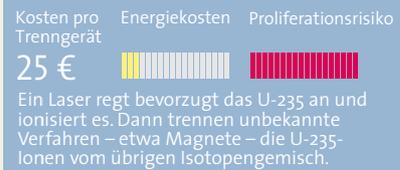
GASDIFFUSION



GASZENTRIFUGE



LASERANREICHERUNG



WEINBRICER, S. LASER PLANT OFFERS CHEAP WAY TO MAKE NUCLEAR FUEL IN 'NATURE 48', S. 16-17, 2012, FIG. 1

aber auf lange Sicht. Ein effizienteres Verfahren ist meist auch kompakter, und wenn Silex nicht effizienter wäre, dann würde man die Fabrik wahrscheinlich nicht bauen.

Allerdings ist der Bombenbau mit Uran wohl eher etwas für atomare Einsteigerationen. Interessanter wäre Plutonium, da man davon weniger braucht, um eine kritische Masse zu erreichen. Eignet sich denn das Silex-Verfahren auch zur Plutoniumanreicherung?

SANDNER: Das wäre rein theoretisch möglich, aber ich halte es für unwahrscheinlich. Allerdings wirbt die Firma Silex Systems damit, dass sie auch die Isotope anderer Elemente anreichern kann.

Die Homepage von Silex Systems nennt Silizium, das man für die Halbleiterherstellung benötigt, sowie Kohlenstoff und Sauerstoff für medizinische Diagnoseverfahren. Wird sich Teheran also bald Silex für eine neue Computerchip-Fabrik oder ein Krankenhaus einkaufen?

SANDNER: Wenn sich dieses Knowhow unter einem zivilen Vorwand verbreiten könnte, sollten bei den Rüstungskontrollen alle Alarmglocken läuten.

Der Iran hat in der Vergangenheit behauptet, Isotope mit Hilfe von Laserlicht trennen zu können. Ist das plausibel?

SANDNER: Im Labormaßstab ist das durchaus möglich. Jedes bessere Universitätslabor kann einzelne Atomisotope separieren.

Schwierig wird es erst, wenn man das Verfahren auf Uran anwenden und im industriellen Maßstab nutzen will. Was das betrifft, kann ich nur hoffen, dass die Geheimhaltung des Silex-Verfahrens bisher gut genug funktioniert hat. Allerdings lässt sich niemals ausschließen, dass eine Technologie nochmals erfunden wird, insbesondere wenn bekannt ist, dass sie existiert.

Aber sollte das jemandem gelingen, wird er der Letzte sein, der diese Tatsache veröffentlicht. Er würde das, was er weiß, nachzubauen versuchen und, falls er Erfolg hat, vermutlich nie öffentlich kundtun, dass er es kann.

Mit dem Silex-Verfahren könnte der Iran also die internationalen Rüstungskontrollen unterlaufen?

SANDNER: Auf den Iran sind sämtliche Augen gerichtet, und da werden auch die Uranflüsse sehr gut kontrolliert. Ob just in diesem Fall das Silex-Verfahren ein zusätzliches Risiko birgt, scheint mir fraglich. Ich glaube, eine größere Gefahr geht von terroristischen Organisationen aus oder von Ländern, die bisher völlig unverdächtig waren.

Lässt sich der kommerzielle Ausbau der Technologie in den USA noch verhindern?

SANDNER: Vermutlich nicht. Das hat seinen ganz normalen, gesetzmäßigen Weg genommen. Sämtliche Anhörungen fanden formal statt – wobei der Bericht über die Sicherheits-

relevanz des Vorhabens keinerlei Aussagen über die mögliche Proliferation der Technologie enthält. Es geht nur um die lokale Sicherheit, also darum, wie groß die Wahrscheinlichkeit ist, dass radioaktives Material entweicht oder es einen Betriebsunfall gibt. Wenn die beteiligten Firmen zu der Überzeugung kommen, es sei wirtschaftlich sinnvoll, dann steht dem Bau nichts mehr im Weg.

Sie sehen keinen Widerspruch zwischen der Kommerzialisierung des Silex-Verfahrens und der atomaren Abrüstung, zu der sich US-Präsident Barack Obama bekennt?

SANDNER: Nein, denn dieses Verfahren sieht offiziell eine rein zivile Nutzung vor. Auch die DPG wendet sich nicht gegen das Verfahren als solches, denn es kann für verschiedene zivile Zwecke bis hin zur Anreicherung von Brennstoff in Kernkraftwerken sehr wertvoll sein. Zumal sich wie gesagt nicht von außen beurteilen lässt, ob damit überhaupt hoch angereichertes Uran hergestellt werden kann. Die Technologie ist in der Welt, wir können sie nicht rückgängig machen. Man muss aber wenigstens die Möglichkeit der unkontrollierten Verbreitung von atomwaffenfähigem Material verhindern.

Wie?

SANDNER: Man sollte den Handel mit den Einzelkomponenten des Silex-Verfahrens beobachten und die Suche nach Urananreicherungsstätten so weit verfeinern, dass auch klei-

nere Anlagen erkannt werden. Silex ist eben ein Beispiel dafür, dass die Kernenergie ein Janusgesicht hat. Einerseits kann sie nützlich sein, andererseits trägt sie die Möglichkeit zum Atombombenbau in sich. Die DPG möchte sich mit dieser Diskussion nicht in die politische Frage einmischen, ob die Nutzung der Nuklearenergie durch Kernkraftwerke sinnvoll ist oder nicht. Aber im Fall von Silex wollen wir klar Stellung beziehen: Der unkontrollierten Verbreitung von Atomwaffen muss unbedingt Einhalt geboten werden. Hier haben wir als Physiker eine echte Verantwortung gegenüber der Gesellschaft.

Sollte man nicht, um ähnliche Entwicklungen künftig zu vermeiden, die kerntechnische Forschung auf gewisse Aspekte begrenzen, etwa darauf, wie sich Atommüll handhaben lässt?

SANDNER: Forschung im Hinblick auf ihren Erkenntnisgewinn zu beschränken, ist ein Widerspruch in sich. Das Unbekannte ist nicht vorhersagbar, deswegen lässt es sich auch nicht einschränken. Man muss an die Ethik der Verantwortlichen appellieren und gesellschaftliche Kontrollen einführen, damit ein Missbrauch der Forschungsergebnisse ausgeschlossen wird. ~

Das Gespräch führte der freie Wissenschaftsjournalist

Robert Gast.

ANZEIGE

Zum Nachdenken, Weiterdenken und Miteinanderreden

chrismon plus

Jeden Monat Geschichten über Menschen in außergewöhnlichen Situationen, hintergründige Reportagen und fundierte Kommentare.

Jetzt 3 Ausgaben gratis testen

Unser **Dankeschön** für Sie, wenn Sie nach dem Test chrismon plus weiterlesen: ein **Mini-Billardtisch**.

* Bestellen Sie jetzt:

Internet: www.chrismon.de/testen

E-Mail: leserservice@chrismon.de

Telefon: 0800 / 758 75 37 (gebührenfrei)

Fax: 069 / 580 98-226



Eine tolle Geschenkidee für das ganze Jahr!



Die Zeitschrift für Naturwissenschaft, Forschung und Technologie. 12 Ausgaben; € 84,- (ermäßigt € 69,90)



Das Magazin für Psychologie und Hirnforschung. 10 Ausgaben; € 68,- (ermäßigt € 55,-)



Die Kompetenz in Sachen Astronomie und Weltraumforschung. 12 Ausgaben; € 85,20 (ermäßigt € 64,-)



Die neuesten Erkenntnisse aus dem Bereich der Life Sciences. 4 Ausgaben; € 29,60 (ermäßigt € 25,60).



Der aktuelle Wissensstand der NWT-Forschung. 4 Ausgaben; € 29,60 (ermäßigt € 25,60)



Deutschlands erstes wöchentliches Wissenschaftsmagazin (PDF-Format; optimiert für alle digitalen Endgeräte) € 39,95 (ermäßigt € 30,-)

Bestellen Sie für sich oder als Geschenk:
www.spektrum.com/weihnachten

per E-Mail:
service@spektrum.com

telefonisch:
 06221 9126-743

per Fax:
 06221 9126-751

Die Vorteile eines Geschenkabonnements

- > Sie verschenken ein ganzes Jahr lang anspruchsvolle und topaktuelle Berichte aus der spannenden Welt der Wissenschaft.
- > Auf Wunsch erhält der Beschenkte pünktlich zum Fest das erste Heft mit einer schönen Grußkarte in Ihrem Namen.
- > Alle Ausgaben werden pünktlich frei Haus geliefert, keine Ausgabe wird verpasst.

> Ihr Geschenk zur Wahl

- 1 Kalender »Himmel und Erde 2013«
- 2 Tasche »Allrounder« von Reisetel
- 3 Audio-CD Sternstunden des Universums
- 4 Buch – Digitale Demenz
- 5 DVD – Planet des Lebens
- 6 Smartphonehülle – Babuschka
- 7 Multifunktionsmesser No. 8 von Opinel
- 8 Spektrum Notizbuch





W. Engländer, H.-H. Bergmann
DIE GROSSE KOSMOS VOGELSTIMMEN-DVD
 220 Vögel, Filme und Stimmen
 2012, 2 DVDs, Begleitbuch, in Box, INFO-Prgr. gem. § 14 JuSchG., Kosmos

Bestell-Nr. 1859
 € 49,99 (D), € 49,99 (A)

220 Vogelarten mit ihren Rufen und Gesängen erfreuen uns durch wunderschöne Bilder in Filmen, die Vögel singen dabei schnabelsynchro! Auf der ersten DVD werden 110 Singvögel, auf der zweiten DVD 110 Nicht-Singvögel vorgestellt. Ein Sprecher erklärt jede Darstellung, das Begleitbuch informiert noch ausführlicher.



Sylvain Delouée
WARUM VERHALTEN WIR UNS MANCHMAL MERKWÜRDIG UND UNLOGISCH?
 2012, 192 S. m. 87 SW-Abb., kart., Spektrum

Bestell-Nr. 3725
 € 14,95 (D), € 15,40 (A)

Wie wird unser Verhalten durch andere beeinflusst? Warum nur tun wir manchmal unlogische, merkwürdige oder irrationale Dinge? In amüsanten und unterhaltsamer Weise entschlüsselt Sylvain Delouée das irrationale Verhalten der Menschen.



Peter M. Higgins
DAS KLEINE BUCH DER ZAHLEN
 Vom Abzählen bis zur Kryptographie
 2012, VIII, 348 S. m. 35 Abb., kart., Spektrum

Bestell-Nr. 3748
 € 19,95 (D), € 20,60 (A)

Peter Higgins verarbeitet Jahrhunderte des Fortschritts zu einer erbaulichen Erzählung, die das Geheimnisvolle der Zahlen hervorhebt und erklärt, wie die verschiedenen Arten von Zahlen aufgetaucht sind und weshalb sie nützlich sind. Das Buch enthält viele historische Anmerkungen und interessante Beispiele, und es behandelt einfache Zahlenrätsel und Zaubertricks ebenso wie Verbindungen zu Problemen des Alltags.



Anna Frebel
AUF DER SUCHE NACH DEN ÄLTESTEN STERNEN
 2012, 352 S., m. zahlr. Abb., geb., Fischer

Bestell-Nr. 3684
 € 19,99 (D), € 20,60 (A)

Mit Mitte zwanzig entdeckte Anna Frebel während ihrer Promotion den ältesten bis dahin bekannten Stern. Diese ältesten bekannten Objekte überhaupt geben über die ersten Sterne im Universum und die Entstehung der chemischen Elemente Auskunft – dadurch werden sie ein Schlüssel zum Verständnis des gesamten Universums. Anna Frebel gibt klar und verständlich Einblicke in diesen Aspekt der Astronomie und berichtet von ihrer konkreten Arbeit mit den Teleskopen in fernen Gegenden der Welt.

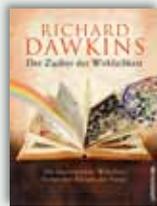


Udo Gansloßer, Kate Kitchenham
FORSCHUNG TRIFFT HUND
 Neue Erkenntnisse zu Sozialverhalten, geistigen Leistungen und Ökologie
 2012, 240 S. m. 250 Farbbabb., geb., Kosmos

Bestell-Nr. 3751

€ 29,99 (D), € 30,90 (A)

Immer mehr Forschungsprojekte in Europa und den USA befassen sich mit dem Haushund, seiner Entwicklung, seinem Verhalten, seiner Intelligenz und seinen Emotionen. Dr. Udo Gansloßer und Kate Kitchenham berichten über die Forscher und ihre Arbeit, fassen die interessantesten Ergebnisse zusammen und geben damit Hundehaltern Anleitung für ein besseres Verständnis ihres Vierbeiners.



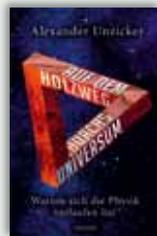
Richard Dawkins
DER ZAUBER DER WIRKLICHKEIT
 Die faszinierende Wahrheit hinter den Rätseln der Natur
 2012, 288 S. m. zahlr. Abb., geb., Ullstein

Bestell-Nr. 3752

€ 26,99 (D), € 27,80 (A)

Seit jeher hat die Menschheit versucht, sich die rätselhafte Natur durch Mythen begreiflich zu machen. Auf den Herbst folgt der Winter, weil Hades, Persephone in sein Reich entführt hat und die blühende Natur mit ihr; in Wirklichkeit gibt es unterschiedliche Jahreszeiten, weil die Erdachse geneigt ist. Und die Welt entstand auch nicht, weil der indische Gott Vishnu seinem Diener Brahma ihre Erschaffung auftrag, sondern durch den Urknall. So wunderbar die Mythen sind, weitaus spannender ist die wissenschaftliche Betrachtung. Genau das tut Dawkins, indem er die Wahrheit hinter den Rätseln erklärt. Ein faszinierendes, üppig illustriertes Buch, das den Zauber der Wirklichkeit feiert.

Bestellen ☎ +49 6221 9126-841
Sie direkt: @ info@science-shop.de



Alexander Unzicker
AUF DEM HOLZWEG DURCHS UNIVERSUM
 Warum sich die Physik verlaufen hat
 2012, 304 S. m. Abb., geb., Hanser

Bestell-Nr. 3719
 € 19,90 (D), € 20,50 (A)

Keine Disziplin treibt so seltsame Blüten wie die Physik: Spekulationen über Paralleluniversen etwa, die mit Wissenschaft nicht mehr viel zu tun haben. Gleichzeitig sind grundlegende Fragen der Physik noch immer unbeantwortet. Doch statt Lösungsansätze von Einstein oder Dirac aufzugreifen, verwendet man lieber Milliarden auf die Suche nach neuen Teilchen und mutmaßt über verborgene Dimensionen. Alexander Unzicker liest der Physik die Leviten – und weist ihr den Weg aus dem Labyrinth, in dem sie sich verlaufen hat.



Ken Taylor
KOSMISCHE KULTSTÄTTEN DER WELT
 Von Stonehenge bis zu den Maya-Tempeln
 2012, 240 S. m. 200 Farbbabb., geb., Kosmos

2012, 240 S. m. 200 Farbbabb., geb., Kosmos

Bestell-Nr. 3638 € 29,99 (D), € 30,90 (A)

Überall auf der Welt zeigen beeindruckende Bauten das himmelskundliche Wissen unserer frühen Vorfahren. In diesem reich bebilderten Buch beschreibt der Archäologe Ken Taylor ausführlich über fünfzig bedeutende Kultstätten auf der ganzen Welt.



Werner Gruber, Heinz Oberhammer, Martin Puntigam
GEDANKENLESEN DURCH SCHNECKENSTREICHELN
 Was wir von Tieren über Physik lernen können
 2012, 296 S., geb., Hanser

2012, 296 S., geb., Hanser

Bestell-Nr. 3648
 € 19,90 (D), € 20,50 (A)

In *Gedankenlesen durch Schneckenstreicheln* begeben sich die beiden Physiker Heinz Oberhammer und Werner Gruber sowie der preisgekrönte Satiriker Martin Puntigam auf eine Reise ins Tierreich. Dabei stoßen sie auf faszinierende wissenschaftliche Phänomene. Wissenschaft für alle: Spektakulär, lehrreich und unterhaltsam.



WUNDER DES UNIVERSUMS
 BBC

2012, Laufzeit ca. 200 Min., Verlag: Polyband

Bestell-Nr. 3656
 € 14,99 (D), € 14,99 (A)

DVD-VIDEO

Die Dokumentation nimmt Sie mit auf eine Entdeckungsreise quer über unseren Planeten, von den verbrannten Ebenen Afrikas hin zu den schneebedeckten kanadischen Rockies. Diese Reisen quer über unseren Planeten werden mit spektakulären Bildern aus dem Weltraum kombiniert. Mittels beeindruckender Bilder aus Teleskopen und computergenerierten HD-Aufnahmen liefert *Wunder des Universums* Eindrücke von gigantischen Supernovae, Gammastrahlenexplosionen und kürzlich entdeckten Galaxien und gibt Aufschluss über die entferntesten Bereiche des Universums. Sprachen: Deutsch und Englisch; INFO-Programm gem. §14 JuSchG.



Dava Sobel
UND DIE SONNE STAND STILL
 Wie Kopernikus unser Weltbild revolutionierte
 2012, 283 S. m. Abb., geb., Berlin Verlag

2012, 283 S. m. Abb., geb., Berlin Verlag

Bestell-Nr. 3697
 € 22,99 (D), € 23,70 (A)

Ein geheimnisvolles Manuskript, eine unerhörte Begegnung, der Sturz eines Weltbilds – das ist der Stoff dieser Biographie! Elegant erzählt Dava Sobel die Geschichte der Kopernikanischen Revolution und bettet sie ein in die Geschichte der Astronomie von Aristoteles bis zum Mittelalter.



CHRISTBÄUMCHEN: FOTOLIA / PIXI



Jörg Resag
ZEITPFAD
Die Geschichte unseres Universums und unseres Planeten
 2012, 400 S. m. 177 Farbbabb., geb., Spektrum Akademischer Verlag
Bestell-Nr. 3644
€ 29,95 (D), € 30,80 (A)

Das durchgängig vierfarbige und reich illustrierte Buch des Physikers Jörg Resag stellt das moderne Gesamtbild der Naturgeschichte umfassend dar und lädt den Leser zu einer Zeitreise ein, die beim Urknall beginnt und bis in die Zukunft des Universums führt.



Stuart Clark
KOSMISCHE REISE
Von der Erde bis zum Rand des Universums
 2012, 240 S. m. 200 Farbbabb., geb., Spektrum Akademischer Verlag
Bestell-Nr. 3645
€ 39,95 (D), € 41,10 (A)

Begeben Sie sich auf eine intergalaktische Mission, die Sie durch einen Raum von Hunderten von Trilliarden Kilometern und durch eine Zeitspanne von über 13 Milliarden Jahren führt. Mehr als 300 spektakuläre astronomische Aufnahmen und informative Texte vermitteln nachhaltige Eindrücke von den 101 Stationen dieser großartigen kosmischen Reise.



Christian Hesse
CHRISTIAN HESSES MATHEMATISCHES SAMMELSURIMUM
1 : 0 = ∞
 2012, 256 S. m. 40 z. Tl. farb., kart., Beck
Bestell-Nr. 3721
€ 14,- (D), € 14,40 (A)

Unentbehrlich x Unermesslich x Unverbesserlich = Hesses mathematisches Sammelsurium. Und zwar für alle: vom manischen Mathematiker bis zum Zahlenangsthösen. Das Buch ist eine flammende Hommage an die Mathematik nach gut dreißigjähriger Beschäftigung mit ihr aus nächster Nähe.



Alice Roberts (Hg.)
DIE ANFÄNGE DER MENSCHHEIT
Vom aufrechten Gang bis zu den frühen Hochkulturen
 2012, 256 S. m. über 800 farbige Abb. u. Ktn., geb., Dorling Kindersley
Bestell-Nr. 3718 € 29,95 (D), € 30,80 (A)

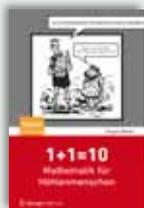
Dieses imposante Werk dokumentiert mit mehr als 800 Abbildungen die Geschichte der menschlichen Evolution. Dabei geht es nicht nur um die biologische, sondern auch um die kulturelle Entwicklung bis zu den frühen Hochkulturen. Mit beeindruckenden Schädelrekonstruktionen von den niederländischen Präparatoren und Künstlern Adrie und Alfons Kennis.



Anthony Kenny
GESCHICHTE DER ABENDLÄNDISCHEN PHILOSOPHIE, 4 BÄNDE
Antike – Mittelalter – Neuzeit – Moderne
 2012, 1408 S. m. zahlr. SW-Abb., geb., Primus
Bestell-Nr. 3654
Einführungspreis € 99,90 (D), € 102,70 (A)
gültig bis 01.02.2013, danach kostet das Werk € 149,-
Die 4 Bände sind zum Preis von je € 49,90 auch einzeln erhältlich. Sparen Sie mit der günstigen Gesamtausgabe!

Diese Philosophiegeschichte setzt neue Maßstäbe! Dem britischen Philosophen Anthony Kenny ist etwas gelungen, wonach man im deutschen Sprachraum vergeblich sucht: eine ohne Vorkenntnisse verständliche, ja sogar unterhaltsam geschriebene Philosophiegeschichte von den Anfängen bis zur Gegenwart. In seinem vierbändigen Werk erzählt Kenny die Philosophiegeschichte. Dabei verbindet er gekonnt die Darstellung der Ereignisgeschichte und einzelner Denker mit einer Erläuterungen der Problemgeschichte und philosophischen Argumentation.

Portofreie Lieferung nach Deutschland und Österreich



Jürgen Beetz
1+1=10: MATHEMATIK FÜR HÖHLENMENSCHEN
 2012, X, 340 S. m. 100 Abb., kart., Spektrum
Bestell-Nr. 3731
€ 19,95 (D), € 20,60 (A)

Mehr als die einfache Logik eines Frühmenschen brauchen Sie nicht, um die Grundzüge der Mathematik zu verstehen. Denn Sie treffen in diesem Buch viele einfache, fast gefühlsmäßig zu erfassende mathematische Prinzipien des täglichen Lebens. Eine umfassende Übersicht über die »gesamte« Mathematik (definiert durch Abitur- bzw. Erstsemester-Level).



Alain Lieury
EIN GEDÄCHTNIS WIE EIN ELEFANT?
Tipps und Tricks gegen das Vergessen
 2012, 320 S. m. 57 SW-Abb., kart., Spektrum
Bestell-Nr. 3727
€ 19,95 (D), € 20,60 (A)

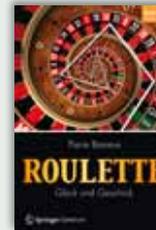
Humorvoll geschrieben und bestückt mit zahlreichen Beispielen bietet dieses heitere und zugleich lehrreiche Werk einen Überblick über die unterschiedlichen Bereiche der Gedächtnisforschung und Methoden zur Steigerung der Gedächtnisleistung.

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



Wolfgang W. Osterhage
STUDIUM GENERALE PHYSIK
Ein Rundflug von der klassischen bis zur modernen Physik
 2012, 288 S. m. 80 SW-Abb., 7 Tabellen., geb., Spektrum
Bestell-Nr. 3749
€ 24,95 (D), € 25,70 (A)

Dieses Buch nähert sich den großen Komplexen der Physik, ohne Spezialwissen vermitteln zu wollen. Dabei werden zunächst die Grundlagen der klassischen Physik erörtert: Mechanik, Elektrizitätslehre, Felder, Wellen und Wärmelehre. Auf dieser Basis werden dann die wesentlichen Erkenntnisse der Quantenphysik (Atomphysik, Kernphysik) einerseits und der Kosmologie (Relativitätstheorie) andererseits bis zum aktuellen Wissensstand entwickelt; ein Buch, geschrieben für alle, die in die Physik einsteigen oder sich (nochmal) einen Überblick verschaffen wollen – mit vielen weiterführenden Literaturhinweisen und Gedanken zum Weiterdenken.



Pierre Basieux
ROULETTE – GLÜCK UND GESCHICK
 2012, 450 S. m. 143 SW-Abb., geb., Spektrum
Bestell-Nr. 3743
€ 69,95 (D), € 72,- (A)

Mathematiker, hat die wissenschaftliche und praktische Erforschung dieses Spiels nicht nur einige Jahrzehnte als Hobby betrieben, sondern es auch revolutioniert. Über das bereits Bekannte hinaus enthält sein Buch vor allem a) entscheidende Ergänzungen, die bisher in Buchform absichtlich nicht preisgegeben wurden, b) neue praktische Aspekte, vor allem in den Bereichen Wurfweitenspiel und Kesselgucken, und c) wesentliche Vereinfachungen, die sich aus diesen neuen praktischen Erkenntnissen ergeben.



Gustave-Nicolas Fischer, Virginie Dodeler
WIE GEDANKEN UNSER WOHLBEFINDEN BEEINFLUSSEN
Auswirkungen der Psyche auf die Gesundheit
 2012, 288 S. m. 51 SW-Abb., kart., Spektrum
Bestell-Nr. 3726
€ 19,95 (D), € 20,60 (A)

Was heißt eigentlich »gesund sein«? Wenn es der Seele gut geht, so hat dies auch positive Auswirkungen auf das körperliche Wohlbefinden. Gustave-Nicolas Fischer und Virginie Dodeler stellen die wichtigsten 100 Aha-Experimente auf diesem Gebiet kurzweilig und anschaulich dar. Durch die daraus resultierenden erstaunlichen Entdeckungen wird jeder Leser den Einfluss der Psyche auf die Gesundheit noch besser verstehen. Dazu gibt es praktische Lösungsansätze zur Begleitung auf dem Weg zum physischen Wohlbefinden.



LERNPAKET EXPERIMENTE MIT DEM STIRLINGMOTOR

2012, Stirlingmotor, Generator, Steckbrett, 20 Bauteile und Handbuch, Franzis

Bestell-Nr. 3526 € 149,90

Dieses Franzis-Lernpaket enthält ein voll funktionsfähiges Stirlingmotor-Modell, einen elektrischen Generator, ein Experimentiersteckbrett und viele weitere Elektronikbauteile. Damit können Sie Funktionsweise und Einsatzmöglichkeiten des Stirlingmotors praktisch erfahren und erforschen. Das Modell ist komplett vormontiert und kann nach dem Zusammenbau des Brenners sofort in Betrieb genommen werden. Dazu brauchen Sie nichts weiter als handelsüblichen Brennspritus (nicht enthalten). Das Handbuch führt vom einfachen Bauteil zum fertigen Projekt. Die physikalischen Grundlagen und die unterschiedlichen Typen der Stirlingtechnik werden genau erklärt.



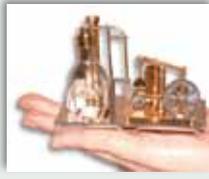
Ulrich E. Stempel

LERNPAKET EXPERIMENTE MIT ULTRASCHALL

2012, 2 Ultraschallsensoren, 2 Steckboards, Fledermausohr und viele Bauteile, Experimentierhandbuch mit 160 S., Franzis

Bestell-Nr. 3533 € 49,95 (D), € 49,95 (A)

Dieses Lernpaket vermittelt die Grundlagen der Ultraschalltechnik und führt Sie mit spannenden Experimenten zu vielen interessanten Einsatzmöglichkeiten. Große Vorbereitungen sind nicht notwendig – Sie können sofort loslegen und forschen. Dabei lernen Sie auch die Hintergründe praktischer Ultraschallanwendungen kennen, die aus unserem modernen Alltag nicht mehr wegzudenken sind – sei es in der Medizin oder im wissenschaftlich-technischen Bereich. Hier werden ständig neue, verblüffende und oft wegweisende Möglichkeiten entwickelt. Löten nicht erforderlich.



DAMPFMASCHINE »MINI BEAM« – FERTIGMODELL

Länge: 106 mm, Breite: 49 mm, Höhe: 73 mm (über Schornstein), Kolbendurchmesser: 7 mm, Hub: 7 mm, Steuerung: Schieber-

steuerung, doppelseitig wirkend, Gewicht: 96 g, Laufzeit: ca. 5 Min. mit einer Wasserfüllung, Hielscher

Bestell-Nr. 3535 € 149,50

Die ersten funktionsfähigen Dampfmaschinen, die um 1750 zum industriellen Einsatz kamen, waren Beam=Balken=Balance, alles Maschinen mit einem auf einer Mittelsäule liegenden Balken: sowohl die atmosphärische Dampfmaschine von Thomas Newcomen von 1712 als auch die Niederdruckmaschine von James Watt um 1769. Unser Modell, die kleinste, doppelseitig wirkende Beam-Dampfmaschine, wurde von Lutz Hielscher entwickelt. Mit Abdampfkondensator und aus Edelstahl, Messing und Aluminium.

Ebenfalls lieferbar als Bausatz:

DAMPFMASCHINE »MINI BEAM« – BAUSATZ

Bestell-Nr. 3536 € 136,50



PIEPEI GOLD

Das perfekte Frühstücksei für jeden Feinschmecker

Mit echtem Gold veredelt, Brainstream

Bestell-Nr. 2700

€ 24,90 (D), € 24,90 (A)

Einfacher und präziser können Frühstückseier nicht gekocht werden. Das PiepEi misst die Wassertemperatur und berechnet daraus über eine Differenzialgleichung die Innentemperatur im Ei. Erreicht die Temperatur im Eigelb 62°C, so erklingt eine Melodie. Man kann den Kochvorgang auch mit kaltem Wasser starten.

Bestellen ☎ +49 6221 9126-841
Sie direkt: @ info@science-shop.de



POWERLUX – LEUCHTLUPE KALTWEISS

Linsengröße: Ø 58 mm, cera-tec®, Vergrößerung:

28 dpt / 7x (Doppellinse), punktgenaue Ausleuchtung, Abschaltautomatik nach 30 Min., Lichtfarbe: kaltweiß, ca. 8000 K, Hartschaumetui. Benötigt werden 3 Mignon Batterien, im Lieferumfang enthalten, made in Germany, Eschenbach

Bestell-Nr. 3476 € 99,- (D), € 99,- (A)

Die neue Generation der Leuchtlupe – in einer neuen geometrischen Gestaltung. Die einzigartige und vertraute Form der Computermaus hat sich millionenfach bewährt und sorgt für eine entspannte Handhaltung auch bei längerem Gebrauch.

- liegt sehr gut in der Hand
- sehr einfache, intuitive Führung auf dem Lesegut durch kompakte Bauform
- gleichmäßig helle und blendfreie Ausleuchtung durch zwei SMD-LED

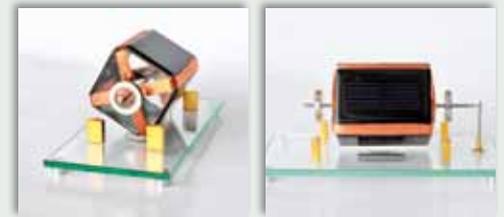


CAZORLA 8x56 PREMIUM Fernglas mit Tragetasche aus Nylon

Achtfache Vergrößerung, Öffnung: 56 mm, hohe Vergütung, Gewicht: 1150 g, Pentaflex

Bestell-Nr. 3665 € 189,-

Ein hochwertiges Allround-Fernglas für alle Naturfreunde: Für die Astronomie bis zur Tier- und Landschaftsbeobachtung geeignet. Dank rutschfester Gummiarmierung liegt es gut in der Hand und ist hervorragend gegen Feuchtigkeit geschützt.



MENDOCINO-MOTOR, FERTIGMODELL

Im Magnetfeld frei schwebender Solarmotor

Rotor aus Acrylglas, Bodenplatte aus Echtglas, Maße: 20x10x10 cm, Carl Aero

Bestell-Nr. 3652 € 159,-

Dieser Solar-Elektromotor ist eine Konstruktion, die schon auf den ersten Blick Aufmerksamkeit erregt. Oft wird erstaunt gefragt, wie sich ein solcher frei schwebender Körper überhaupt in Bewegung versetzt.

Der Motor verfügt über eine Lagerung aus sechs Hochleistungs-Neodym-Magneten. Dadurch scheint der Anker des Motors frei im Raum zu schweben. Der Anker selbst ist mit hocheffizienten monokristallinen Solarzellen bestückt. Diese liefern nur dann Strom, wenn sie sich im Lauf der Drehbewegung jeweils auf der Oberseite befinden. Die Kommutation dieses Motors findet auf optischem Weg statt.

Ein Video zum *Mendocino-Motor* finden Sie hier: www.science-shop.de/artikel/1156118

Ebenfalls lieferbar als Bausatz (Löten erforderlich):

Bestell-Nr. 3653 € 139,-

Die Wissensbecher aus hochwertigem Porzellan sind ein schönes und nützliches Geschenk!

Höhe: 105 mm; Inhalt: 460 ml, spülmaschinengeeignet, Könitz Porzellan



WISSENSBECHER MATHEMATIK

Bestell-Nr. 3430 € 9,95

WISSENSBECHER PHYSIK

Bestell-Nr. 3431 € 9,95

WISSENSBECHER CHEMIE

Bestell-Nr. 3432 € 9,95



STIRLING-AUTO A1 FERTIGMODELL

Schrauben aus Edelstahl, Seitenteile aus poliertem Edelstahl, Räder aus Vollmessing mit rundem Gummibelag, Gabel und Kühlergrill aus Aluminium, Maße: 13 x 16 x 8,7 cm, Gewicht: 1.200 Gramm, Böhmer

Bestell-Nr. 3475 € 398,- (D), € 398,- (A)

Robert Stirling, der Erfinder des Stirlingmotors, und Carl Benz haben eines gemein: Sie erhielten Patente für außergewöhnlich revolutionäre Technik. Im Stirling-Auto A1 wurden die Ideen dieser beiden Entwickler zusammengeführt. Die feinen Messingspitzen erinnern an die Pickelhauben aus der Kaiserzeit und an die historischen Automobile aus der Zeit um 1885.

Weitere Infos: www.science-shop.de/artikel/1130551

Hier können Sie auch einen Film über das Auto sehen.

Bequem bestellen:

→ direkt bei www.science-shop.de

→ per E-Mail info@science-shop.de

→ telefonisch +49 6221 9126-841

→ per Fax +49 711 7252-366

→ per Post Postfach 810680 • 70523 Stuttgart



LERNEN WIR VON SISYPHOS

Sandsteinobjekt

Zinkfigur von Hand gebogen, Sandsteinsockel von Hand gegossen, Größe: 11x20x3,5 cm (HxBxT), Gewicht: 620 g, invocem



Bestell-Nr. 3662 € 39,90

Aufgaben, die trotz großer Mühen so gut wie nie erledigt werden, nennt man Sisyphosarbeit. Das Objekt ist eine Erinnerung, größere Projekte in abgrenzbaren Schritten zu erledigen und diese Schritte immer wieder abzusichern. Diese Absicherung symbolisiert der in den Sockel eingelassene Keil.

Portofreie Lieferung nach Deutschland und Österreich

DON'T WORRY, BE HAPPY

Betonobjekt

Betonobjekt von Hand gegossen. Die in der Scheibe angedeuteten Mundwinkel können durch eine 180°-Drehung verändert werden, Größe: 10x17x4 cm (HxBxT), Gewicht: 500 Gramm, invocem

Bestell-Nr. 3663 € 29,90

Mundwinkel rauf – lassen Sie sich nicht unterkriegen!

Alle Fünfe mal gerade sein lassen, gelassen über Dinge hinwegsehen. Es ist nur ein einfacher Dreh. Und häufig sieht die Welt schon wieder anders aus ...



ALBERT-EINSTEIN-BÜSTE aus Biskuitporzellan

Höhe: 14,5 cm, in weißer Geschenkschachtel; Kämmer

Bestell-Nr. 3651 € 24,90

Ein Schmuckstück für Regal oder Schreibtisch!

Die 14,5 cm hohe Büste wird gegossen, bei 1350 Grad gebrannt und anschließend poliert. Durch das Polieren des Biskuitporzellans erhält die Büstenoberfläche einen feinen, seidenmatten Glanz. Made in Germany!



ZAHLEN AM LAUFENDEN METER

Albrecht Beutelspachers Mathezollstock

2012, Maße: 24 x 1,6 x 2,8 cm, Metermorphosen

Bestell-Nr. 3650 € 12,90

Der Mathe-Meterstab zeigt Wissenswertes und Überraschendes aus der Welt der Zahlen und Formeln am laufenden Meter: von Pythagoras über Archimedes und Gauß bis zu dem indischen Zahlengenie Ramanujan.



IPSOL 4/4S SOLAR

Ladeschale mit eingebautem 2400-mAh-Lithium-Polyme-Akku für Iphone 4/4S

mit Micro USB-Kabel, Farbe: schwarz, Inprosolar

Bestell-Nr. 3716 € 89,-

Die Ladeschale verschmilzt mit dem iPhone zur einer Einheit. Sie ist sehr ergonomisch in der Handhabung und löst mit dem zusätzlichen Energiespeicher jedes Problem des täglichen Nachladens.

Und wenn mal keine Energie in beiden Speichern vorliegt, sorgt das Solarmodul für eine vernünftige Notstromversorgung: **1 Stunde in der Sonne laden ermöglicht 1 Stunde telefonieren.**



DAS BAUMEISTERSPIEL KLASSIK

Unendliche Vielfalt

Format 12,5 x 12,5 cm, blaue Steine mit grauer Platte aus Recyclingkunststoff, Logika Spiele

Bestell-Nr. 3616 € 16,-

Acht verschieden gestaltete Bausteine, die jeder für sich aus mehreren Einzelwürfeln bestehen, werden auf einer Grundplatte zu den unterschiedlichsten Formen zusammengebaut. Mit seiner unerschöpflichen Vielfalt weckt es den Spielspaß und schult so spielerisch Gedächtnis, Konzentration, Geduld, Intelligenz und erst recht räumliches Vorstellungsvermögen, Fantasie, Intuition, laterales Denken. Für 1 Spieler.



NACHTSICHTGERÄT NIGHT EYE 3x42

Restlicht- und IR-Licht-Verstärker, Vergrößerung: 3-fach, Ø Objektiv: 42 mm. Benötigt wird eine CR123A-Batterie (nicht im Lieferumfang enthalten), Omegon

Bestell-Nr. 3655 € 199,-

Das Night Eye ist ein Restlichtverstärker und funktioniert mit einem Bildwandler, der das Licht um das etwa 1000-Fache verstärkt. Ist Restlicht vorhanden, sind Beobachtungen bis zu 200 Meter Distanz möglich. Und bei absoluter Dunkelheit wird mit einem weiteren Knopfdruck der IR-Licht-Verstärker eingeschaltet. Night Eye ist kompakt und mit einer Hand bedienbar.



DIE KNOTENBOX

50 Knoten-Klassiker für Freizeit, Sport und Alltag

Mit 2 Schnüren zum Üben in Metallbox, moses

Bestell-Nr. 3617 € 12,95

Der Seemann kann in jeder Lebenslage den richtigen Knoten knüpfen. Aber mit der Knotenbox lernen auch wir Landratten 50 bewährte Knoten mit Hilfe von 50 handlichen Karten und 2 Schnüren. Mit anschaulichen Schritt-für-Schritt-Abbildungen und wissenswerten Sachinformationen rund um Entstehung, Gebrauch und Anwendung der Knoten.

Von wegen ausgestorben! Diese coolen Tectors-Puzzles erwecken die Urzeitriesen wieder zum Leben: Die imposanten Gestalten aus der Urzeit müssen die Kinder zunächst aus vielen kleinen und großen Holzteilen zusammenstecken – ganz ohne Klebstoff und Werkzeug! Ab 8 Jahren

Die Dinosaurier haben einen eingebauten Motor und Geräusch-Sensor: Klatsche in die Hände und dein Tector-Saurier brüllt und läuft!



TECTOR STEGOSAURUS

3-D-Puzzle mit 75 Holzteilen, brüllt und läuft und reagiert auf Geräusche, Maße ca. 32x16 cm, man benötigt 3x1,5-V-AAA-Batterien (nicht enthalten), Moses

Bestell-Nr. 3744 € 24,95



TECTOR TRICERATOPS

3-D-Puzzle mit 75 Holzteilen, brüllt und läuft und reagiert auf Geräusche, Maße ca. 32x16 cm, man benötigt 3x1,5-V-AAA-Batterien (nicht enthalten), Moses

Bestell-Nr. 3745 € 24,95

VIDEO-HELICOPTER SAFARI RTF/ GSY/3+3CH/MHZ Mit abnehmbarer Kamera für Foto- und Videoaufnahmen und LED-Beleuchtung



LxBxH: 365x85x175 mm, Ø Hauptrotor: max. 360 mm / 70 mm, Fluggewicht: 270 g, Laden über beiliegendes Ladegerät, Controller mit 6x1,5-V-AAA-Batterien (nicht enthalten), Revell

Bestell-Nr. 3717 € 99,-

Ready-to-Fly-MHZ-Helikopter in auffälligem Design mit abnehmbarer Kamera für Foto- und Videoaufnahmen und über die Fernsteuerung schaltbarer LED-Beleuchtung. Der Helikopter hat sehr gute Flugeigenschaften durch das elektronische Kreiselsystem (Cyro) und ist gut beherrschbar. Das Laden erfolgt über das mitgelieferte Ladegerät. Indoor geeignet – Outdoor nur bei Windstille. Einsteigermodell, ab 15 Jahren.



DAS PRESTEL KUNSTSPIEL

Für die ganze Familie

2012, Spielplan mit Drehscheibe, 50 Bildkarten, 1 Holz-Spielfigur, 1 Holzwürfel, Säckchen mit Aufgabekarten, 5 Puzzles, Prestel

Bestell-Nr. 3682 € 24,99 (D), € 24,99 (A)

Die Scheibe drehen, schon geht es los: Theater, Pantomime, Gemälde beschreiben, Fragen beantworten. In diesem Spiel sind Fantasie und Vielseitigkeit gefragt, ein scharfes Auge und ein gutes Gedächtnis. Jedes Spielfeld steht für einen Bereich der Kunst und ist mit einer Aufgabe verbunden. Wer sie löst, erhält ein Puzzelstück. Doch wer Pech hat, kann es auch wieder verlieren. Gewinner ist, wer als Erster alle Teile seines Gemäldes zusammengepuzzelt hat. Ab 8 Jahren.

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

Bequem bestellen:

→ direkt bei www.science-shop.de

→ per E-Mail info@science-shop.de

→ telefonisch +49 6221 9126-841

→ per Fax +49 711 7252-366

→ per Post Postfach 810680 • 70523 Stuttgart



STERNZEIT

Kalendarium dtsh.-engl., 13 farb. Blätter, Maxi-Format: 70 x 50 cm, Palazzi Verlag

Bestell-Nr. 1335 € 44,80

Modernste Teleskope geben uns verblüffende Ausblicke und tiefe Einblicke in die Struktur und Entwicklung des Universums. Mit informativen Texten und Detail-Abbildungen.



HIMMEL UND ERDE

13 farb. Blätter, Format: 55,5 x 45,5 cm, Spiralbindung, Weingarten

Bestell-Nr. 1338 € 32,-

In diesem Kalender von *Sterne und Weltraum* präsentieren Astronomen zwölf faszinierende Aufnahmen von Sternen, Planeten und dem Weltraum. Das Kalendarium bietet zusätzlich Hinweise auf wichtige Himmelsereignisse im Jahr 2013.

Bestellen ☎ +49 6221 9126-841
Sie direkt: @ info@science-shop.de



NATURTAFELN

Mit Zweimonats-Kalendarium, 7 farb. Blätter, Format: 49,5 x 68,5 cm, DuMont

Bestell-Nr. 2878 € 26,99

Sechs Schreiber-Tafeln zu interessanten Wissensgebieten aus Flora und Fauna mit vielen detailge-

treuen Abbildungen befinden sich in diesem Kalender. Bleiben Sie ein Jahr lang der Natur auf der Spur!



WEGE

Kalendarium dreisprachig, mit Jahresübersicht, 13 farb. Blätter, Format: 48 x 54 cm, Ackermann

Bestell-Nr. 2433 € 29,95

Sie wissen doch: Der Weg ist das Ziel! Wege durch interessante Landschaften in den jeweiligen Jahreszeiten – wunderschön fotografiert.



VERBORGENE WELTEN

Kalendarium mehrsprachig, 13 farb. Blätter, Format: 49,5 x 68,5 cm, DuMont

Bestell-Nr. 2176 € 34,99

Entdecken Sie die Welt der Pflanzen, Insekten und Bakterien aus nächster Nähe. Die mehrfach ausgezeichneten Wissenschaftsfotografen Oliver Meckes und Nicole Ottawa führen Sie in die

Welt des Raster-Elektronenmikroskops. Wissenschaftliche Fotografien, abgerundet durch sachkundige und informative Texte.



STARKE TYPEN – WELT DER TIERE

Text dtsh.-engl.-französ., 13 farb. Blätter, Format: 60 x 50 cm, Palazzi-Verlag

Bestell-Nr. 3362 € 39,80

Wie viel Kraft und Lebensfreude, wie viel Charme und Witz diese Bilder vermitteln! 12 Glanzlichter der Tier-Fotografie als idealer Begleiter durch das Jahr.



WALD

14 farb. Blätter, Format: 48 x 54 cm, Ackermann

Bestell-Nr. 3674 € 29,95

Ob mystischer Urwald oder herbstliche Baumkronen in voller Farbenpracht – in den Bildern dieses Kalenders offenbart sich die Vielfalt des Ökosystems Wald in seiner ganzen Pracht.



VOM ZAUBER ALTER BÄUME

Kalendarium dreisprachig, 13 kolorierte SW-Blätter, Format: 58,4 x 48,5 cm, DuMont

Bestell-Nr. 3361 € 26,99

Zwölf verwitterte und steinalte Baumriesen präsentieren sich in ihrer ganzen Ehrwürdigkeit und Imposanz. Heinz Wohner hat sie in Deutschland aufgespürt, fotografiert, und anschließend die SW-Fotografien kunstvoll von Hand koloriert.



EULEN

Kalendarium dtsh.-engl.-französ., 13 farb. Blätter, Format: 45 x 34,5 cm, Weingarten

Bestell-Nr. 2185 € 19,95

Diese scheuen Nachtvögel gehören von Anbeginn zum Kreis der Geschöpfe, die den Menschen von besonderer Bedeutung waren, ob als Symbol für Weisheit (bei den alten Griechen) oder Tod und Verderben (bei den Christen).



EINSTEIN FÜR QUANTEN-DILETTANTEN

Ein vergnüglicher Crashkurs in Sachen Naturwissenschaften

320 zweifarb. Bl., 12,5 x 16 cm, Harenberg

Bestell-Nr. 3093 € 15,99

Täglich spannende Erklärungen aus Biologie, Physik, Chemie usw. Verblüffend leicht verständlich!



SIMPLIFY YOUR DAY

Einfacher und glücklicher leben

320 Bl. m. Cartoons, 12,5 x 16 cm, Campus

Bestell-Nr. 2174 € 12,99

Schluß mit der Kompliziertheit des Lebens. Die Fülle praktischer und sofort umsetzbarer Tipps sowie die liebevollen Zeichnungen von Werner Tiki Küstenmacher sorgen für die tägliche Leichtigkeit des Seins.

Weitere Kalender finden Sie unter:
www.science-shop.de/kalender

Bequem bestellen:

→ direkt bei
www.science-shop.de

→ per E-Mail
info@science-shop.de

→ telefonisch
+49 6221 9126-841

→ per Fax
+49 711 7252-366

→ per Post
Postfach 810680 • 70523 Stuttgart



Robert Winston
COOLE EXPERIMENTE FÜR ZU HAUSE
 2012, 144 S. m. 350 Farbabb. u. Zeichn., geb., ab 8 Jahren, Dorling Kindersley
Bestell-Nr. 3626
 € 14,95 (D), € 15,40 (A)

Leuchtende Götterspeise, »Elefantenzahnpasta«, ein Vulkanausbruch in der Küche – dieses Buch steckt voller faszinierender Versuche, die sich leicht zu Hause umsetzen lassen. Mit Kurzporträts großer Wissenschaftler – die ideale Ergänzung zum Schulunterricht!



DAS GRÖSSTE ORIGAMI-BUCH ALLER ZEITEN
 12 extragroße Faltblätter inklusive
 2012, 24 S. m. zahlr. Farbabb., kart., Frech
Bestell-Nr. 3746
 € 9,99

Buch aufklappen und loslegen: Alle Faltmodelle sind Schritt für Schritt erklärt und illustriert. Plus: 12 gemusterte Faltblätter zum Heraustrennen und sofort Losfalten.



Jürgen Brater
WAS MACHT DER U-BAHN-FAHRER, WENN ER AUF TOILETTE MUSS?
 66 blitzgescheite Fragen rund um Alltag, Menschen und Tiere
 2012, 159 S. m. zahlr. Farbfotos., ab 10 Jahren, geb., Beltz

Bestell-Nr. 3741 € 14,95 (D), € 15,40 (A)

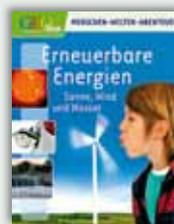
Was macht der U-Bahn-Fahrer, wenn er auf Toilette muss? Vergiftet sich die Kobra, wenn sie auf ihre Zunge beißt? Wie heißt Barbie mit Nachnamen? Ob Naturwissenschaften, Alltag, Redewendungen oder Comics – Jürgen Brater hat sich unter Kindern umgehört und die interessantesten Fragen gesammelt, um sie verständlich, unterhaltsam und fundiert zu beantworten.



Carmen Skupin
ABENTEUER ELEKTRONIK
 2012, Set aus Bauteilen und Buch, 24 S. m. zahlr. farb. Abb., ab 8 Jahren, Franzis
Bestell-Nr. 3742
 € 29,95 (D), € 29,95 (A)

Ob drinnen oder draußen, bei Tag oder Nacht, in diesem Set aus Buch und Bauteilen finden Kinder ab 8 Jahren immer das richtige Elektronikabenteuer.

Das Einzigartige an diesem Bastelbuch: alle elektrischen Teile sind bereits enthalten und die restlichen Materialien lassen sich in jedem Haushalt finden. Carmen Skupin will mit diesem Experimentierbuch Mädchen und Jungen für Elektronik begeistern.



Felix Homann
ERNEUERBARE ENERGIEN Sonne, Wind und Wasser
 1. Aufl. 2012, 64 S. m. zahlr. Farbabb., ab 9 Jahren, geb., Kosmos
Bestell-Nr. 3736
 € 12,95 (D), € 13,40 (A)

Woher kommt in Zukunft unser Strom? Eine viel diskutierte Frage und Ausgangspunkt für zahlreiche neue Entwicklungen. Schließlich brauchen wir Energiequellen, die umweltfreundlich und unendlich nutzbar sind, und neue Technologien, die uns ermöglichen, daraus Strom zu gewinnen.



SPIONE Agenten, Codes und Überwachung
 2012, 192 S., über 1000 Farbfotografien, Zeichnungen und Grafiken, ab 10 Jahren, geb., Dorling Kindersley
Bestell-Nr. 3739
 € 16,95 (D), € 17,50 (A)

Woran erkennt man einen Spion? Wie knackt man verschlüsselte Nachrichten? Welche besonderen Fähigkeiten braucht man als Agent und welche Tricks gibt es? Dieses Buch enthüllt alles über Top-Spione und deckt ihre verborgenen Überwachungsmethoden auf.



SMARTPHONES, GAMES & INTERNET
 So spannend ist die digitale Welt
 2012, 144 S., über 500 Farbfotografien und Grafiken., ab 10 Jahren, geb., Dorling Kindersley
Bestell-Nr. 3738
 € 16,95 (D), € 17,50 (A)

Eine Einführung in die Welt des Internets, der Computer, Videospiele, Hightech-Geräte und Roboter.

Auf spannende Weise erfahren Kinder mehr über die Entwicklung, Vielfalt und technischen Details moderner Hightech-Geräte. Porträts bekannter Erfinder, interessante Grafiken und Teilansichten elektronischer Geräte vermitteln das Wissen einfach und leicht verständlich.

Portofreie Lieferung nach Deutschland und Österreich



KALENDER FÜR CLEVERE KIDS
 Der Kinder Brockhaus
 320 zweifarb. Bl., 12,5 x 16 cm, ab 8 Jahren, Brockhaus
Bestell-Nr. 1309 € 10,99

Der tägliche Kick für schlaue Kinder: Spannende Fakten, atemberaubende Rekorde und witzige Anekdoten, Rezepte und Experimente, knifflige Rätsel, exotische Tiere, vom WWF vorgestellt.



WISSEN FÜR KIDS
 320 vierfarb. Bl., 12,5 x 16 cm, ab 10 Jahren, Harenberg
Bestell-Nr. 2870 € 12,99

Eine spannende Entdeckungsreise durch die Welt des Wissens. Farbenfrohes, kindgerechtes Layout.

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



BESTELLCOUPON

Gleich bestellen! Einfach Bestellcoupon kopieren und faxen an: 0711/7252-366 oder ausschneiden und per Post schicken: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH • Science-Shop • Postfach 810680 D-70523 Stuttgart. Schicken Sie eine E-Mail an: info@science-shop.de oder rufen Sie an unter: 06221/9126-841.

JA, ich bestelle und habe 14 Tage volles Rückgaberecht

Anzahl	Bestell-Nr.	Titel	€

Besteller-Anschrift:

Name/Vorname _____ Straße/Hausnummer _____
 Datum/Unterschrift _____ E-Mail-Adresse _____

Zahlung per Bankeinzug

Geldinstitut/Ort _____
 Konto-Nr. _____
 BLZ _____
 Datum/Unterschrift _____

Zahlung per Rechnung

PLZ/Wohnort _____
 Kunden-Nr. (falls vorhanden) _____ XMAS12SDW

Warum wir in der Sauna überleben

Schweiß kühlt. Doch genau dann, wenn er uns in der Sauna in wahren Sturzbächen am Körper herabströmt, erhitzt sich in Wahrheit der Körper.

VON H. JOACHIM SCHLICHTING

100 Grad Celsius – das ist keine Wohlfühltemperatur. Nicht einmal den kleinen Finger würden wir in kochendes Wasser stecken. Und doch: In der Sauna halten wir es bei 100 Grad eine Viertelstunde lang recht gut aus. Rohen Eiern erginge es bei diesen Lufttemperaturen ganz anders: Sie würden bald hart gekocht, auch wenn es länger dauert als gewohnt. Sogar ein Steak ließe sich, allerdings mit zweifelhaftem geschmacklichem Ergebnis, in der Sauna garen. Ein saunierender Mensch übersteht die Hitze hingegen unbeschadet. Warum?

Für Spekulationen, denen zufolge kochendes Wasser und 100 Grad heiße Saunaluft auf mysteriöse Weise vielleicht doch unterschiedlich heiß sein könnten, gibt es keinerlei Grund. 100 Grad sind 100 Grad, ob im Wasser oder in der Luft. Die thermische Wirkung eines Mediums auf einen Organismus hängt eben nicht nur von seiner Temperatur ab. Die weiß glühenden Eisen-

teilchen, die beim Schleifen eines Meißels auf die bloße Hand prasseln, sind über 1000 Grad heiß. Auf der Haut rufen sie jedoch nur leichtes Prickeln hervor, weil ihre innere Energie wegen ihrer geringen Masse so gering ist, dass sie nicht viel Wärme abgeben können.

Entscheidend für die Schädigung eines Organismus ist der Energiestrom, also die pro Zeiteinheit aufgenommene Energiemenge. Er ist umso größer, je stärker sich die Temperatur zwischen heißem Medium und Organismus unterscheidet. Wie viel Energie aber tatsächlich in Letzteren strömt, hängt neben dem jeweiligen Konvektionsverhalten von Luft und Wasser vor allem von der Wärmeleitung sowie vom Energiespeichervermögen des Mediums ab, also von seiner Wärmekapazität.

Wasser und Luft unterscheiden sich hier deutlich. Luft leitet Wärmeenergie nur sehr schlecht (weshalb sie einer der besten thermischen Isolatoren ist). Zudem kann sie nur wenig Wärmeenergie speichern: Um ein bestimmtes Volumen an Wasser um ein Grad Celsius zu erwärmen, braucht man etwa 3000-mal so viel Energie wie für dasselbe Volumen an Luft. Beide Faktoren zusammen führen dazu, dass unser Körper in einer 100 Grad heißen Sauna viel weniger Energie aufnimmt als ein Körperteil, das versehentlich in kochendes Wasser gerät.

Für eine typische finnische Sauna, die auch durchaus mal mitten in der Landschaft stehen kann, sind Lufttemperaturen um 100 Grad Celsius nicht ungewöhnlich.

Denn es wäre ein Fluidum möglich, das alle hinzudringende Wärme durch Verdampfung verlöre.

Georg Christoph Lichtenberg
(1742–1799)

Doch auch in der Sauna ist nicht alles heiße Luft. Das gläserne Thermometer und erst recht das Metallgehäuse des Feuchtigkeitsmessers sollte man tunlichst nicht berühren. Selbst der direkte Kontakt mit Holzbänken und -wänden kann anfangs ganz schön unangenehm sein. Ein flauschiges Handtuch hingegen, auf dem man sitzt, isoliert durch die in seinen Gewebeporen eingeschlossenen Luftbläschen gegen die Hitze.

Was die heiße Luft nicht sofort schafft, erreicht sie aber doch mit der Zeit. So wie die rohen Eier allmählich gekocht werden, empfindet auch unser Körper den Aufenthalt in der Sauna bald als unerträglich. Bei Lufttemperaturen um 100 Grad, wie sie für die so genannte finnische Sauna typisch sind, räumen die meisten Menschen nach 15 bis 20 Minuten unweigerlich das Feld.

Dass wir es überhaupt so lange aushalten, verdanken wir dem Schwitzen. Durch feine Poren der Haut sondern wir Schweiß ab, ein zu 99 Prozent aus Wasser bestehendes Sekret. Anschließend verdampfen oder verdunsten die Schweißtröpfchen auf der Haut. Die dafür benötigte Energie entziehen sie dem Körper und kühlen ihn dadurch. (Von Verdunsten spricht man, wenn die Verdampfung bei einer niedrigeren als der Siedetemperatur erfolgt.)

Zusätzlichen Schutz bietet eine isolierende Luftschicht von wenigen Millimetern Dicke, die von Poren und Härchen des Körpers gewissermaßen festgehalten wird. Auch wenn sie unsichtbar bleibt, lässt sich ihre Existenz leicht testen. Denn spätestens, wenn man sich Luft zuwedelt, wird diese Isolier-



DREAMSTIME / ANINIARPONEN



ISTOCKPHOTO / MICHAEL KEATNER

Verdunstende Schweißtröpfchen entziehen der Haut Wärme. Die Kühlwirkung endet, wenn die Luft wassergesättigt ist.

schicht durch äußere Luftströmungen lokal aufgebrochen. Dann fühlt man sofort, wie der Körper in direkten Kontakt mit der heißen Luft gerät und der in den Körper fließende Energiestrom ansteigt.

Die Energie fließt in den Dampf

Entscheidend für die Kühlwirkung des Schweißes sind die großen Energiemengen, die beim Übergang vom flüssigen in den gasförmigen Zustand im Spiel sind. Die Verhältnisse beim Sieden von Wasser führen das vor Augen. Auch wenn eine Herdplatte mit aller Kraft heizt, beträgt die Temperatur von kochendem Wasser konstant 100 Grad. Denn der Energiestrom lässt jetzt nicht mehr die Temperatur steigen, sondern dient ausschließlich der Verdampfung. Dass die Menge des flüssigen Wassers dennoch nur sehr langsam abnimmt, bedeutet nichts anderes, als dass die Energie, die es zum Verdampfen benötigt, eben sehr groß ist. Bei einer Hauttemperatur von rund 40 Grad Celsius bedarf es zum Verdunsten sogar noch ein wenig mehr Energie. So erklärt sich, warum auch die eher geringen Schweißmengen auf unserem Körper sehr viel Energie aufnehmen können und so zumindest eine Zeit lang verhindern, dass die Körpertemperatur steigt.

Andererseits ist gerade ein schweißtriefender Körper kein Zeichen für effektives Schwitzen. In solchen Fällen ist

die relative Luftfeuchte zu hoch, als dass der Schweiß überhaupt verdampfen könnte. Indem man die Temperatur erhöht, steigert man die maximal mögliche Luftfeuchte. Angenommen, in einer Sauna herrscht anfangs bei einer relativen Luftfeuchte von 100 Prozent eine Temperatur von 20 Grad. Wenn wir die Temperatur auf 100 Grad erhöhen, sinkt die Luftfeuchte auf gerade noch drei Prozent. In derart trockener Luft verdunstet der Schweiß im Nu, mit entsprechender Kühlwirkung. So kann man es schon einige Zeit aushalten.

Jeder Aufguss verändert die Situation aber völlig. Die durch das Schwitzen gekühlte Haut nimmt in einer finnischen Sauna eine Temperatur von typischerweise etwa 43 Grad an. (Damit ist sie übrigens der kühlste Ort im Raum, deutlich kühler noch als die Wände und die Scheibe in der Saunatur!) Trifft nun Wasser auf die heißen Steine des Saunaofens, entsteht sehr schnell sehr viel Wasserdampf, der die Luftfeuchte auf einen Schlag erhöht.

Die meisten Menschen sehen diesen Augenblick, in dem sie eine bis ans Unerträgliche reichende Hitze spüren und der Körper regelrecht vor Wasser trieft, als Zeichen für höchste Temperatur und für Rekordwerte beim Schwitzen. Tatsächlich tritt der gegenteilige Effekt ein. Weil die Luftfeuchte nun maximal ist, kommt das Schwitzen sogar zum Stillstand. Mehr noch: Der Dampf in der Luft kühlt an der Haut so stark ab, dass er kondensiert; der Mensch beschlägt wie eine kalte Fensterscheibe. Die Kondensationswärme wird dabei direkt auf der Haut frei und geht un-

mittelbar auf den Körper über. Der Prozess, bei dem Wärmeenergie durch verdampfenden Schweiß »unschädlich« gemacht wird, kehrt sich also letztlich um.

Hinzu kommt die Wärmeübertragung durch die heiße Luft. Sie ist intensiver als zuvor, denn der über dem Saunaofen turbulently aufsteigende Wasserdampf hat die Luft in Aufruhr gebracht. Dadurch zerstört er auch die den Körper umgebende Isolierschicht, so dass heiße Luft und heißer Wasserdampf jetzt unmittelbar auf die Haut gelangen.

Mit dem Aufguss endet also in Wahrheit das Schwitzen – aber die Hitze beginnt. ∞

DER AUTOR



H. Joachim Schlichting war bis 2011 Direktor des Instituts für Didaktik der Physik an der Universität Münster. 2008 erhielt er für seine didaktischen Konzepte den Pohl-Preis der Deutschen Physikalischen Gesellschaft.

QUELLE

Vesala, T.: Phase Transitions in Finnish Sauna. In: Kulmala, M., Wagner, P.E. (Hg.): Nucleation and Atmospheric Aerosols. Proceedings of the 14th International Conference on Nucleation and Atmospheric Aerosols, S. 403–406, Pergamon 1996

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1165736



Menschliche Gemeinschaften sind auf die möglichst reibungslose Zusammenarbeit vieler Individuen angewiesen.

STOCKPHOTO / MATT JERCOCK

KOOPERATION

Warum sind wir hilfsbereit?

Die biologische Evolution wird keineswegs nur durch Konkurrenz und Egoismus vorangetrieben. Als ebenso wichtig im Kampf ums Dasein erweist sich die Kooperation der Individuen.

Von Martin A. Nowak

Nachdem im März 2011 mehrere Reaktorblöcke des japanischen Atomkraftwerks Fukushima Daiichi nach einem schweren Erdbeben und einer Tsunami-Flutwelle durch katastrophale Kernschmelze zerstört worden waren, erklärte sich ein junger Arbeiter freiwillig bereit, in die havarierte Anlage zurückzukehren und mitzuhelfen, die Lage unter Kontrolle zu bringen. Wie er wusste, herrschten im Innern so hohe Strahlungswerte, dass er wohl niemals gesunde Kinder würde zeugen können. Dennoch drang er durch die Tore von Fukushima in die strahlenverseuchte Luft vor und machte sich ans Werk, ohne dafür mehr als den normalen bescheidenen Arbeitslohn zu erwarten. »Es gibt nur wenige unter uns, die diese Aufgabe erledigen können«, erklärte der Arbeiter, der anonym bleiben wollte, im Juli 2011 der britischen Zeitung »The Independent«. »Ich bin jung und unverheiratet, und ich halte es für meine Pflicht, dieses Problem zu lösen.«

Das mag wie ein rarer Fall von beispielhaftem Heldentum anmuten, doch die Natur kennt viele Beispiele für selbstloses Verhalten. Die Zellen im Organismus stimmen sich ab, um ihre Teilung zu begrenzen und so die Entstehung von Krebs zu vermeiden; viele Arbeiterameisen opfern ihre Fruchtbarkeit, um ihrer Königin und der Kolonie zu dienen; Löwinnen säugen andere Jungen innerhalb des Rudels. Wir Menschen helfen einander in besonders vielfältiger Weise – von der Nahrungs- und Partnersuche bis zur Verteidigung des Territoriums. Selbst wenn die Helfer nicht unbedingt gleich ihr Leben aufs Spiel setzen, riskieren sie doch eine Verringerung des eigenen Reproduktionserfolgs zu Gunsten eines anderen Individuums.

Jahrzehntelang haben sich Biologen über das Phänomen Kooperation den Kopf zerbrochen und verzweifelt versucht, es mit der vorherrschenden Deutung der Evolution als Kampfs aller gegen alle zu vereinbaren. Als Charles Darwin die Evolution durch natürliche Zuchtwahl erklärte – wonach sich Individuen mit vorteilhaften Eigenschaften öfter fortpflanzen als ihre Artgenossen und deshalb mehr zur nächsten Generation beitragen –, nannte er diesen Wettstreit den »Kampf ums Dasein« (struggle for life). Wenn man diesen Ausdruck wörtlich nimmt und als Handlungsnorm auf die Spitze treibt, führt das rasch zu dem Schluss, man solle nie-

mals einem Rivalen helfen, sondern hemmungslos lügen und betrügen, um voranzukommen. Um im Spiel des Lebens zu gewinnen, wäre jedes Mittel recht.

Aber warum ist selbstloses Verhalten dann so allgegenwärtig? In den vergangenen zwei Jahrzehnten habe ich dieses scheinbare Paradoxon mit den Mitteln der Spieltheorie untersucht. Das Ergebnis: Kooperation und Konkurrenz sind keine Gegensätze, sondern haben von Anfang an die Evolution des Lebens auf der Erde geprägt – von den ersten Zellen bis zum *Homo sapiens*. Dahinter steckt nicht nur der rücksichtslose Kampf ums Überleben, sondern ebenso auch die Anpassung an die von Artgenossen geprägten Lebensumstände. Und nirgends macht sich der evolutionäre Einfluss der Kooperation stärker bemerkbar als bei uns Menschen. Meine Resultate unterstreichen, dass gegenseitige Hilfe nicht nur in der Vergangenheit der Schlüssel zu unserem Erfolg war, sondern auch über unsere Zukunft entscheidet.

Gegner oder Partner?

Für das Thema begann ich mich 1987 zu interessieren, als ich an der Universität Wien Mathematik und Biologie studierte. Bei einer Alpenwanderung mit Kollegen und Professoren erfuhr ich von einem als Gefangenendilemma bekannten Paradoxon der Spieltheorie, das sehr schön illustriert, warum Kooperation die Evolutionsbiologen so verwirrt. Das Dilemma lautet folgendermaßen: Angenommen, zwei Personen

AUF EINEN BLICK

GROSSMUT UNTER EGOISTEN

1 Nach gängiger Meinung herrscht in der Natur ein gnadenloser Kampf um Leben und Tod. Doch tatsächlich ist auch **Kooperation** eine treibende Kraft der Evolution.

2 Es gibt **fünf Mechanismen**, durch die Kooperation in und zwischen verschiedenen Organismen entsteht – von Bakterien bis zu Menschen.

3 Insbesondere der Mechanismus der **indirekten Reziprozität** macht uns Menschen hilfsbereit. Er beruht auf Reputation: Wer sich einen guten Ruf als Altruist erwirbt, dem wird umgekehrt auch bevorzugt geholfen.

wurden festgenommen und erwarten Gefängnisstrafen, weil sie gemeinsam ein Verbrechen begangen haben. Der Staatsanwalt vernimmt sie getrennt und schlägt jedem einen Deal vor. Wenn der eine den anderen verrät, während dieser dichthält, bekommt der Belastungszeuge nur ein Jahr aufgebremmt, während der verstockte Mittäter satte vier Jahre Gefängnis einfährt. Wenn beide zusammenhalten und einander nicht verpfeifen, kommen beide mit je zwei Jahren davon. Doch wenn beide sich gegenseitig belasten, werden sie zu je drei Jahren verurteilt.

Da jeder Gefangene separat vernommen wird, weiß keiner der beiden, ob sein Partner ihn verraten oder decken wird. Wenn man die möglichen Ergebnisse auf einer Auszahlungsmatrix einträgt (siehe Kasten auf gegenüberliegender Seite), erkennt man, dass es vom Standpunkt des Einzelnen aus am besten ist, nicht zu kooperieren, sondern den Partner anzuschwärzen. Doch sofern beide Parteien derselben Überlegung folgen und Verrat üben, erzielen sie nur das drittbeste Ergebnis – je drei Jahre Haft – an Stelle der zwei Jahre, die sie bekämen, wenn sie miteinander kooperierten.

Das Gefangenendilemma faszinierte mich sofort, da sich an diesem Modell die Beziehung zwischen Konflikt und Kooperation erforschen ließ. Mein Doktorvater Karl Sigmund und ich entwickelten schließlich Computersimulationen des Dilemmas für große Gemeinschaften von »Gefangenen«. An ihnen konnten wir beobachten, wie sich die individuellen Strategien in diesen Gemeinschaften von Verrat zu Kooperation und zurück zu Verrat entwickelten, wobei sie Zyklen von Wachstum und Abnahme durchliefen. Mit Hilfe der Simulationen entdeckten wir schließlich einen Mechanismus, der die Vorliebe der natürlichen Selektion für selbstsüchtiges Verhalten zu überwinden vermag und mögliche Verräter zur Hilfsbereitschaft bekehrt.

Wie du mir, so ich dir

Wir begannen mit einer Zufallsverteilung von Abtrünnigen und Kooperatoren. Nach jeder Spielrunde setzten die Gewinner Nachkommen in die Welt, die an der nächsten Runde teilnahmen. Die Nachkommen behielten größtenteils die Strategie ihrer Eltern bei – bis auf gelegentliche Zufallsmutationen, welche die individuelle Strategie veränderten. Im Lauf der Simulation beobachteten wir schon nach wenigen Generationen, dass in jeder Spielrunde sämtliche Individuen abtrünnig wurden. Doch nach einiger Zeit tauchte plötzlich eine neue Strategie auf: Manche Spieler begannen zusammenzuarbeiten und kopierten von da an Zug um Zug ihren Gegenspieler – nach der Devise »Wie du mir, so ich dir« (tit for tat). Der Strategiewechsel führte rasch zu Gemeinschaften, in denen Kooperation dominierte.

Diese Entwicklung von Kooperation zwischen Individuen, die einander wiederholt begegnen, beruht auf so genannter direkter Reziprozität. Vampirfledermäuse bieten ein gutes Beispiel dafür. Falls eine Fledermaus eines Nachts keine Gelegenheit hatte, sich direkt an lebender Beute gütlich zu tun, bettelt sie ihre satten Artgenossen im Schlafplatz an. Wenn



sie Glück hat, wird ein Mitbewohner seine Blutmahlzeit mit ihr teilen, indem er etwas davon ins Maul des hungrigen Tiers erbricht. Da Vampire in stabilen Gruppen leben und jeden Tag nach der Jagd zum Schlafplatz zurückkehren, begegnen sich die Gruppenmitglieder andauernd wieder. Beobachtungen zufolge merken sich die Fledermäuse, wer ihnen in Zeiten der Not aushalf, und wenn eines Tages der großzügige Artgenosse Hunger leidet, revanchiert sich vorzugsweise das Tier, dem er einst beigestanden hat, für die damalige Wohltat.

Besonders interessant an unseren ersten Computersimulationen war die Erkenntnis, dass es mehrere Arten von direkter Reziprozität gibt. Innerhalb von 20 Generationen wurde die anfängliche Tit-for-tat-Strategie von einer großzügigeren abgelöst, bei der die Spieler mitunter auch dann weiter kooperierten, wenn ihr Rivale sie verraten hatte. Wir wurden praktisch Zeuge der Evolution von Nachsicht – einer direkt-reziproken Strategie, bei der die Spieler einen gelegentlichen Fehler verzeihen.

Außer der direkten Reziprozität identifizierte ich später noch vier andere Mechanismen für die Evolution von Kooperation. Alle in den tausenden Fachartikeln, die Wissenschaftler zu dem Thema schon publiziert haben, beschriebenen Szenarien fallen unter eine oder mehrere dieser fünf Kategorien.

Auf eine zweite Art kann Kooperation in einer Population Fuß fassen, wenn Kooperatoren und Abtrünnige nicht gleichförmig verteilt sind; man spricht dann von räumlicher Selektion. Da Nachbarn – oder Freunde in einem sozialen Netzwerk – einander bevorzugt helfen werden, bilden lokal gehäufte Kooperatoren in einer Population bald wachsende Cluster, die sich im Wettbewerb mit Abtrünnigen behaupten können. Räumliche Selektion funktioniert schon bei einfachen Organismen. Kooperierende Hefezellen erzeugen unter individuellem Aufwand ein Enzym, das zum Verdauen von Zucker dient. Abtrünnige Konkurrenten schmarotzen an den Enzymen der Kooperatoren, statt selbst welche zu produzieren. Wie Jeff Gore vom Massachusetts Institute of Technology und unabhängig davon Andrew Murray von der Harvard University herausgefunden haben, dominieren in gut durchmischten Hefekulturen die Abtrünnigen. Hingegen setzen

sich in inhomogenen Populationen mit Klumpen von Kooperatoren und Schmarotzern die uneigennütigen Enzymproduzenten durch.

Ein unmittelbar einsichtiger weiterer Mechanismus für die Evolution von Selbstlosigkeit ist die Kooperation zwischen genetisch verwandten Individuen, die so genannte Verwandtenselektion. Individuen bringen Opfer für ihre Verwandten, weil sie gemeinsame Gene tragen. Zwar mindert jemand, der einem Verwandten in Not beisteht, vielleicht die eigene reproduktive Fitness, doch dafür fördert er die Verbreitung der Gene, die Helfer und Hilfspfänger gemeinsam haben. Der britische Biologe J. B. S. Haldane (1892–1964), der erstmals von Verwandtenselektion sprach, fasste die Idee in die Worte: »Ich werde in den Fluss springen, um zwei Brüder oder acht Cousins zu retten.« Damit meinte er die Tatsache, dass unsere Geschwister 50 Prozent unserer DNA mit uns teilen, unsere Cousins ersten Grades 12,5 Prozent. Allerdings lassen sich die Fitnesseffekte der Verwandtenselektion nicht so einfach berechnen, wie viele Forscher dachten. Meine Kollegen und ich haben kürzlich eine lebhaftige Debatte über die der Theorie zu Grunde liegende Mathematik ausgelöst. Wir kommen zu dem Schluss, dass in vielen Fällen von vermeintlicher Verwandtenselektion in der Tat Gruppen-selektion – siehe weiter unten – vorliegt.

Der vierte Mechanismus, der das Entstehen von Kooperation fördert, ist die indirekte Reziprozität; sie unterscheidet sich grundlegend von der direkten Variante, die Sigmund und ich ursprünglich untersuchten. Bei der indirekten Reziprozität hilft ein Individuum dem anderen, um die eigene Reputation zu steigern. Wer den Ruf genießt, andere zu unterstützen, wenn sie in Not geraten, wird selbst eher in den Genuss fremder Hilfe kommen, falls ihn einmal sein Glück verlässt. Nach der engen Tit-for-tat-Strategie würde jeder auf dem Standpunkt stehen: Ich kraule deinen Rücken nur, wenn du meinen kraulst. Jetzt aber lautet die Devise: Ich kraule dir den Rücken, und irgendwer wird dann schon meinen kraulen. Beispielsweise verbessern Japanmakaken, die hochrangige und mit guter Reputation ausgestattete Gruppenmitglieder putzen, die eigene Reputation – und empfangen mehr Putzzuwendung – einfach dadurch, dass sie einträchtig zusammen mit dem Alphatier gesehen werden.

Einer für alle ...

Schließlich können Individuen selbstlose Akte zu Gunsten der ganzen Gruppe vollziehen. Dieser fünfte Weg zur Kooperation heißt Gruppenselektion. Schon Charles Darwin zog diesen Mechanismus in Betracht, als er 1871 in seinem Buch »Die Abstammung des Menschen und die geschlechtliche Zuchtwahl« argumentierte: »Ein Stamm, welcher viele Glieder umfasst, die ... stets bereit sind, einander zu helfen und sich für das allgemeine Beste zu opfern, wird über die meisten anderen Stämme den Sieg davontragen, und dies würde natürliche Zuchtwahl sein.« Seither streiten die Biologen heftig darüber, ob die natürliche Selektion Kooperation zu fördern vermag, um die Reproduktionschancen der ganzen

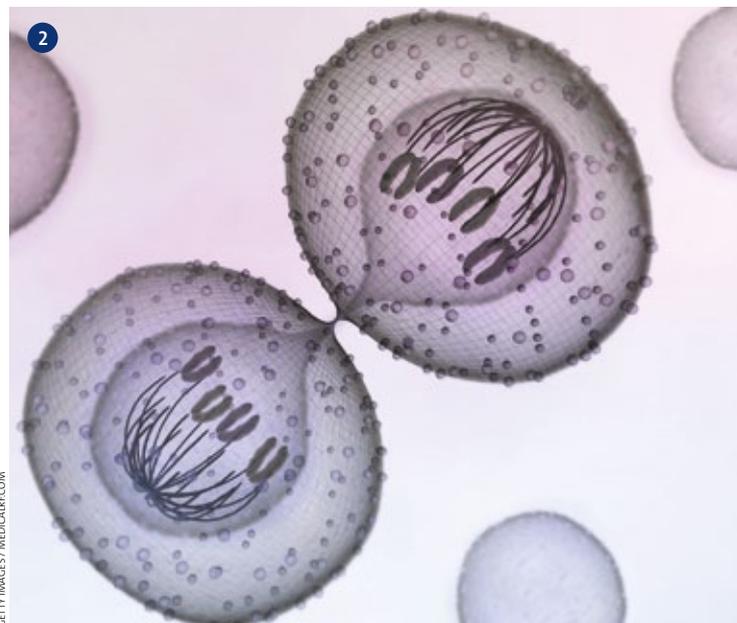
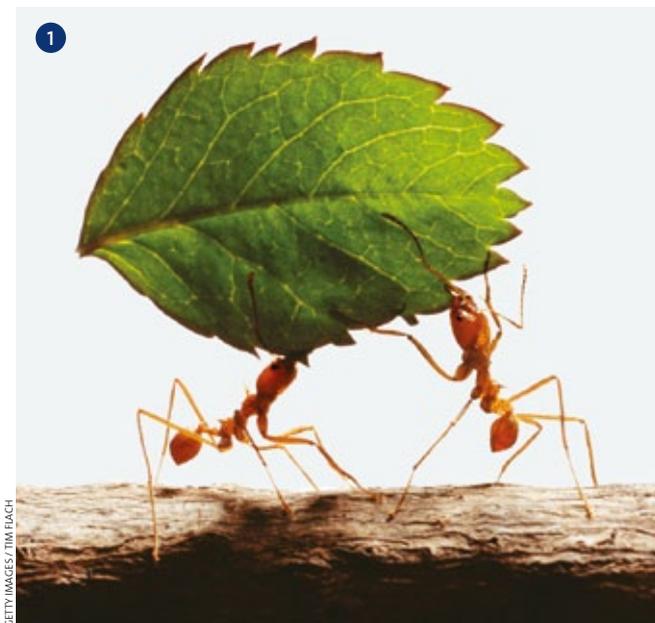
Gruppe zu verbessern. Doch wie mathematische Modelle von mir und anderen Forschern zeigen, kann die Selektion auf mehreren Ebenen wirken – von einzelnen Genen über Gruppen verwandter Individuen bis zu ganzen Spezies. So konkurrieren die Angestellten einer Firma zwar miteinander, um auf der Karriereleiter aufzusteigen, aber sie kooperieren auch, damit ihr Unternehmen im Wettbewerb mit anderen Firmen Erfolg hat.

Die fünf Mechanismen der Kooperation gelten für alle Arten von Organismen, von Amöben bis zu Zebras – und in manchen Fällen sogar für Gene und andere Zellbausteine. Diese Allgemeingültigkeit lässt vermuten, dass Kooperation von Anfang an eine treibende Kraft für die Evolution des Lebens auf der Erde gewesen ist. Vor allem in einem Fall erwies sich diese Kraft als besonders wirksam: Binnen einiger Millionen Jahren verwandelte sich ein langsamer, wehrloser Affe in die einflussreichste Kreatur des Planeten. Diese Spezies erfand ein verblüffendes Arsenal von Technologien, mit denen sie die Tiefen der Meere auslotet, den Weltraum erforscht und ihre Errungenschaften blitzschnell aller Welt mitteilt. Solch enorme Leistungen haben wir durch Zusammenarbeit geschafft. In der Tat: Menschen sind die kooperativste Spezies überhaupt.

Natürliche Tendenz zum Verrat

Ein **spieltheoretisches Paradoxon** verdeutlicht, warum Kooperation in der Natur eigentlich die Ausnahme sein müsste. Beim Gefangenendilemma stehen zwei Personen vor der Verurteilung für ein gemeinsam begangenes Verbrechen. Das Strafmaß hängt davon ab, ob sie miteinander kooperieren, das heißt die Aussage verweigern, oder ihren Mittäter verraten, indem sie ein Geständnis ablegen (siehe Tabelle unten). Da keiner der beiden weiß, was der andere tun wird, ist es für jeden die rationale Entscheidung, den anderen zu verraten – obwohl die beiden durch Kooperation, das heißt Dichthalten, besser wegkämen, als wenn beide plaudern.

		INDIVIDUUM 2	
		KOOPERIERT (schweigt)	VERRÄT (gesteht)
INDIVIDUUM 1	KOOPERIERT (schweigt)	2 Jahre Gefängnis 2 Jahre Gefängnis	4 Jahre Gefängnis 1 Jahr Gefängnis
	VERRÄT (gesteht)	1 Jahr Gefängnis 4 Jahre Gefängnis	3 Jahre Gefängnis 3 Jahre Gefängnis



Blattschneiderameisen arbeiten zusammen, um Blattstücke in ihren Bau zu schleppen (1). Zellen regulieren ihre Teilung und vermeiden dadurch die Entstehung von Krebs (2). Löwinnen ziehen gemeinsam den Nachwuchs auf (3). Wenn Japanmakaken einander öffentlich putzen, verbessern sie ihre Reputation in der Gruppe (4).

Doch wenn die fünf Mechanismen der Kooperation überall in der Natur auftreten, erhebt sich die Frage: Was macht gerade Menschen so besonders hilfsbereit? Meinem Eindruck nach bietet der Mensch mehr als jedes andere Lebewesen anderen seine Unterstützung auf Grund indirekter Reziprozität oder Reputation an. Und warum? Weil nur Menschen über echte Sprache – sowie Namen füreinander – verfügen; damit können wir Informationen über jedermann austauschen, von Familienangehörigen bis zu völlig Fremden auf der anderen Seite des Globus. Wir sind geradezu besessen davon, wer mit wem was warum tut, um uns selbst im uns umgebenden sozialen Netzwerk optimal zu positionieren. Untersuchungen zufolge haben die Menschen bei fast allen Entscheidungen – wofür sollen wir Geld spenden, welche neu gegründete Firma wollen wir finanziell unterstützen? – den Gesichtspunkt der Reputation im Auge. Meine Kollegin Rebecca Henderson an der Harvard University, Expertin für Konkurrenz in der Geschäftswelt, fand heraus, dass Toyota in den 1980er Jahren vor allem durch seine Reputation, die Zulieferer fair zu behandeln, Wettbewerbsvorteile gegenüber anderen Autoherstellern erzielte.

Erst das Zusammenwirken von Sprache und indirekter Reziprozität ermöglicht die schnelle kulturelle Evolution, die für unsere Anpassungsfähigkeit als Art entscheidend ist. Angesichts von Bevölkerungswachstum und Klimawandel werden wir diese Flexibilität in Zukunft dringend brauchen. Allerdings stehen unsere Chancen hier nicht besonders gut, wenn wir unsere bisherigen Leistungen im Umweltschutz betrachten. Auch dazu liefert die Spieltheorie Erkenntnisse.

Bestimmte soziale Dilemmata, an denen mehr als zwei Spieler beteiligt sind, heißen Öffentliche-Güter-Spiele. Dabei profitiert jeder in der Gruppe von meiner Kooperation, aber unter sonst gleichen Bedingungen erhöhe ich meinen Gewinn, wenn ich von Kooperation zu Selbstsucht übergehe. Das heißt: Obwohl ich möchte, dass die anderen kooperieren, verhalte ich mich »schlau«, wenn ich sie hintergehe. Das Problem ist, dass jeder in der Gruppe genauso denkt, wodurch anfängliche Kooperation unweigerlich in allgemeiner Abtrünnigkeit endet.

... alle für einen

Im klassischen Öffentliche-Güter-Szenario, das der amerikanische Ökologe Garrett Hardin (1919–2003) im Jahr 1968 als die »Tragik der Allmende« beschrieben hat, erlaubt eine Gruppe von Viehzüchtern ihren Herden, das gemeinsam genutzte Weideland zu überweiden, obwohl sie wissen, dass sie damit die Lebensgrundlage der ganzen Gruppe zu Grunde richten, also auch sich selbst. Die Parallelen zur Übernutzung unserer Ressourcen – von Erdöl bis zu sauberem Trinkwasser – liegen auf der Hand. Wenn Kooperatoren abtrünnig werden, sobald es um die Verwaltung kommunaler Güter geht, wie können wir dann je hoffen, das ökologische Kapital des Planeten für künftige Generationen zu bewahren?

Zum Glück ist nicht jede Hoffnung verloren. Mit einer Serie von Öffentliche-Güter-Spielen hat ein Team um Manfred Milinski vom Max-Planck-Institut für Evolutionsbiologie in Plön mehrere Faktoren aufgezeigt, durch die Menschen motiviert werden, mit Gemeingut pfleglich umzugehen. Die



Forscher gaben insgesamt 180 Versuchspersonen je 40 Euro und ließen sie per Computer an einem Spiel teilnehmen, bei dem es darum ging, mit dem Geld das Erdklima unter Kontrolle zu halten. Die Teilnehmer mussten in jeder Spielrunde einen Teil ihres Gelds in einen gemeinsamen Topf spenden. Falls er nach zehn Runden mindestens 120 Euro enthielt, galt das Klima als sicher, und die Spieler konnten ihr Restgeld behalten. Wenn sie weniger als 120 Euro aufbrachten, brach das Klima zusammen, und jeder verlor sein gesamtes Guthaben.

Obwohl die Spieler das Ziel des Klimaschutzes oft – wenn auch nur um ein paar Euro – verfehlten, ließen sich von Runde zu Runde Verhaltensänderungen beobachten, die zeigen, wodurch Großmut entsteht. So wurden die Spieler altruistischer, wenn sie von Autoritäten über Klimaforschung informiert wurden. Offenbar müssen Menschen überzeugt werden, dass ein echtes Problem besteht, damit sie für das Gemeingut Opfer bringen. Die Spieler verhielten sich auch großzügiger, wenn sie ihre Spende nicht anonym, sondern öffentlich leisten durften – das heißt, wenn ihre Reputation auf dem Spiel stand. Auch eine andere Untersuchung an der Newcastle University (England) unterstrich die Bedeutung der Reputation: Wenn Menschen sich beobachtet fühlen, werden sie spendabler.

Diese Faktoren kommen jeden Monat ins Spiel, wenn ich meine private Gasrechnung erhalte. Die Aufstellung vergleicht den Verbrauch meines Haushalts mit dem Durchschnittsverbrauch meiner Nachbarschaft und stellt ihn außerdem dem Aufwand der Wohnungen gegenüber, die am meisten Energie sparen. Der Vergleich mit dem Gaskonsum der Nachbarn motiviert meine Familie, weniger Gas zu verbrauchen; jeden Winter versuchen wir die Heizungstemperatur um ein Grad zu senken.

Den Computersimulationen zufolge ist Kooperation »evolutionär instabil«; das heißt, Perioden, in denen sie dominiert, gehen unweigerlich in einen Zustand grassierender

Abtrünnigkeit über. Doch trotzdem scheint der Altruismus immer wieder aufzuflackern und wenigstens Episoden von Gemeinsinn zu schaffen. Zyklen von Kooperation und nakedem Egoismus prägen das Auf und Ab der Menschheitsgeschichte; sie erzeugen die unruhigen Schwankungen politischer und finanzieller Systeme. An welchem Punkt wir uns derzeit befinden, ist ungewiss, aber zweifellos müssten wir besser zusammenarbeiten, um die dringendsten Probleme zu lösen. Die Spieltheorie weist einen Weg. Die politisch Verantwortlichen sollten die indirekte Reziprozität berücksichtigen und Information und Reputation nutzen, um rücksichtslose Egoisten in Schach zu halten. Nur so können wir das größte aller Öffentliche-Güter-Spiele bestehen: Sieben Milliarden Menschen sollen die rapide schwindenden Ressourcen des Planeten Erde schützen. ~

DER AUTOR



Martin A. Nowak ist Professor für Biologie und Mathematik an der Harvard University und leitet dort das Programm für Evolutionsdynamik. Seine Forschung konzentriert sich auf die mathematischen Grundlagen der Evolution.

QUELLEN

Nowak, M.A.: Five Rules for the Evolution of Cooperation. In: Science 314, S. 1560–1563, 2006

Nowak, M.A., Highfield, R.: Super Cooperators: Altruism, Evolution, and Why We Need Each Other to Succeed. Free Press, New York 2012

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1165737

MATHEMATIKGESCHICHTE

Von der Schipiste in den abstrakten Wahrscheinlichkeitsraum

In diesen Tagen jährt sich zum 25. Mal der Todestag eines der größten Mathematiker des 20. Jahrhunderts: Andrei Nikolajewitsch Kolmogorow.

VON MARC DRESSLER

Nein sagen will gelernt sein – und zweimal Nein sagen erst recht. Dass die doppelte Verneinung einer Aussage dasselbe sei wie die Aussage selbst – das glaubt der Normalmensch und mit ihm der gewöhnliche mathematische Logiker. Nicht so die Intuitionisten um Luitzen E.J. Brouwer (1881–1966), die in den 1920er Jahren an den Grundfesten der Mathematik rüttelten. Um eine Aussage als wahr anzuerkennen, genügte es ihnen nicht, wenn ihre Verneinung auf einen Widerspruch führte; sie forderten einen direkten Beweis ein. Auf der anderen Seite in diesem »Grundlagenstreit der Mathematik« stand der allgemein anerkannte Großmeister der Mathematik, David Hilbert (Spektrum der Wissenschaft 1/2012, S. 72).

In diesen Kampf der Giganten wird Andrei Nikolajewitsch Kolmogorow gewissermaßen hineingeboren. Am 25. April 1903 kommt er im zentralrussischen Tambow zur Welt. Seine Mutter stirbt bei seiner Geburt, sein Vater verlässt die Familie; aber seine Tante Vera adoptiert den Jungen und erzieht ihn auf dem Gut seines Großvaters in Jaroslawl. Obgleich der auch eine teure Privatschule hätte finanzieren können, kommt Andrei auf ein kostengünstiges Gymnasium in Moskau. Kaum Student an der Moskauer Universität, veröffentlicht er mit 19 Jahren eine Arbeit zur Mengentheorie. Ein Jahr später kann er eine Vermutung seines Lehrers Nikolai Lusin zur Fourier-Analyse in Gewissheit verwandeln – indem er sie widerlegt. Ein Geniestreich, der die Fachwelt aufhorchen lässt! Und kaum hat er mit 22

Jahren sein Studium abgeschlossen, meldet er sich zum Grundlagenstreit zu Wort.

Wo die Giganten darum kämpfen, was man als Aussage (oder »Satz«) einer Theorie anerkennen darf und was nicht, arbeitet Kolmogorow vorrangig mit dem Begriff »Aufgabe«. Die Änderung wirkt zunächst unscheinbar, denn zwischen der Aufgabe »Ziehe durch drei gegebene Punkte einen Kreis« und dem Satz »Durch drei gegebene Punkte, die nicht auf einer Geraden liegen, gibt es stets genau einen Kreis« ist kein fundamentaler Unterschied zu sehen. Man beweist halt den Satz, indem man beschreibt, wie die Aufgabe zu lösen ist.

Aufgabenlogik statt Aussagenlogik

Entsprechend passt zu dem Satz »Die fermatsche Vermutung ist falsch« die Aufgabe »Widerlege die fermatsche Vermutung«. Wohlgemerkt: Als Kolmogorow seine Schrift »Zur Deutung der intuitionistischen Logik« veröffentlicht, schreiben wir das Jahr 1932 und wissen noch nicht mit Gewissheit, dass der Satz falsch und die Aufgabe unlösbar ist. Wie hätte man die fermatsche Vermutung widerlegen können? Indem man ein Gegenbeispiel angibt. Aber aufgepasst: Die Aufgabe »Finde natürliche Zahlen a, b, c und n , so dass $n > 2$ ist und die Gleichung $a^n + b^n = c^n$ gilt« ist verschieden von der Aufgabe »Widerlege die fermatsche Vermutung«! Nach dem damaligen Stand des Wissens ist folgende paradoxe Situation durchaus denkbar: Man kann erstens beweisen, dass es ein Gegenbeispiel geben muss, und zweitens, dass es prinzipiell un-

möglich ist, eines explizit anzugeben. Eine solche Beweisführung würde Hilbert akzeptieren, Brouwer aber nicht.

Kolmogorow konstruiert analog zum Aussagenkalkül einen Aufgabenkalkül: $a \wedge b$ bedeutet »Löse die Aufgaben a und b «, $a \vee b$ heißt »Löse mindestens eine der Aufgaben a und b «, und $a > b$ schließlich »Zeige, dass aus a b folgt« oder »Führe die Lösung von b auf die von a zurück«. Nur die Verneinung ist sehr speziell: $\neg a$ heißt nicht etwa »Beweise die Unlösbarkeit von a «, sondern »Leite aus der Voraussetzung, dass die Lösung von a gegeben ist, einen Widerspruch her«; und das ist im Allgemeinen schwieriger.

Entsprechend ist die Aufgabe $\neg\neg a$ nicht dasselbe wie die Aufgabe a . Und der Satz vom ausgeschlossenen Dritten, den ein Aussagenlogiker schlicht als $a \vee \neg a$ schreiben würde (»Für jede Aussage a gilt: Entweder a selbst oder die Verneinung von a ist wahr«), gleicht in der Aufgabenlogik interpretiert einer Allmachtsfantasie: »Ich kann jede Aufgabe entweder lösen oder die Annahme ihrer Lösbarkeit auf einen Widerspruch führen.« Das kann selbst der große Hilbert nicht für sich in Anspruch nehmen, auch wenn er die Mathematik gerne in diese beneidenswerte Lage bringen möchte. Aber die Hoffnung ist vergebens: Ungefähr um dieselbe Zeit beweist Kurt Gödel, dass dieses Ziel prinzipiell unerreichbar ist.

Formal ist Kolmogorows Aufgabenkalkül mit dem Aussagenkalkül der Intuitionisten identisch, allerdings ohne sich auf deren erkenntnistheoretische Denkverbote einzulassen. So hilft er so-

wohl die Unterschiede als auch die Bezüge zwischen den beiden Denkrichtungen klarer herauszuarbeiten.

Die Arbeit schließt mit dem programmatischen Satz: »Für die Mathematik folgt daraus, dass man die Lösung von Aufgaben als ihren [der Mathematik] selbstständigen Zweck (neben dem Beweis von theoretischen Aussagen) betrachten soll.« Insofern Aufgaben an die Stelle von Aussagen treten, können sich die modernen Didaktiker, welche die Mathematik vom Formelnpauken befreien und das Problemlösen ins Zentrum des Unterrichts stellen wollen, auf Kolmogorow berufen.

Es hat ganz den Anschein, als würde der große russische Mathematiker seinem eigenen Programm folgen. Das Grübeln über theoretische Sätze ohne Weltbezug ist seine Sache nicht; seine Mathematik entspringt dem Leben. Von Elfenbeinturm keine Spur. Die un-

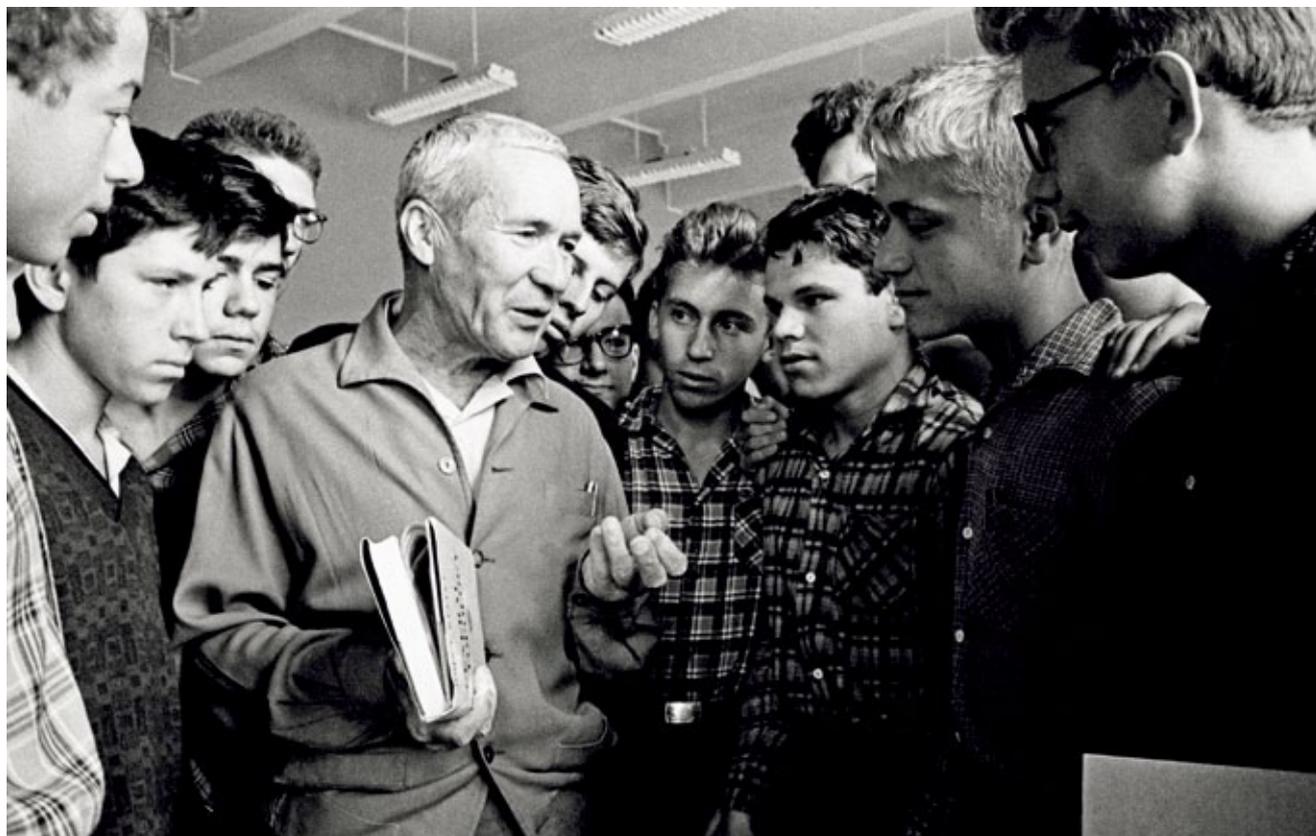
beheizten Seminarräume der Moskauer Universität bieten in klirrenden Wintern eh keine dauerhafte Heimstätte. Da steigt der Student, der nicht nur in Mathematik, sondern auch in Geschichte eingeschrieben ist und die Besiedlung von Nowgorod im 16. Jahrhundert erforscht, lieber auf die Schier.

Sobald der Schnee schmilzt und das Eis taut, fährt Kolmogorow ungefähr 100 Kilometer nord- oder südwärts, um in der Wolga beziehungsweise der Oka die ersten Schwimmzüge des Frühjahrs zu tun. Im Frühling und Herbst zieht es ihn zum Bergsteigen in den Kaukasus (Bild S. 85). Und dort erschließt er sich die Mathematik, die er dann abends auf der Veranda seiner Datscha zu Papier bringt. In Moskau verdient er nur sein Geld, zuerst als Lokführer, ab 1931 dann als Professor. Arbeiten aber tut Kolmogorow unter freiem Himmel, in den Bergen und Wäldern, an den Flüssen und Seen Russlands.

Er forscht über das Wachstum von Kristallen, die Statistik russischer Gedichte, die Geometrie pflanzlicher Wechselwirkungen und die Ausbreitung vorteilhafter Gene. Aber die größte Wirkung auf die Fachwelt erzielen seine Arbeiten zur Wahrscheinlichkeit. Sein 1933 in deutscher Sprache vorgelegter Band »Grundbegriffe der Wahrscheinlichkeitsrechnung« entlässt die Wahrscheinlichkeitstheorie auf einen Schlag in die disziplinäre Selbstständigkeit.

Bemerkenswerterweise sagt Kolmogorow an keiner Stelle des Buchs, was Wahrscheinlichkeiten »eigentlich« sind. Er erklärt nur, wie man mit ihnen rechnet. Das, so stellt sich heraus, genügt für alle praktischen Zwecke. Hier wiederholt sich ein allgemeines Muster der Mathematik. Was ist eine irrationale Zahl »eigentlich«? Oder überhaupt eine Zahl? Wer den naiven Standpunkt nicht akzeptiert, man wisse aus Kindertagen, was eine Zahl sei, muss einen beträchtlichen formalen Aufwand treiben. Verglichen damit ist das Rechnen mit diesen Zahlen eine ziemlich einfache Sache.

Andrei Kolmogorow (hier im Gespräch mit Schülern 1968 in Moskau) setzte sich zeit- lebens dafür ein, junge Menschen an die Mathematik heranzuführen.



CORBIS / YEVGENY KHALDEI

Die historisch früheste Anwendung der Wahrscheinlichkeitsrechnung ist das Glücksspiel, und die Folge der Zahlen, die beim wiederholten Werfen einer Münze, eines Würfels oder einer Roulettekugel entsteht, ist das klassische Beispiel einer Zufallsfolge. Aber wenn ein undurchschaubarer Automat die Zahlen liefert oder ein überaus fingerfertiger Mitspieler die Karten austellt: Woher wissen wir, dass das wirklich eine Zufallsfolge ist?

Kolmogorow findet 1965 das begriffliche Mittel, um diese Frage zu beantworten: die algorithmische Komplexität. Eine Folge von Beobachtungen ist dann rein zufällig, wenn sich ihre Komplexität nicht vermindern lässt. Wie aber lässt sich die Komplexität einer Folge messen? An der Länge des kürzesten Algorithmus, der die Folge erzeugt. Der kürzeste Algorithmus für die eintönige Folge (1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, ...) fällt kürzer aus als der für (1, 4, 1, 5, 9, 2, 6, 5, ...). Und der ist noch einigermaßen kurz; denn die Folge besteht aus den Nachkommastellen von π , und die sind – wenn auch etwas mühsam – eine nach der anderen mit einem automatischen Verfahren berechenbar. Bei einer echten Zufallsfolge dagegen gibt es keinen

Zusammenhang zwischen den Folgengliedern, also auch keinen Algorithmus, der einen solchen Zusammenhang beschreiben könnte. Der kürzeste Algorithmus, der die Folge wiedergibt, besteht in der schlichten Auflistung ihrer Werte und ist damit genauso lang wie die Folge selbst.

Gute Beziehungen zur Kommunistischen Partei

Wer eine solche Folge aus der Beobachtung eines physikalischen Prozesses erhält, wird demnach den Prozess als zufällig bezeichnen, wenn die Komplexität mit jeder neuen Beobachtung schnellstmöglich zunimmt, wenn sich also kein Weg findet, die neuen Beobachtungen aus den alten herzuleiten. Damit kommt die algorithmische Komplexität unserer alltäglichen Vorstellung sehr nahe, wonach Zufall dort herrscht, wo es an Regelmäßigkeiten gebricht.

Diese Idee kommt erst richtig zum Tragen, als die Computer in den 1970er Jahren weite Verbreitung finden. Nunmehr kann man die Komplexität eines Prozesses an der Länge des kürzesten Programms messen, das den Prozess hervorbringt. Unabhängig von Kolmo-

gorow haben kurz zuvor Ray Solomonoff (1926–2009) und wenige Jahre später Gregory Chaitin (* 1949) denselben Begriff gefunden und zu einer algorithmischen Informationstheorie ausgearbeitet (Spektrum der Wissenschaft 2/2004, S. 86, und 9/2006, S. 54).

Bereits 1953 findet Kolmogorow eine revolutionäre Theorie zum Verhalten dynamischer Systeme, die insbesondere Aussagen über die Stabilität des Sonnensystems erlaubt. Aber erst nachdem sein Schüler Wladimir Arnold (1937–2010) sowie Jürgen Moser (1928–1999) sie ausgearbeitet haben, gewinnt sie unter dem Namen KAM-Theorie (nach den Initialen ihrer Schöpfer) große Verbreitung (Spektrum der Wissenschaft 12/1994, S. 86).

Von dieser Revolution ist mehr geblieben als vom Sturz des Zaren und der bürgerlichen Regierung, die Kolmogorow noch als Gymnasiast in Moskau erlebt hat. Zu den Umwälzungen in Russland prophezeit Kolmogorow während des Zweiten Weltkriegs: »In 20 Jahren wird niemand mehr wissen, was in unserem Land wirklich geschehen ist.«

Da spricht ein Kundiger. Zur Kommunistischen Partei der Sowjetunion hat er offenbar einen guten Draht. Schon kurz nach seiner Aufnahme 1939 in die Russische Akademie der Wissenschaften bekommt er den begehrten Posten des Sekretärs, vorbei an langjährigen und verdienten Mitgliedern, die eigentlich an der Reihe gewesen wären. Es heißt, Stalin selbst habe die Besetzung der Stelle mit Kolmogorow befürwortet. Was den Mathematiker nicht davon abhält, offen den Konflikt mit Stalins wissenschaftlichem Protegé, Trofim Lysenko, zu suchen. Kurz nach seiner Ernennung veröffentlicht Kolmogorow einen Artikel, in dem er darlegt, dass die Versuchsergebnisse der Lysenko-Schule entgegen ihrem Dogma die mendelschen Gesetze der Vererbung bestätigten.

Was den früh schon international renommierten Mathematiker so schützt, dass er sich solche Spitzen unbeschadet erlauben darf, liegt bislang im Dunkeln. Kolmogorows Rolle in der Sowjetunion, vor allem aus Sicht der Machthaber,



Im Kreis der Fachkollegen auf einer Tagung in Tiflis 1963.

BULLETIN OF THE LONDON MATHEMATICAL SOCIETY 22, 5, 31–100, 1990, PLATE I



Beim Wandern im Kaukasus.

harrt noch der Klärung. Immerhin wirkt Kolmogorow als Staatsbeamter an geheimen Forschungsprojekten mit und berät regelmäßig die Regierung. Für den Titel »Held der sozialistischen Arbeit« sowie den Lobatschewski-Preis wird er ebenfalls für würdig befunden.

Zudem gehört er zu den drei Mathematikern, denen Stalin 1954 erlaubt, an einem Kongress im Ausland teilzunehmen. Kolmogorow reist, die damals längeren Bahnhofsaufenthalte zum Schwimmen in Flüssen nutzend, mit dem Zug zum mathematischen Weltkongress nach Amsterdam und hält einen der beiden Hauptvorträge über die grundlegenden Ideen, aus denen später die KAM-Theorie wird.

Die dynamischen Systeme dieser Theorie sind deterministisch. Das heißt, durch die Anfangswerte ist das gesamte Schicksal des Systems für alle Zeiten bestimmt – auch wenn häufig das konkrete Systemverhalten von einer regellosen Irrfahrt nicht zu unter-

scheiden ist. Doch Kolmogorows Axiomatik versetzt ihn in die Lage, auch dynamische Systeme mit Zufallsanteil (»stochastische dynamische Systeme«) zu untersuchen. Er betrachtet die Menge aller möglichen Systemzustände als einen abstrakten Raum (den »Phasenraum«) und fragt, mit welcher Wahrscheinlichkeit der Systemzustand in gewissen Teilmengen des Phasenraums zu finden ist. Eine so vorsichtig formulierte Frage findet dann möglicherweise sogar eine brauchbare Antwort, während die Lösung des klassischen Problems (»Welchen Zustand hat das System in einer Million Jahre?«) praktisch oder sogar prinzipiell unmöglich ist.

Es trifft sich günstig, dass Kolmogorow damals seinen Wahrscheinlichkeitsbegriff so überaus abstrakt formuliert hat. Damit passt er nämlich auch auf einen Phasenraum mit unendlich vielen Dimensionen. Auch die Komplexität hält Einzug in das Studium dynamischer Systeme, allerdings unter dem Namen Entropie.

Die von Kolmogorow vorgeschlagenen Definitionen für Komplexität und Entropie in dynamischen Systemen sind zwar mangelhaft. Das hindert aber Heerscharen begabter Mathematiker nicht daran, auf seine Initiative hin die Grundbegriffe dynamischer Systeme zu überarbeiten und eine statistische Mechanik zu etablieren.

Der Gemeinde der Mathematiker genügt meist ein kurzer Artikel des Meisters, um die darin beschriebene Aufgabe und die Fruchtbarkeit des Lösungsansatzes zu erkennen. Kolmogorow verfasst in diesem Sinn anregende Beiträge auf allen Gebieten der Mathematik – mit Ausnahme der Zahlentheorie. Allerdings mag er Trost in der Tatsache finden, dass ihm schon als Fünfjährigem auffiel, dass $1=1^2$, $1+3=2^2$, $1+3+5=3^2$, ... ergibt.

Sehr viel liegt ihm daran, junge Menschen an die Mathematik heranzuführen und zu fördern, seien es Fünfjährige, Gymnasiasten oder Studenten (Bild S. 83). Er schreibt zahlreiche Bücher für den Schulunterricht, gründet an der Moskauer Universität eine mathematisch-physikalische Sommerschule für

Hochbegabte, reformiert die Studienordnung der Fakultät für Mathematik und ist Vorsitzender der Kommission für die Reform des Schulunterrichts am Kultusministerium der UdSSR.

Seine Wertschätzung für den mathematischen Nachwuchs zeigt sich besonders in den Wirren des Zweiten Weltkriegs. Als Kolmogorow im Oktober 1941 telefonisch Order erhält, sich sofort mit Handgepäck in den bereitgestellten Zug nach dem östlich gelegenen Kasan zu begeben, um dem bevorstehenden Einmarsch der Deutschen in Moskau zu entkommen, packt der Mathematikprofessor statt Brot oder warmer Wäsche die Manuskripte seiner Studenten in seine Ledermappe. Die danken es ihm noch heute.

Am 20. Oktober 1987 ist Andrei Kolmogorow in Moskau verstorben. ~

DER AUTOR



Marc Dressler ist promovierter Philosoph und Wissenschaftsjournalist in Stuttgart.

QUELLEN

Jaynes, E. T., Bretthorst, G. L.: Probability Theory. Cambridge University Press, Cambridge 2011

Kendall, D. G. et al.: Andrei Nikolaevich Kolmogorov (1903–1987). In: Bulletin of the London Mathematical Society 22, S. 31–100, 1990

Kolmogorow, A. N.: Une série de Fourier-Lebesgue divergente presque partout. In: Fundamenta Mathematicae 4, S. 324–328, 1923. <http://matwbn.icm.edu.pl/ksiazki/fm/fm4/fm4127.pdf>

Kolmogorow, A. N.: Zur Deutung der intuitionistischen Logik. In: Mathematische Zeitschrift 35, S. 58–65, 1932. <http://gdz.sub.uni-goettingen.de/dms/load/img/?PPN=GDZPPN002373467>

Nikol'skii, S. M.: The Great Kolmogorov. In: Bolibruch, A. A. et al. (Hg.): Mathematical Events of the Twentieth Century. Springer, Heidelberg 2006

Vitanyi, P.: Andrey Nikolaevich Kolmogorov. www.scholarpedia.org/article/Kolmogorov

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1166684



MARIA STENZEL

Mit dem Eisbrecher »Nathaniel B. Palmer« versuchten Wissenschaftler 2010, über das Weddellmeer möglichst nahe an das Scar-Inlet-Schelf vor der Küste der Antarktischen Halbinsel zu gelangen. Dichtes Packeis stoppte sie jedoch kurz vor dem Ziel.

KLIMAWANDEL

Eisschmelze am Südpol

Während immer mehr Schelfeis rund um die Antarktische Halbinsel auseinanderbricht, mühen sich Wissenschaftler herauszufinden, wie sich dieser Kollaps auf die Gletscher im Inland auswirkt. Letztlich geht es dabei um die Frage: Steigt der Meeresspiegel noch viel schneller als bisher angenommen?

Von Douglas Fox



Vor 17 Jahren wurden zehn argentinische Soldaten Zeugen eines spektakulären Naturereignisses, das kein Mensch je zuvor beobachtet hatte. Die Männer waren in der Basis Matienzo stationiert, einer trostlosen Ansammlung von Blechhütten auf einem Vulkanfelsen 50 Kilometer vor der Antarktisküste. Schelfeis umschloss die Insel; mit 1500 Quadratkilometern Fläche hatte es fast die doppelte Größe Hamburgs. Obwohl es auf dem Meer schwamm, war es 200 Meter dick und so stabil wie Grundgestein.

Dennoch merkte Kapitän Juan Pedro Brückner, dass etwas nicht stimmte. Schmelzwasser hatte zahlreiche Tümpel auf dem Eis gebildet. Hin und wieder erklang ein gurgelndes Geräusch, wenn ein solcher Tümpel sich plötzlich durch ein Netz von Rissen in die Tiefe entleerte. Tag und Nacht spürten Brückners Männer Erschütterungen im Untergrund. Es fühlte und hörte sich an, als ob U-Bahn-Züge unter ihren Füßen vorbeiratterten. Das ominöse Poltern trat immer öfter auf.

Eines Tages, als die Mannschaft gerade in einer der Hütten zu Mittag aß, erhob sich ein Dröhnen, »fürchterlich laut, wie ein explodierender Vulkan«, erinnert sich Brückner. Die Männer stürzten nach draußen. Dort sahen sie, wie das Schelfeis um ihr kleines Eiland zerbarst. Das geschah so heftig, dass die Soldaten befürchteten, das turbulente Gewirr aus riesigen Schollen könnte den Felsen vom Untergrund losreißen und ins Meer drücken. Sie installierten Instrumente, die beim geringsten Kippen des Bodens Alarm geben sollten. Nach mehreren Tagen voller Anspannung wurde die Mannschaft schließlich per Helikopter in eine 200 Kilometer

weiter nördlich gelegene Station ausgeflogen. Die Insel hielt stand, doch ihr eisiger Gürtel verschwand für immer.

Brückner und seine Kollegen hatten miterlebt, wie das Larsen-A-Schelf zersplitterte und sich auflöste. Doch das war erst der Anfang. Da warme Sommer von der Spitze Südamerikas aus immer weiter in den Nordteil der Antarktischen Halbinsel vorrückten, zerbrachen in den Folgejahren der Reihe nach drei weitere Eisschelfe an deren Ostseite.

Noch ist nicht völlig geklärt, was den Kollaps eines Eisschelfs unmittelbar auslöst. Fest steht aber: Sobald ein Schelf verschwindet, können Gletscher, die sich in Küstenfjorden dahinter aufgestaut haben, ungehindert in den Ozean gleiten. Diese Eiszufuhr vom Festland erhöht den Meeresspiegel. Der Bericht des Weltklimarats (IPCC) von 2007, der diesen Effekt noch nicht berücksichtigt, sagt einen Anstieg um 18 bis 59 Zentimeter bis zum Jahr 2100 voraus. Angesichts des reihenweisen Zerfalls von Eisschelfen befürchten Glaziologen jedoch, dass die Gletscher bis zu zehnmal so schnell schmelzen könnten – mit beunruhigenden Folgen für den Meeresspiegel.

Auf der Antarktischen Halbinsel lagert nur ein geringer Teil der gesamten Eisdecke des Kontinents. Dieser nach Norden ragende Sporn sei jedoch ein »natürliches Labor«, sagt Theodore Scambos, Glaziologe am National Snow and Ice Data Center in Boulder (Colorado). »Hier läuft der Vorspann zu dem Film, der in der übrigen Antarktis innerhalb der nächsten 50 bis 100 Jahre spielen wird.«

Das erklärt das große Interesse an diesem natürlichen Experiment. Wissenschaftler wollen unbedingt herausfinden, wie schnell die Eisschelfe zerfallen und was genau sie dazu

bringt, um den künftigen Meeresspiegelanstieg besser vorhersagen zu können. »Immer wieder sind die Vorhersagen zu konservativ und unterschätzen die Dimensionen des Wandels«, beklagt Robert DeConto, der den Kollaps des Schelfeises an der University of Massachusetts im Amherst am Computer simuliert. »Wir kommen mit unseren Modellen oft nicht weiter, weil uns grundlegende Daten fehlen.« Auf kürzlich durchgeführten Expeditionen zur Antarktis haben Forscher Instrumente aufgestellt, die DeConto und seinen Kollegen nach und nach die benötigten Informationen liefern. Die jüngsten Prognosen auf Basis dieser Daten sind alarmierend.

Der erste dokumentierte Kollaps eines antarktischen Eisschelfs ereignete sich vor 25 Jahren. Das Larsen-Inlet-Schelf, ein 350 Quadratkilometer großer Block nördlich von Larsen A, war auf einer Satellitenaufnahme von 1986 noch zu sehen. Auf dem nächsten Foto von 1988 fehlte jedoch der größte Teil von ihm. Niemand konnte damals erklären, was mit dem Eis geschehen war. Erst der Südsommer 1995 löste das Rätsel. Zusammen mit Larsen A zerbrach damals auch das 60 Kilometer weiter nördlich gelegene Prinz-Gustav-Schelf. »Das alles kam wie aus heiterem Himmel«, sagt Scambos, der gemeinsam mit Wissenschaftlern des British Antarctic Survey die Eisschelfe am Südpol über viele Jahre hinweg kontinuierlich per Satellit überwacht hat.

Das Verschwinden des Meereises hinterließ Spuren in der gesamten Region. Luftbilder aus der Zeit vor dem Zerfall des Prinz-Gustav-Schelfs zeigen den Sjögren-Gletscher mit einer glatten Oberfläche. Seine Zunge reichte, gleichmäßig abfallend, vom Festland weit in den Fjord hinein. Jetzt hingegen bietet er einen traurigen Anblick: Er ist von Rissen zerfurcht und in der Mitte eingesackt. Nach dem Kollaps des Prinz-Gustav-Schelfs bewegte er sich mit einem Mehrfachen seiner vorherigen Geschwindigkeit auf den nun freien Ozean zu. Auf seiner Oberfläche taten sich bis zu 20 Meter breite Spalten auf, weil die 600 Meter dicke Eiszunge beim beschleunigten Gleiten gedehnt wurde. Gewaltige Eisberge brachen von der Vorderkante ab, die dadurch jetzt 15 Kilometer weiter



MEHR WISSEN BEI
Spektrum.de



Unser Online-Dossier »Polarforschung«
finden Sie unter

www.spektrum.de/polarforschung

landeinwärts liegt. »Jeder Gletscher hinter einem Eisschelf ist nach dessen Kollaps schneller abgerutscht«, sagt Scambos. »Nicht nur ein wenig, sondern zwei-, drei-, fünf-, ja bis zu neunmal so schnell.«

Eisberge so riesig wie Wolkenkratzer

Sieben Sommer später, im Jahr 2002, kollabierte das unmittelbar südlich von Larsen A gelegene Larsen-B-Schelf, das mehr als viermal so groß wie Hamburg und auch größer als das Saarland war. Binnen weniger Tage zerfiel es in Hunderte von Eisbergen, so gigantisch wie Wolkenkratzer. »Wir konnten Wale an Stellen sehen, wo sich kurz zuvor noch 300 Meter dickes Eis befunden hatte«, berichtet Pedro Skvarca, Glaziologe beim argentinischen Antarktis-Institut in Buenos Aires, der kurz nach dem dramatischen Ereignis per Flugzeug das Gebiet überflog. »Wir waren total verblüfft.«

Wieder einmal ging die Barriere verloren, die den Gletscher dahinter stabilisierte. Dadurch rutschten mehr als 150 Kubikkilometer Eis vom Land in den Ozean. Zugleich hob sich wegen der starken Gewichtsentlastung die Erdkruste an dieser Stelle. Das zeigte ein hochgenaues GPS-Instrument, das auf der 150 Kilometer weiter westlich gelegenen Anvers-Insel installiert war. Demnach beschleunigte sich die tektonische Hebung von 0,3 auf 0,8 Zentimeter pro Jahr.

Auch intakte Eisschelfe »kalben« von Zeit zu Zeit: An ihrem Rand lösen sich Stücke ab, die so groß wie das Saarland sein können. Doch Larsen B zerbrach auf völlig andere Weise. Eine Serie von sieben Detailbildern des Satelliteninstruments MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), über 35 Tage hinweg aufgenommen, ließ erkennen, dass das Schelf in Hunderte von Eisbergen von nur etwa 130 Meter Breite, 160 Meter Tiefe und über einem Kilometer Länge zersplitterte. Die Fragmente kippten von der Kante des Eisschelfs hinab in den Ozean, wobei sie sich zur Seite drehen und den Blick auf das bläuliche Gletschereis unter ihrer weißen Schneedecke frei gaben. So etwas hatten Forscher nie zuvor gesehen.

Einzelheiten dieses Vorgangs versuchten Scambos und Skvarca erstmals im März 2006 herauszufinden. An einem düsteren, kalten Tag flogen sie in einem Hubschrauber der argentinischen Marine zu einer breiten Eistafel namens UK211. Diese war drei Jahre zuvor vom 385 Kilometer weiter südlich gelegenen Larsen-C-Schelf abgebrochen und driftete nun in wärmere Gefilde nördlich der Halbinsel. Die Forscher hofften, an ihr als Naturlabor den Zusammenbruch eines Eisschelfs studieren zu können.

AUF EINEN BLICK

ALARMIERENDES TAUWETTER

- 1 Die **Eisschelfe** an den Rändern der Antarktis sind dabei, sich aufzulösen. Durch den Wegfall dieser Barriere können die **Gletscher** im Hinterland schneller ins Meer gleiten.
- 2 Um den künftigen **Meeresspiegelanstieg** besser vorhersagen zu können, wollen Wissenschaftler herausfinden, warum und wie schnell die Eisschelfe zerfallen.
- 3 Satellitendaten sind nicht detailliert genug für akkurate Schätzungen. In jüngster Zeit haben Forscher deshalb in der Antarktis Instrumente installiert, welche die benötigten **Informationen liefern** sollen.
- 4 Die bisher gesammelten Daten legen nahe, dass der Meeresspiegel zwei- bis dreimal so schnell steigen wird, wie im letzten **Bericht des Weltklimarats** vorhergesagt.

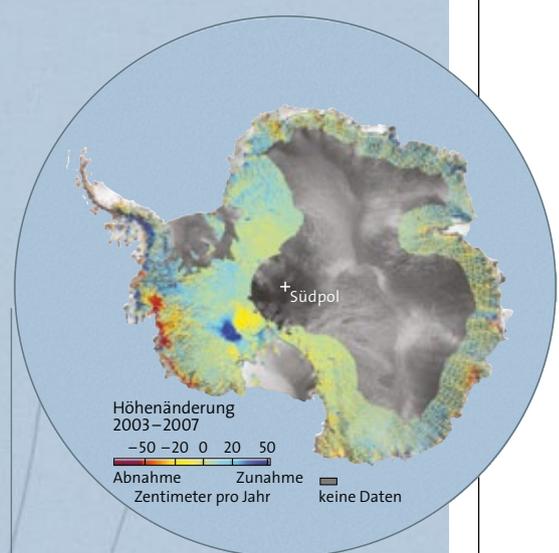
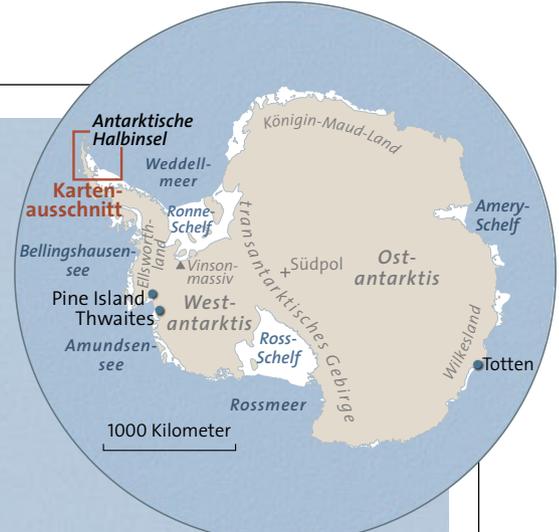
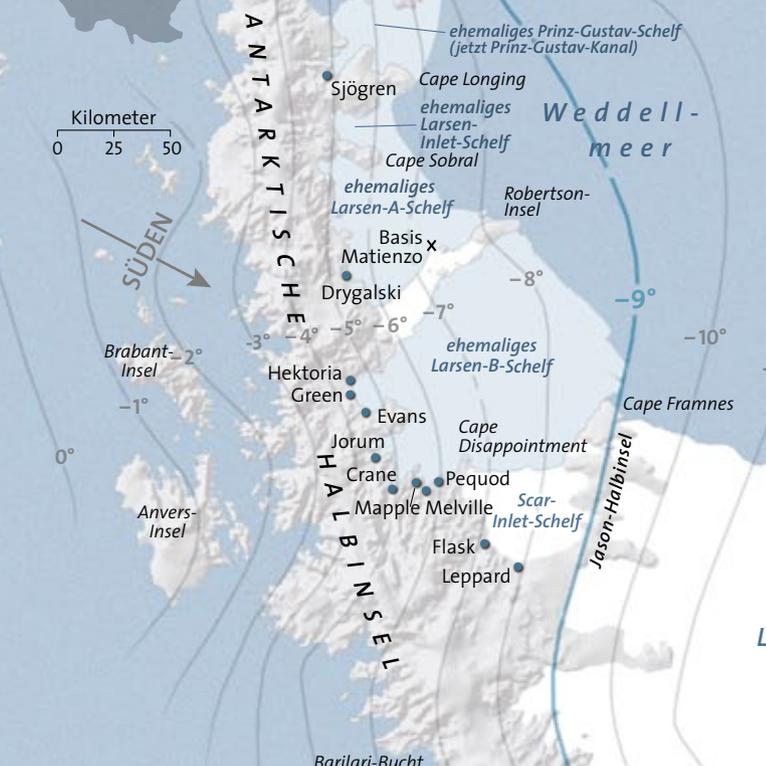
Weniger Eis, mehr Schnee

Die globale Erwärmung hinterlässt im Bereich der Antarktischen Halbinsel deutliche Spuren. Weil die mittleren jährlichen Lufttemperaturen steigen, zerfallen Eisschelfe, und die Gletscher bewegen sich schneller Richtung Meer (ganz unten). Landeinwärts verdickt sich wegen stärkerer Schneefälle der Eisschild an manchen Stellen (Mitte rechts), doch insgesamt verliert die Antarktis bis zu 190 Milliarden Tonnen Eis pro Jahr.

-  Schelfeisverlust zwischen den 1950er Jahren und 2012
-  Schelfeis im Jahr 2012 (Larsen C im Jahr 2008)
-  mittlere Jahrestemperatur der Luft in Grad Celsius
-  Gletscher

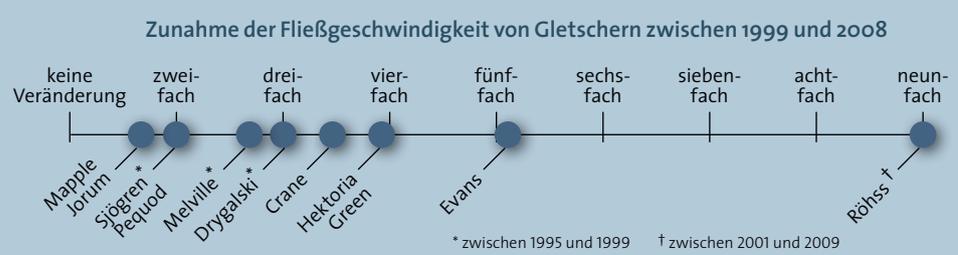
Temperaturanstieg
 Als Folge des Klimawandels ist die Linie der Jahresdurchschnittstemperatur von -9 Grad Celsius entlang der Antarktischen Halbinsel immer weiter nach Süden gewandert. Nördlich von ihr haben sich alle Eisschelfe der Reihe nach aufgelöst. Demnach sollte das Scar-Inlet-Schelf als Nächstes verschwinden.

Saarland als Größenvergleich



Höhenänderung
 Wenn Gletscher schneller abfließen, werden sie dünner. Im Inneren der Antarktis hat der Eispanzer zwar stellenweise zugelegt, weil bei höheren Temperaturen mehr Meerwasser verdunstet und über dem Südpol als Schnee niedergeht. Der Eisverlust durch die Gletscher übersteigt den Zugewinn durch verstärkte Schneefälle jedoch.

Gletschergeschwindigkeit
 Sobald ein Eisschelf zerfällt, gleiten Gletscher vom Festland dahinter schneller ins Meer (siehe Kasten auf S. 91). Ihre Fließgeschwindigkeit unterliegt zwar erheblichen Schwankungen, hat sich im Mittel aber deutlich erhöht.



XNR PRODUCTIONS NACH ALISON COOK SWANSEA UNIVERSITY (EISSCHELF- UND LUFTTEMPERATURDATEN); HAMISH PRITCHARD BRITISH ANTARCTIC SURVEY (KARTE DER OBERFLÄCHEN); DE ANGELES, H. SKWARCA, P. GLACIER SURGE AFTER ICE SHELF COLLAPSE, IN: SCIENCE 299, 5. 1960-1962, 2003 (GESCHWINDIGKEIT DER GLETSCHER DRYGALSKI UND SJÖGREN); GLASSER, N. ET AL.: FROM ICE SHELF TRIBUTARY TO DEWATER GLACIER: CONTINUED RAPID RECESSON, ACCELERATION AND THINNING OF RÖHSS GLACIER FOLLOWING THE 1995 COLLAPSE OF THE PRINCE GUSTAV ICE SHELF ANTARCTIC PENINSULA, IN: JOURNAL OF GLACIOLOGY 57, 5: 397-406, 2011 (GESCHWINDIGKEIT DES RÖHSS-GLETSCHERS); RÖTT, H. ET AL.: THE IMBALANCE OF GLACIERS AFTER DISINTEGRATION OF LARSEN-B ICE SHELF, ANTARCTIC PENINSULA, IN: CHRYOSPHERE 5, 5: 125-134, 2011 (GESCHWINDIGKEITEN ANDERER GLETSCHER); BEGATZ: THEODORE SCAMMOS, NATIONAL SNOW AND ICE DATA CENTER; SAARLAND: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / EMD-GRAPH

Die Landung war allerdings prekär. Wegen der einförmigen, milchig weißen Farbe der Eisfläche verlor der Pilot die Orientierung und setzte ziemlich schief auf, weshalb der Helikopter nach der Bodenberührung noch einen bedenklichen Sprung zur Seite machte. Doch zum Glück kippte er nicht um, so dass Scambos, Skvarca und vier andere Wissenschaftler unverseht herausklettern konnten.

Das Team installierte eine Instrumentenstation des Systems AMIGOS (Automated Met-Ice-Geophysics Observing Systems), die aufzeichnen sollte, wie die Eistafel zerfiel. Eine GPS-Einheit diente zum Verfolgen der Position und eine meteorologische Station zur Messung von Wind und Temperatur. Außerdem dokumentierte eine Kamera die Schneeschmelze auf der Oberfläche. Sie ließ sich auf eine Reihe von Pfosten richten, welche die Forscher auf 2,2 Kilometer Länge am Rand des Eisbergs einschlugen. Während dieser sich auflöste, sollte die Neigung und Verschiebung der Pflöcke Rückschlüsse auf die Vorgänge im Eis erlauben.

Scambos und Skvarca verfolgten UK211 acht Monate lang, indem sie regelmäßig per Satellitentelefon mit AMIGOS kommunizierten. Der Eisberg maß ursprünglich zehn mal zwölf Kilometer. Mit der Zeit schrumpfte er auf die Hälfte. Am 23. November 2006 schließlich kam die letzte Meldung von der Instrumentenstation. Einige Tage später war UK211 verschwunden und AMIGOS im Meer versunken.

Die Forscher beobachteten im Verlauf der acht Monate viele Veränderungen auf dem Eisberg. Die entscheidende ereignete sich unmittelbar vor dem plötzlichen Zerfall, als sich die Oberfläche in wässrigen Schneematsch verwandelte. Was danach geschah, blieb allerdings im Dunkeln, weil AMIGOS da schon keine Informationen mehr sendete. Außerdem gab UK211 als frei schwimmender Eisberg keine Auskunft darüber, wie ein Gletscher hinter dem Schelfeis auf dessen Zusammenbruch reagiert.

Genau das hätte Scambos aber gerne gewusst. Deshalb nahm er 2010 an einer Expedition zu dem Eisschelf Scar Inlet teil, einem Überrest von Larsen B. Höhenmessungen der angrenzenden Gletscher durch ein Laser-Altimeter an Bord des Satelliten ICESat hatten ein Absinken ihrer Oberfläche dokumentiert: Die Eiszungen waren demnach dünner geworden.

ICESat ging jedoch 2009 außer Betrieb. Von anderen Satelliten durchgeführte Messungen mit interferometrischem SAR (Radar mit synthetischer Apertur) hatten außerdem langfristige Mittelwerte für die Fließgeschwindigkeit der Gletscher geliefert. Doch lassen sich mit dieser Methode keine plötzlichen Veränderungen wie etwa schnelle Vorstöße erfassen. Schließlich hatten die GRACE-Satelliten seit 2003 einen deutlichen Eisschwund registriert, indem sie die lokale Schwerkraft maßen. Allerdings war die Auflösung dieser Messungen mit einigen hundert Kilometern nur sehr gering.

Scambos rechnete mit dem Zerfall von Scar Inlet innerhalb weniger Jahre und wollte mit einer Reihe von Messfühlern auf der Oberfläche die Katastrophe aufzeichnen. »Unser Ziel ist, den Vorgang von Anfang an und detaillierter zu beobachten, als das per Satellit möglich ist«, erklärte er mir 2010 an Bord des 6000-Tonnen-Eisbrechers »Nathaniel B. Palmer«, wo ich ihn und zwei Dutzend Kollegen als Reporter auf dem Weg zum Südpol begleitete. »Wir wollen das große Finale sehen.«

Tückische Spalten im Schelfeis

Im Januar und Februar 2010 kämpfte sich das Schiff durch bis zu zwei Meter dickes Packeis vor der Antarktischen Halbinsel und versuchte 57 Tage lang immer wieder, zum Scar Inlet-Schelf vorzudringen. Aber weil Meeresströmungen und Wind beständig mächtige Eisschollen gegen die Küste drückten, kam die »Palmer« nicht bis auf Helikopterreichweite heran. So ließ sich Scambos am 26. Januar gemeinsam mit vier weiteren Glaziologen, darunter Martin Truffer und Erin Pettit von der University of Alaska in Fairbanks, weiter nördlich an einer britischen Forschungsstation absetzen. Von dort brachte ein Flugzeug das Fünfer-Team zu seinem Untersuchungsort. Und so pendelte es in den nächsten drei Wochen per Propellermaschine zwischen der Station, dem Schelf und den angrenzenden Gletschern hin und her.

An Tagen mit weniger Schneegestöber installierten die Forscher AMIGOS auf Scar Inlet und auf dem unteren Abschnitt des Flask-Gletschers. Weiter oben sowie auf dem Leopard-Gletscher platzierten sie einfachere meteorologische und GPS-Stationen. Und auf einem Küstenvorsprung, der das Schelf überragt, montierten sie eine steuerbare Kamera.

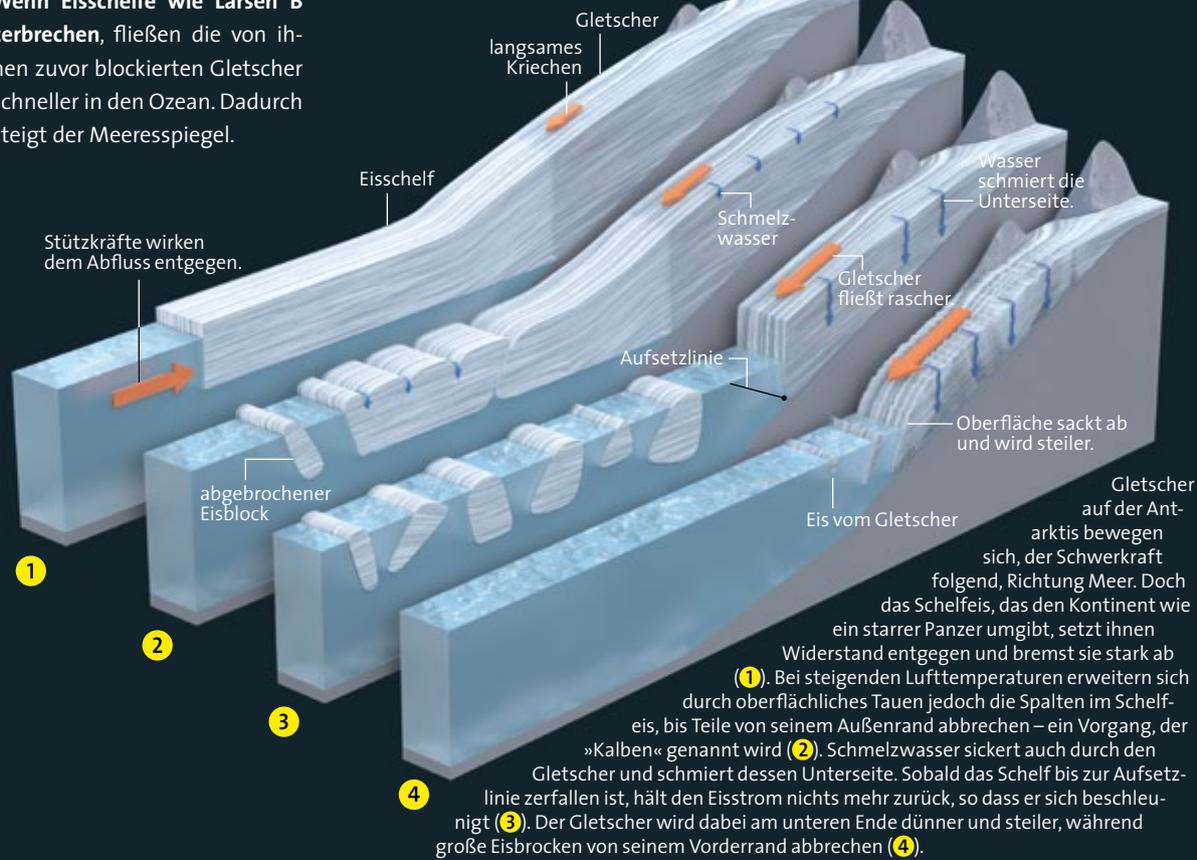
Scar Inlet, wo Scambos und sein Team ein provisorisches Camp errichteten, bot einige Überraschungen. So brachen die Schaufeln beim Graben im Schnee immer wieder in Hohlräume ein – Spalten im Eis, die unter dünnen Schneekrusten verborgen lagen. Eines Tages versank der Flugzeugpilot bis zur Taille in einer solchen versteckten Öffnung. Diese Risse hatten sich zuvor wohl unter einer dickeren Schneedecke befunden, die in den ausnehmend warmen Sommern der letzten Jahre jedoch größtenteils abgetaut war. Nun lagen sie dicht unter der Oberfläche.

Das Scar-Inlet-Schelf »steht auf der Kippe«, urteilt Scambos. Durch wiederholtes Auftauen und erneutes Gefrieren wird seine Oberfläche – so die Theorie des Forschers – immer härter werden, bis sich das Schmelzwasser in großen Tümpeln darauf sammeln kann, aus denen es sich über kurz oder



Verlust des Prellbocks

Wenn Eisschelfe wie Larsen B zerbrechen, fließen die von ihnen zuvor blockierten Gletscher schneller in den Ozean. Dadurch steigt der Meeresspiegel.



lang in frei gelegte Spalten ergießt. Die Wassermassen sollten durch ihr Gewicht diese Klüfte erweitern und vertiefen, bis sie den Grund des Eises erreichen. Die Druckwelle beim Aufbrechen einer Spalte fördert die Rissbildung an anderen, näher an der Küste gelegenen Stellen. Letztlich könnte das gesamte Eisschelf so innerhalb von nur wenigen Tagen zerfallen – vielleicht sogar innerhalb von Stunden.

Mit den AMIGOS-Instrumenten und den auch hier ins Eis gerammten Pflöcken hofft Scambos diese Theorie überprüfen zu können. Die Kameras werden zeigen, wie Schmelzwassertümpel entstehen und sich später in Spalten entleeren. Aufnahmen von den Pfostenreihen sollten erkennen lassen, auf welche Weise sich das Schelfeis dehnt und verformt. Die Kamera auf dem Küstenvorsprung zeichnet das Kalbungsmuster der Eisberge auf, während die Messgeräte auf den Gletschern Flask und Leppard zeigen, ob und wie diese sich beschleunigen, wenn das Eisschelf als Barriere wegfällt. Da Scambos Stationen im oberen und unteren Bereich der Eisströme aufgestellt hat, kann er feststellen, ob sie, wie vermutet, zunächst nur unten schneller fließen und sich dadurch dehnen und ausdünnen, so dass sich wie beim Sjögren-Gletscher Spalten bilden.

Laser-Höhenmessungen, die von dem inzwischen abgeschalteten ICESat und später von Flugzeugen durchgeführt wurden, haben ergeben, dass jene Gletscher auf der Antarktischen Halbinsel, die ihre Eisschelfe verloren haben, tatsächlich um fünf bis zehn Meter pro Jahr dünner werden. Die Frage lautet, in welchem Verhältnis das zur allmählichen Abnahme der Dicke seit dem Ende der letzten Eiszeit vor 12 000 Jahren steht. Ferner bleibt zu klären, ob ein Zerfall von Eisschelfen, wie er derzeit zu beobachten ist, wirklich nie zuvor in der jüngeren Vergangenheit stattgefunden hat.

Der Geologe Greg Balco vom Berkeley Geochronology Center, der auch mit an Bord der »Palmer« war, wollte dieser Frage nachgehen. Deshalb ließ er sich an einem kalten, wolkenverhangenen Morgen zusammen mit mir per Helikopter von dem Eisbrecher zum 30 Kilometer westlich gelegenen Sjögren-Gletscher bringen und am Fuß einer eisfreien, rundlichen Bergkuppe am Rand des Sjögren-Fjords absetzen. Das grau-weiß gestreifte Gestein zu unseren Füßen war spiegelglatt und von feinen Schrammen und Kratzern überzogen – Spuren, die der Gletscher vor Jahrtausenden hinterlassen hatte, als er noch dick genug war, um bis hier hinaufzureichen. »Die Politur sieht so frisch aus«, staunte Balco, »als wäre das

Eis erst vergangene Woche geschmolzen.« Überall ringsum verteilt lagen Steine, die nicht zum Untergrund passten – hier ein brauner vulkanischer Felsbrocken, dort ein Granitblock. Der Sjögren-Gletscher hatte sie von weit her gebracht und an ihrem heutigen Fundort abgelagert, als das Eis taute.

Balco benutzte diese Fremdkörper, um die Dickenänderungen des Sjögren-Gletschers während der vergangenen Jahrtausende zu ermitteln. Dazu stapfte er den Hang hinauf und sammelte in verschiedenen Höhenlagen Steine. Zu Hause untersuchte er diese später darauf, wie lange sie frei an der Oberfläche gelegen hatten. Dazu maß er winzige Mengen eines seltenen Isotops namens Beryllium-10, das entsteht, wenn kosmische Strahlen mit dem Stickstoff oder Sauerstoff in der Luft reagieren. Es gelangt mit dem Regen auf den Boden und schlägt sich dort auf frei liegendem Gestein nieder. Aus der Zeitspanne, welche die Felsbrocken in unterschiedlichen Höhenlagen am Berg Wind und Wetter ausgesetzt waren, wollte Balco schließlich ausrechnen, wie hoch der Gletscher jeweils gereicht hatte.

An einem der nächsten Tage sammelte der Forscher auch noch im Umkreis des Drygalski-Gletschers Steine ein. Ein Jahr später lagen die Ergebnisse der Analyse vor. Demnach haben sich beide Gletscher mindestens einmal innerhalb der letzten 4000 Jahre deutlich zurückgezogen. Sowohl das Prinz-Gustav-Schelf als auch Larsen A müssen während dieser Zeit also schon wenigstens einmal verschwunden sein.

Larsen B konnte wegen des undurchdringlichen Packeisgürtels nicht erreichen. Doch Eugene Domack, Meeresgeologe und Professor für Umweltforschung am Hamilton College in Clinton (New York), der die Expedition von 2010 leitete, war bei früheren Fahrten schon dort gewesen. Er und seine Kollegen hatten seinerzeit bei drei Meter tiefen Bohrungen mehrere Proben der Ablagerungen am Meeresboden unter dem ehemaligen Schelf gewonnen.

Bohrkerne von Sedimenten unter freiem Wasser enthalten in der Regel mikroskopisch kleine Kieselalgen, die nach dem Absterben herabsinken, und sind dadurch grün gefärbt. Die Bohrproben von Larsen B bestanden jedoch nur aus Gletscherschliff, der sich in Lagen feinen, sandigen Lehms abgesetzt hatte. Sie reichten 11000 Jahre zurück; das ergab die Radiokarbondatierung von Schalen darin eingebetteter einzelliger Mikroorganismen (Foraminiferen). Mindestens so lange war dieses Gebiet also von Eis bedeckt. Domack vermutet allerdings, dass das Larsen-B-Schelf schon seit Beginn

der letzten Eiszeit vor 100 000 Jahren existierte. Sein Zerfall ist also ein Novum in der jüngeren Erdgeschichte.

Zurück von der Expedition zum Südpol verfolgte Scambos voller Spannung die Daten von Scar Inlet, die via Satellit in seinem Büro in Boulder eingingen. Aber im wichtigsten Punkt wurde er vorerst enttäuscht: Das Schelf ist bis heute noch nicht zusammengebrochen. Trotzdem vermittelten die darauf installierten Instrumente höchst interessante Einblicke in teils spektakuläre Vorgänge vor Ort. So meldete die AMIGOS-Station am 14. und 15. Juli, in der dunkelsten Zeit des südlichen Polarwinters, eine regelrechte Hitzewelle. Die Temperatur schoss plötzlich um 43 Grad Celsius nach oben und überschritt +10 Grad Celsius. In Boulder wäre das T-Shirt-Wetter. Auslöser waren westliche Föhnwinde: Von den Bergen der Halbinsel herabströmende Luft verdichtete und erwärmte sich. Auch die Temperaturfühler, die bei der AMIGOS-Station einige Meter tief im Eis vergraben waren, registrierten einen jähen Temperaturanstieg – vermutlich hervorgerufen von versickerndem Schmelzwasser.

Niemand weiß, wie oft eine solche Föhnlage auftritt. Generell haben ablandige Winde an den Küsten der Antarktis aber in den vergangenen 30 Jahren um durchschnittlich 10 bis 15 Prozent zugenommen. Sie blasen jetzt jedes Jahr 50 bis 150 Milliarden Tonnen Schnee von der Oberfläche des Kontinents ins Meer, wo er schmilzt.

Keine Regeneration des Eisschelfs im Polarwinter

Bis vor Kurzem herrschte die Ansicht, die Eisschelfe vor der Antarktischen Halbinsel würden nach der sommerlichen Tauperiode zumindest im Winter wieder mit reichlich frischem Schnee versorgt. Doch als Scambos mit seinem Team im November 2010 für Reparaturarbeiten zu den Stationen zurückkehrte, fand er Scar Inlet wie zu Anfang des Jahres von offenen Spalten durchzogen. Sogar die Fußabdrücke von damals sowie die Spuren, welche die Kufen des Flugzeugs hinterlassen hatten, waren noch sichtbar. Selbst im Winter schien sich das Schelf also nicht mehr zu erholen.

Bemerkenswert sind auch die Daten von drei Präzisions-GPS-Einheiten, die Domack schon vor 2012 im Gestein rund um Larsen B und Scar Inlet installiert hatte. Sie zeigen, dass sich die Region um 1,8 Zentimeter pro Jahr hebt. Das liegt Domack zufolge an der abnehmenden Dicke der Gletscher: Die Gewichtsentlastung lässt die vom Eis nach unten gedrückte Erdkruste wieder aufsteigen. Die gemessene Hebungsrate übertrifft die von einer 150 Kilometer entfernten GPS-Station registrierten 0,8 Zentimeter pro Jahr deutlich. Der Wert dürfte weiter zunehmen, wenn das Scar-Inlet-Schelf zerbricht und die Gletscher dahinter beschleunigt abfließen. Anhand dieser Hebung lässt sich laut Domack die abruttschende Eismenge schätzen. Solche Berechnungen bei Scar Inlet sollten eine genauere Vorstellung davon geben, wie viel Eis verschwinden wird, wenn andere, weiter südlich gelegene Schelfe sich auflösen.

Dass sie das tun werden, steht außer Frage. Ein Eisschelf scheint nur bis zu einer sommerlichen Durchschnittstem-

W I S wissenschaft
in die schulen!



Didaktische Materialien für den Unterricht zum Thema
»Klimawandel« kostenfrei heruntergeladen unter:

www.wissenschaft-schulen.de/eis

Ein Helikopter transportiert Instrumente zu Gletschern und Eisschelfen (rechts), und ein langer Sedimentbohrkern vom Meeresboden der Barilari-Bucht (unten) könnte verraten, wann das Wasser hier in vergangenen Jahrhunderten von Schelfeis bedeckt war.



FOTOS: MARIA STENZEL

peratur von maximal null Grad Celsius existieren zu können. Diese Null-Grad-Linie wandert derzeit an der Antarktischen Halbinsel entlang Richtung Süden auf das Festland zu. Jedes Eisschelf, über das sie bisher hinwegzog, ist im folgenden Jahrzehnt zerbrochen. Südlich von Larsen B und Scar Inlet kommt dann Larsen C an die Reihe. In seinem Nordteil bilden sich im Sommer schon Schmelzwassertümpel. Mit 49 000 Quadratkilometern ist Larsen C größer als Niedersachsen. Es wird von mehr Gletschern gespeist als alle bereits verschwundenen Eisschelfe zusammen.

Noch beunruhigender ist allerdings das Schicksal der Schelfeisgebiete vor dem antarktischen Festland, in die weit aus größere Gletscher münden. Statt von oben schmelzen sie auf Grund warmer Meeresströmungen von der Unterseite her. Im Endergebnis läuft das freilich auf das Gleiche hinaus: Das Pine-Island-Schelf ist seit 1994 um 15 Prozent dünner geworden und die Fließgeschwindigkeit des einmündenden Gletschers schon um 70 Prozent gestiegen.

Die Auswirkungen des Zerfalls von Eisschelfen auf den Gletscherschwund werden in ihrem vollen Umfang erst in einiger Zeit sichtbar werden. Laut einer 2011 von Scambos, Truffer und Pettit publizierten Untersuchung beschleunigt sich ein Gletscher selbst noch 15 Jahre nach dem Verlust seines Eisschelfs. So hat der Röhss-Gletscher, der bis 1995 in das seither verschwundene Prinz-Gustav-Eisschelf mündete, inzwischen das Neunfache seiner einstigen Geschwindigkeit erreicht.

Der beschleunigte Gletscherabfluss könnte auch eine Beobachtung von Eric Rignot und Isabella Velicogna vom Jet Propulsion Laboratory der NASA in Pasadena (Kalifornien) erklären. Demnach nimmt der Eisverlust der Antarktis derzeit um etwa 25 Kubikkilometer pro Jahr zu. Im IPCC-Bericht von 2007 ist die Auflösung von Eisschelfen nicht berücksichtigt. Deshalb liegt der vorausgesagte Meeresspiegelanstieg von 18 bis 59 Zentimetern bis zum Jahr 2100 »wahrscheinlich

um einen Faktor von zwei bis drei daneben«, sagt Rignot. Der wahre Wert betrage wohl eher einen Meter. In einer 2009 publizierten Analyse schätzt ihn Martin Vermeer von der Universität Helsinki (Finnland) auf 75 bis 190 Zentimeter.

All das lässt es dringend geboten erscheinen, die Larsen-Region weiter intensiv zu beobachten. Leider macht es die Natur den Forschern ausgesprochen schwer. Vor der »Palmer«-Expedition 2010 war Domack schon fünfmal zu dem Gebiet unterwegs, konnte es wegen des Packeises aber nur zweimal erreichen. »Das kann wirklich frustrierend sein«, gesteht er. Doch die offenen Fragen treiben ihn und Scambos immer wieder zurück in diese unzugängliche Region. ~

DER AUTOR



Douglas Fox arbeitet als freier Journalist in San Francisco. Er schreibt für »Popular Mechanics«, »Esquire« und andere amerikanische Zeitschriften.

QUELLEN

- De Angelis, H., Skvarca, P.:** Glacier Surge after Ice Shelf Collapse. In: Science 299, S. 1560–1562, 2003
Domack, E. et al.: Stability of the Larsen B Ice Shelf on the Antarctic Peninsula during the Holocene Epoch. In: Nature 436, S. 681–685, 2005
Scambos, T. et al.: Calving and Ice-Shelf Break-up Processes Investigated by Proxy: Antarctic Tabular Iceberg Evolution during Northward Drift. In: Journal of Glaciology 54, S. 579–591, 2008

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1165738

Finanzmathematik nach der Krise

Der Zusammenbruch von Lehman Brothers im September 2008 hat den bis dahin üblichen Verfahren für die Preisberechnung von Finanzprodukten die Grundlage entzogen. Inzwischen etablieren sich jedoch neue, kompliziertere Methoden und die zugehörigen Algorithmen.

Von Roland Stamm

Mathematische Formeln in der Finanzwirtschaft sehen manchmal so aus wie physikalische Gesetze und werden sogar mit ähnlichen Argumenten hergeleitet, sind aber etwas völlig anderes. Vor allem verlieren sie gelegentlich ihre Gültigkeit und müssen durch neue ersetzt werden, weil das Verhalten der Menschen, das diesen Formeln zu Grunde liegt, sich ändert. Das geschieht immer dann, wenn sehr viele Leute neue Erfahrungen machen und daraufhin ihre Erwartungen an die Zukunft revidieren.

Eine solche, sehr einschneidende Erfahrung ist die jüngste Finanzkrise, die mit der Pleite der Investmentbank Lehman Brothers am 15. September 2008 ihren spektakulären Höhepunkt fand. In ihrem Gefolge mussten etliche bis dahin allgemein akzeptierte Berechnungsverfahren verworfen und neu gefasst werden. Mittlerweile steht die Software, die dem täglichen Geschäft der Banken zu Grunde liegt, auf völlig neuen theoretischen Füßen.

AUF EINEN BLICK

WAS IST MEIN WERTPAPIER HEUTE WERT?

1 Vor der Finanzkrise galten **Darlehen zwischen Banken** als risikolos, da die Pleite einer großen Bank nicht als ernst zu nehmende Möglichkeit erachtet wurde.

2 Der **Zusammenbruch von Lehman Brothers** entzog den herkömmlichen Methoden, mit denen die Preise von Finanzprodukten berechnet wurden, die Grundlage.

3 Nach wie vor gibt es **risikolose Finanzprodukte**. Nur taugen diese nicht als Maßstab zur Bewertung gewöhnlicher risikobehafteter Geschäfte. Erst langsam beginnen sich neue Berechnungsmethoden zu etablieren.

Zum besseren Verständnis bietet sich ein Vergleich mit einem früheren und daher inzwischen besser durchschauten Paradigmenwechsel in der Finanzwelt an. Die Black-Scholes-Formel von 1973, welche die Finanzwelt so einschneidend veränderte, dass ihre Entdeckung bereits 1997 mit einem Wirtschaftsnobelpreis gewürdigt wurde (Spektrum der Wissenschaft 12/1997, S. 24), beruht auf einer Analogie zwischen dem Marktgeschehen und einem physikalischen Diffusionsprozess. In beiden Fällen berechnet sich ein globaler Effekt durch Mittelung über sehr viele kleine unabhängige Einzelereignisse: Stöße zwischen Molekülen bei der Diffusion, einzelne Käufe und Verkäufe bei der Entwicklung eines Aktienkurses. Daraus ergibt sich eine Wahrscheinlichkeitsverteilung für die zukünftigen Zustände des Systems und aus dieser insbesondere ein fairer Preis für eine Aktienoption.

Beide Formeln sind sehr allgemein anwendbar und enthalten nur einen zahlenmäßigen Parameter, der die Besonderheiten des speziellen Stoffs beziehungsweise Wertpapiers erfasst: einerseits die Diffusionskonstante, andererseits die Volatilität, das ist das durchschnittliche Ausmaß, in dem der Kurs der Aktie (relativ zum jeweils aktuellen Kurs) von Tag zu Tag zu schwanken pflegt. Die Diffusionskonstante lässt sich aus einem geeigneten Experiment, die Volatilität durch Beobachtung des Aktienkurses bestimmen.

Damit sind alle Eingangsdaten für die Black-Scholes-Formel beisammen: Wenn jemand das Recht – aber nicht die Pflicht – erwerben will, zu einem Zeitpunkt T Monate in der Zukunft ein Wertpapier, das heute S Euro kostet, zu einem Preis von E Euro (dem »Strike«) zu kaufen, und obendrein der Zinssatz für eine risikolose Anlage bekannt ist, dann sagt ihm die Formel einen fairen Preis für dieses Recht. Das ist vor allem interessant für Optionen, für die der Markt noch keinen



Auf dem Höhepunkt der Finanzkrise 2008 fordern Demonstranten die Aktienhändler an der Wall Street auf, es ihren Vorgängern vom 25. Oktober 1929 gleichzutun. Die hatten sich wegen des Börsencrashes, der die damalige Weltwirtschaftskrise einläutete, in großer Zahl vom Balkon der Börse und aus den Fenstern zu Tode gestürzt (rechtes Bild).

Preis gefunden hat. Bis zum Aktiencrash vom Oktober 1987 galt die Formel zumindest unter Akademikern als korrekt (Spektrum der Wissenschaft 12/2009, S. 92).

Praktikern war jedoch von Beginn ihrer Verwendung an klar, dass etwas mit der Formel nicht stimmen konnte. Für ein konkretes Optionsgeschäft kann man mit ihr nicht nur aus der Volatilität den Preis errechnen – je höher die Volatilität, desto höher der Preis – sondern auch umgekehrt. Die so bestimmten Volatilitäten wichen von den in der Vergangenheit beobachteten Schwankungsbreiten erheblich ab. Die Volatilität ist also nicht so etwas wie eine Materialkonstante. Sie wird nicht gemessen, sondern – indirekt auf dem Weg über den Preis der Option – am Markt ausgehandelt.

Abschied von lieb gewordenen Theorien

Schlimmer noch: Nach dem Crash von 1987 brach das Konzept von der Volatilität als »Materialeigenschaft« eines Wertpapiers vollends zusammen. Entgegen dieser Theorie war die implizite, das heißt aus dem Preis zurückgerechnete, Volatilität eines Wertpapiers nicht für alle Optionen auf dieses Wertpapier dieselbe. Vielmehr ergaben sich für Optionen auf extreme Ereignisse – zum Beispiel heftige Kurssprünge nach oben oder unten – höhere Volatilitäten als für solche auf mäßige Kursschwankungen. Die entsprechende Kurve hat den Spitznamen »volatility smile« erhalten, weil sie einem lächelnden Mund entfernt ähnlich sieht (Bild S. 97).

Das heißt: Der Markt hatte durch die schlechten Erfahrungen beim Crash gelernt, dass extreme Kursschwankungen häufiger vorkommen, als nach der Theorie zu erwarten war, und forderte für diese Fälle entsprechend höhere Preise. Die Black-Scholes-Formel beruht – wie die Diffusionsgleichung – auf der Annahme, dass die Elementarereignisse, die Kursschwankungen auslösen, unabhängig voneinander und die Kurse selbst daher normalverteilt sind. Das trifft jedoch nicht zu. Vielmehr neigen Kurszuwächse dazu, sich selbst zu verstärken, weil Marktteilnehmer einen Trend zu erkennen glauben und dadurch die Nachfrage erhöhen. Noch ausgeprägter ist der Effekt bei fallenden Kursen, weil die Angst vor einem Verlust typischerweise größer ist als die Gier nach einem Gewinn. Der »volatility smile« ist also typischerweise ein ziemlich schiefes Grinsen.

Heute glaubt niemand mehr daran, dass die Formel mit einer einzigen Volatilität eine Aktie – oder Währung – korrekt beschreibt. Gleichwohl werden nach wie vor Volatilitäten veröffentlicht (»quotiert«) und zur Preisberechnung verwendet, jedenfalls für Optionen auf nicht exotische Ereignisse.

Während nach dem 1987er Crash die Theorie von einer »Materialeigenschaft« namens Volatilität beerdigt werden musste, fiel der gegenwärtigen Finanzkrise eine noch elementarere Grundannahme zum Opfer: dass nämlich Banken einander Geld zu einem zwar mit der Zeit schwankenden, aber doch jeweils einheitlichen Zinssatz ausleihen können. Seit

der Markt gelernt hat, dass auch ein sehr großes Institut pleitegehen kann, müssen die Banken beim Geldausleihen dieses Risiko mit einrechnen, was im Einzelfall nicht einfach ist.

Das klassische Mittel aus der Zeit vor der Krise ist die Diskontkurve. Sie beantwortet die Frage: Wie viel Geld müsste ich heute anlegen, um in einem, in zwei oder mehr Jahren einen Euro zurückzubekommen? Dabei geht es nicht darum, was ich mir zu dem zukünftigen Zeitpunkt für den Euro kaufen kann; die Geldentwertung wird nicht berücksichtigt.

Die Antwort auf die Frage hängt zunächst vom aktuellen Zinsniveau ab. Zur Zeit bekommt man auf dem Tagesgeldkonto bei einer Bank vielleicht 2 Prozent Zinsen pro Jahr, also müsste man der Bank $1/1,02 = 0,98039$ Euro geben, wenn man in einem Jahr einen Euro ausgezahlt bekommen möchte. Zweitens muss man bei der Antwort die Kreditqualität oder – anders ausgedrückt – das Ausfallrisiko des Schuldners berücksichtigen, also jener Person oder Institution, die den Euro zu zahlen verspricht. Statt einer Bank könnte man sein Geld auch der Bundesrepublik Deutschland geben. Die bietet allerdings einen deutlich geringeren Zinssatz für Anlagen über ein Jahr, nämlich aktuell null Prozent. Das heißt, dass ein Euro in einem Jahr heute ebenfalls einen Euro wert ist. Oder man gibt es der spanischen Staatskasse für 5 Prozent, wohl wissend, dass dieses Geld durchaus verloren gehen kann. Somit ist ein »spanischer Euro« heute $1/1,05 = 0,95238$ Euro wert. Es ergibt sich also für jeden Schuldner eine Preisliste, die so genannte Diskontkurve, die zu jedem zukünftigen Datum zeigt, wie viel ein dann gezahlter Euro heute wert ist (Bild S. 99). Diese Zahl, den »Diskontfaktor«, bezeichnen wir im Folgenden als $f(t)$, wobei t die Laufzeit in Jahren ist.

Den heutigen Wert einer zukünftig eingehenden Zahlung beliebiger Höhe erhält man dann, indem man den Betrag mit dem Diskontfaktor $f(t)$ für den Zeitraum t multipliziert. Man spricht auch vom Abdiskontieren von Zahlungen.

Wohlgemerkt: Der »heutige Wert« einer zukünftigen Zahlung ist zwar eine handfeste Größe insofern, als er den Preis angibt, zu dem man heute – in aller Regel – den Anspruch auf diese Zahlung kaufen oder verkaufen kann. Aber er ist zugleich Ausdruck der Erwartungen des Marktes, und die können sich bereits morgen erheblich ändern. So sinkt der Wert, wenn die Befürchtung anwächst, dass der Schuldner zahlungsunfähig wird. Wenn allerdings diese Katastrophe ausbleibt, schwankt der Wert immer weniger, bis er am Zahltag der tatsächlichen Zahlung entspricht.

Mit einer Diskontkurve kann man eine Reihe von Produkten bewerten, zu denen die zukünftigen Zahlungen (der »Zahlungsstrom«) von vorneherein bekannt sind. Nehmen wir als Beispiel ein festverzinsliches Wertpapier zum Nennwert von 100 Euro, das jährlich 4 Prozent Zinsen abwirft und nach 10 Jahren zurückgezahlt wird. Der heutige Wert P dieses Wertpapiers beträgt dann $P = 4f(1) + \dots + 4f(10) + 100f(10)$. Zu verschiedenen Diskontkurven ergeben sich unterschiedliche Preise P .

Umgekehrt kann man aus der Diskontkurve die so genannte Zinsstrukturkurve herleiten: Wenn ich einen Euro für t Jahre anlege, ohne zwischendurch dafür Zinsen zu kassieren, so bekomme ich am Ende der Laufzeit $1/f(t)$ Euro zurück. Rechnet man zum Beispiel mit einem jährlichen Zinssatz, so ist der Zinssatz $r(t)$, für den $f(t) = 1/(1+r(t))^t$ gilt, der Zinssatz für die Laufzeit t (in Jahren).

Glossar

Arbitrage: ein Geschäft, das mit Sicherheit keinen Verlust und mit positiver Wahrscheinlichkeit einen Gewinn abwirft. In einem funktionierenden Markt sollten Arbitrage-Möglichkeiten nicht oder nur für sehr kurze Zeit existieren.

Derivat: ein Finanzinstrument, dessen Wert von der Entwicklung eines Grundwertes abhängt. Beispiele sind Optionen, Futures und Swaps auf Grundwerte wie Aktien, Rohstoffe und Wertpapiere.

EURIBOR (Euro Interbank Offered Rate): täglich um 11 Uhr in Brüssel von der European Bank Federation auf der Basis von etwa 40 Meldungen europäischer Banken festgestellter Zinssatz, zu dem Banken bereit sind, einander Geld in Euro zu leihen. Für Periodenlängen von einem Tag, einem Monat, drei, sechs und zwölf Monaten verfügbar.

Finanzinstrument: alles, was man bei einer Bank oder Börse kaufen oder an Verträgen mit einer Bank abschließen kann: vom gewöhnlichen Sparbuch über Girokonten, Fondsanlagen, Wertpapiere aller Art und Turbo-Optionsscheine bis hin zu Kreditderivaten.

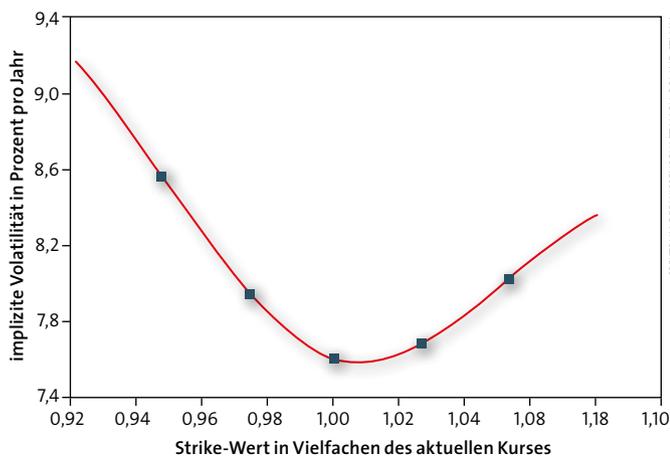
Fixing: die täglich veröffentlichte Schätzung (wörtlich: »Festlegung«) des marktgerechten Zinssatzes, berechnet durch Mittelung aus Meldungen großer Marktteilnehmer, oder auch dieser Schätzwert selbst. Variabel verzinst Instrumente sind in aller Regel an diesen Wert gekoppelt. Bedeutende Werte dieser Art sind LIBOR und EURIBOR.

Forward-Darlehen: ein Darlehen, das zu einem zukünftigen Zeitpunkt ausgezahlt wird, dessen Zinssatz aber bereits heute festgelegt wird.

LIBOR (London Interbank Offered Rate): das Pendant zum EURIBOR für Währungen wie US-Dollar, britisches Pfund und japanischer Yen; wird täglich um 11 Uhr Londoner Zeit von der British Bankers' Association festgestellt.

Periodenlänge: der vorab festgelegte zeitliche Abstand zwischen zwei regelmäßigen Zinszahlungen.

Swap: ein Derivat, bei dem zwei Zahlungsströme gegeneinander getauscht werden. Beim **Zinsswap** zahlt eine Partei in regelmäßigen Abständen feste Zinsen auf einen vorher festgelegten Betrag und empfängt dafür von der Gegenpartei regelmäßig variable (an LIBOR oder EURIBOR gekoppelte) Zinsen auf denselben Betrag. Beim **Basisswap** zahlen beide Vertragspartner variable Zinsen, aber mit verschiedenen Periodenlängen.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT NACH ROLAND STAMM

Der »volatility smile«: Aus dem am 11. September 1996 beobachteten Preis einer Option, in drei Monaten einen gewissen DM-Betrag zu einem vorgegebenen Kurs (»Strike«) in Dollar zu tauschen, errechnen sich für verschiedene Strike-Werte verschiedene Volatilitäten. Nach der Theorie, die der Black-Scholes-Formel zu Grunde liegt, hätte diese Kurve eine horizontale gerade Linie sein müssen.

Die Zinssätze, zu denen auf dem Markt Darlehen angeboten werden, schwanken von Tag zu Tag – zwar nur um einige hundertstel Prozentpunkte, aber solche kleinen Unterschiede können gewaltige Wirkungen haben. Im Prinzip werden diese variablen Zinssätze veröffentlicht (»quotiert«), wenn auch nur für eine spezielle Klasse von Schuldnern: Jeden Bankarbeitstag wird ein Mittelwert aus den Zinssätzen errechnet, zu denen sich Banken untereinander Geld leihen, und als Referenzzinssatz veröffentlicht. Zwei bekannte und bedeutende Referenzzinssätze sind LIBOR und EURIBOR.

Im Gegensatz zu den Referenzzinssätzen werden Diskontkurven nicht quotiert, auch wenn sie wesentlich – aber eben nicht ausschließlich – auf veröffentlichten Zinsen beruhen. Jeder Marktteilnehmer hat sie in der Schublade beziehungsweise in seinem Computer, eine für jede Qualitätsklasse von Schuldnern. Mit Hilfe einer solchen Kurve entscheidet er, welche Geschäfte er abschließt. Dabei können deren Konditionen zuweilen erheblich von den veröffentlichten abweichen. Da derartige Geschäfte üblicherweise am Telefon vereinbart werden und in keiner Statistik auftauchen, ist es zwar plausibel, aber keineswegs sicher, dass der durchschnittliche Zinssatz ungefähr gleich dem quotierten ist. Zu allem Überfluss sind auch quotierte Daten manipulierbar, wie sich erst kürzlich beim »LIBOR-Skandal« herausgestellt hat (Kasten S. 98/99).

Die Erstellung einer Diskontkurve ist ein typisches Interpolationsproblem der Mathematik. Gewisse Punkte der Kurve sind bekannt: Wenn ein marktüblicher Zins für eine Geldanlage auf ein Jahr zwei Prozent beträgt, dann ist, wie oben ausgerechnet, für Schuldner dieser Klasse $f(1)=0,98039$. Durch diese bekannten Punkte ist eine Kurve mit »vernünftigen« Eigenschaften zu legen. Insbesondere muss die Kurve monoton fallend sein und soll nirgends einen Knick oder andere Unregelmäßigkeiten aufweisen. Möglicherweise sind

diese Eigenschaften sogar wichtiger, als dass die Kurve die beobachteten Preise exakt trifft; die könnten ja auch fehlerbehaftet sein. Damit sucht man nicht mehr eine interpolierende, sondern eine Ausgleichskurve.

Jede Bank leitet ihre eigene Diskontkurve her. Dabei wählt sie die Preisbeobachtungen, aus denen die bekannten Punkte der Kurve werden, und die Interpolations- beziehungsweise Ausgleichsmethode im Allgemeinen nicht genau so wie andere Banken. So kommt es, dass verschiedene Banken auch sehr einfache Produkte häufig unterschiedlich bewerten.

Bis zum Ausbruch der Finanzkrise im Frühjahr 2008 waren diese Unterschiede unbedeutend. Seitdem kommt es jedoch entscheidend darauf an, welche Arten von Geschäften (welche »Finanzinstrumente« oder kurz »Instrumente«) in die Berechnung eingehen. Und nicht nur das; wo früher zur Bewertung sehr einfacher Zinsprodukte – etwa für einen Kreditvertrag mit einem an einen Referenzzinssatz wie LIBOR gekoppelten Zins – eine einzige Kurve ausreichte, braucht man jetzt zwei oder mehr. Dieser Paradigmenwechsel hat erhebliche Auswirkungen auf viele Bereiche einer Bank: den Handel, das Risikomanagement, die Buchhaltung und andere.

Noch schwieriger wird die Bewertung bei Derivaten; das sind Finanzinstrumente, deren Wert von anderen Größen wie etwa Aktienkursen, dem Ölpreis oder Zinsen abhängt. Ein typisches Beispiel ist die eingangs angesprochene klassische Aktienoption. Sondertilgungsrechte bei einem Darlehen sind ebenfalls Optionen. Sie haben für den Inhaber der Option – den Darlehensnehmer – einen Wert, den dieser seinem Geschäftspartner erstatten muss. Während der Erwerber einer Aktienoption deren Preis direkt bei Abschluss des Geschäfts zu entrichten hat, pflegt ein Darlehensnehmer ihn in Form eines erhöhten Zinssatzes und damit über die Laufzeit des Kredits verteilt zu zahlen. Auch ein Termingeschäft, bei dem sich beide Parteien verpflichten, ein Gut (Aktien, Rohstoffe, Darlehen, Wertpapiere) zu einem festgelegten Preis an einem zukünftigen Tag zu handeln, ist ein Derivat, da sein Wert bis zum Handelstermin vom Preis des Gutes abhängt.

Einfache Zinsderivate

Ein häufig vorkommendes Termingeschäft aus dem Bereich der Zinsprodukte ist das Forward-Darlehen. Dabei vereinbaren eine Bank und ein Darlehensnehmer verbindlich ein Darlehen in der Zukunft, zum Beispiel in einem Jahr, zu heute festgelegten Zinskonditionen. Damit kann sich der Darlehensnehmer gegen das Risiko steigender Zinsen absichern, weswegen Forward-Darlehen vor allem in Zeiten niedriger Zinsen sehr gefragt sind. Steigen die Zinsen tatsächlich, gewinnt der Darlehensnehmer in Form von gesparten Zinsen; sinken sie dagegen, so muss er mehr zahlen, als wenn er den Vertrag nicht abgeschlossen hätte.

Aller Voraussicht nach wird die Bank dabei aber weder Verlust noch Gewinn machen, da sie sich bereits bei Abschluss des Forward-Darlehens gegen das Risiko einer Zinsveränderung mit einem entsprechenden Gegengeschäft bei einer anderen Bank absichert. Am Ende einer solchen Absi-

cherungskette steht entweder eine Investmentbank, die bereit ist, die entsprechenden Zinsrisiken auf die Bücher zu nehmen und aktiv zu managen, oder ein risikofreudiger Investor wie zum Beispiel ein Hedgefonds.

Während Schuldner und Investoren wegen der Planungssicherheit feste Zinsen haben wollen, sind genau diese Produkte für die Banken problematisch. Ihr Wert schwankt nämlich mit dem allgemeinen Zinsniveau, und zwar gegenläufig. Wenn zum Beispiel eine Bank Bundesanleihen mit einer festen Verzinsung von 3 Prozent besitzt, das allgemeine Zinsniveau aber bei 4 Prozent liegt, würde jeder Käufer dieses Wertpapiers einen Zinsverlust von einem Prozentpunkt über die Restlaufzeit erleiden. Er kauft es der Bank daher nur ab, wenn sie ihn durch einen entsprechend niedrigeren Preis für diesen Verlust entschädigt. Also muss die Bank es mit diesem verminderten Wert in der Bilanz oder zumindest als so genannte Stille Last aufführen.

Auch ein festverzinsliches Darlehen schwankt im Wert. Für den privaten Häuslebauer hat das zunächst keine Konsequenzen, weil er mit seinem Kredit ohnehin keinen Handel treiben kann. Ihm bleibt nur, sich zu ärgern, wenn er das eigene Darlehen noch zu 5 Prozent bedienen muss, während überall welche zu unter 3 Prozent angeboten werden. Auch die Vorfälligkeitsentschädigung, die ein Schuldner bei vorzeitiger Kündigung eines festverzinslichen Darlehens zu entrichten hat, hängt vom allgemeinen Zinsniveau ab.

Man kann sich das Zinsniveau wie einen Wasserpegel vorstellen: Festverzinsliche Produkte sind bei einem bestimm-

ten Wert festgehalten und können daher unter Wasser stehen oder auf dem Trockenen liegen. Variabel verzinsten Produkte dagegen schwimmen wie ein Korken mit dem Pegel auf und ab. Ein risikoloses Darlehen, das stets den »fairen«, das heißt marktüblichen Zinssatz zahlt, hat per definitionem stets seinen Nennwert als Wert. Das gilt für ein Darlehen, das alle drei Monate auf den Referenzzinssatz angepasst wird, exakt zu den Fixing-Terminen und zwischendurch zumindest näherungsweise. Im Effekt ist für eine Bank – entgegen der Intuition – ein Produkt, dessen zukünftige Zinsen sie nicht kennt, da sie an die Zinsen von morgen gekoppelt sind, weniger riskant als eines, dessen Zinsen bis zum Laufzeitende festgelegt sind.

Das Risiko aus dem Geld, das die Bank zu einem festen Zinssatz herausgibt, zum Beispiel indem sie ein Darlehen vergibt oder festverzinsliche Wertpapiere kauft, kann sie dadurch kompensieren, dass sie sich Geld zu einem festen Zinssatz ausleiht, etwa indem sie Pfandbriefe ausgibt. Das wird jedoch nie vollständig passend gelingen. Es bleibt ein Nettzahlungstrom zu festem Zinssatz. Um sich des zugehörigen Risikos zu entledigen, schließt die Bank mit einer anderen Bank ein Zinstauschgeschäft ab, einen so genannten Swap.

Theoretisch verleiht dabei Bank A beispielsweise eine Million Euro an Bank B zu einem fest vereinbarten Zinssatz; gleichzeitig verleiht B an A eine Million Euro zu einem variablen Zinssatz. Der Idee nach ist letzterer zu jeder Zeit gleich dem marktüblichen Zins. Da dieser aber eine theoretische und nicht ohne Weiteres bestimmbare Größe ist, einigt man

Der LIBOR-Skandal

Seit einigen Monaten hat sich ein bis dahin kaum bekanntes Akronym seinen Weg ins Bewusstsein vieler Zeitungsleser gebahnt: Der LIBOR (London Interbank Offered Rate), Oberbegriff für Referenzzinssätze für Zinsgeschäfte mit einem weltweiten Volumen von Hunderten von Billionen Dollar, wurde offensichtlich jahrelang von mehreren Banken manipuliert. Wie konnte das passieren? Und wie profitierten die Banken von der Manipulation?

Der englische Bankenverband BBA berechnet seit 1986 Referenzzinssätze zu vielen wichtigen Währungen und zu Laufzeiten von einer und zwei Wochen, von einem bis zwölf Monaten sowie Übernachtgeschäften. Die Werte werden an jedem Bankarbeitstag um 11 Uhr Londoner Ortszeit bestimmt und auf der Stelle veröffentlicht (»Fixing«).

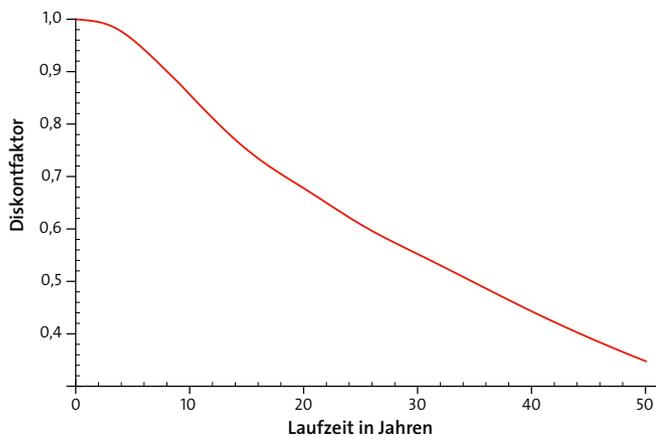
An dem Verfahren nehmen mindestens sechs und höchstens 18 Banken teil; die Zahl schwankt, da nicht alle Banken in allen Währungsräumen Geschäfte abwickeln. Jede teilnehmende Bank meldet bis zum Stichzeitpunkt 11 Uhr zu jeder Währungs-Laufzeit-Kombination, zu welchem Zinssatz sie glaubt, von anderen Banken Geld geliehen zu bekommen. Die gemeldete Zahl basiert also nicht auf den tatsächlich an diesem Vormittag durchgeführten Transaktionen, sondern auf dem Gutdünken der Teilnehmer.

Die gemeldeten Werte werden nach Größe angeordnet, und das obere und das untere Viertel werden ignoriert. (Falls die Zahl der Teilnehmer nicht durch vier teilbar ist, wird die nächstkleinere Anzahl an Werten gestrichen). Der Durchschnitt der restlichen, mittleren Werte ist der gesuchte LIBOR-Zinssatz.

Eine Bank allein kann also keine drastischen Bewegungen verursachen, da einzelne Extremwerte verworfen werden. Wenn sich aber mehrere Banken absprechen, können sie durchaus das Fixing beeinflussen. Dies ist offenkundig in der Vergangenheit geschehen. Die britische Barclays Bank hat bereits zugegeben, an einem solchen Kartell beteiligt gewesen zu sein, und dafür in einem Vergleich 500 Millionen Dollar an die britische und amerikanische Finanzaufsicht gezahlt. Die Deutsche Bank hat Kronzeugenstatus bei der EU-Kommission und in der Schweiz bekommen, betont aber, dass dies kein Schuldeingeständnis sei. Unter den etwa einem Dutzend mutmaßlich beteiligten Banken sind große Namen wie JPMorgan, Société Générale und HSBC.

Wie kann eine Bank von einer solchen Manipulation profitieren?

Die Darlehensverträge und deren Derivate, die direkt oder indirekt an den LIBOR gekoppelt sind, haben ein Volumen in der Grö-



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH ROLAND STAMM

Die Euro-Diskontkurve für besicherte Derivate vom 20. Juni 2012. Die Gestalt der Kurve ändert sich geringfügig von Tag zu Tag, aber sie beginnt stets bei dem Wert 1 (ein Euro, der mir heute ausbezahlt wird, ist heute einen Euro wert) und ist monoton fallend (es ist immer besser, sein Geld früher als später wiederzubekommen).

sich ersatzweise darauf, dass der variable Zinssatz zu vereinbarten Stichtagen, typischerweise alle drei Monate, auf einen Referenzzinssatz wie LIBOR oder EURIBOR neu festgelegt wird. Tatsächlich fließt die Million weder von A zu B noch umgekehrt, also muss auch keine der Banken um dieses Geld fürchten. In diesem Sinn ist das Geschäft risikolos. Der Zahlungsstrom besteht nur aus der Differenz der Zinszahlungen.

Damit diese Bedingung erfüllt ist, muss das gesamte Geschäft, das heißt, das eine fiktive Darlehen minus das andere, bei Vertragsabschluss den Wert null haben. Abweichungen von der fairen Swaprate auf der festen Seite pflegen die Beteiligten auszugleichen, indem sie bei Vertragsabschluss einen festen Zu- beziehungsweise Abschlag (den »Spread«) auf den Referenzzinssatz vereinbaren.

Ein Beispiel mit Zahlenwerten vom 27. September 2012: Die zehnjährige Swaprate für feste Zinsen gegen 6-Monats-EURIBOR beträgt 1,746 Prozent. Das heißt, wenn ich zehn Jahre lang jährlich diese Rate zahle und dafür halbjährlich EURIBOR empfangen, hat das aus heutiger Sicht für mich den Wert null. Wenn ich ein festverzinsliches Papier mit dieser Laufzeit, aber mit 2 Prozent Verzinsung, gegen ein variables mit 6-Monats-EURIBOR tauschen will, werde ich auf diese variablen Zinsen einen Spread in Höhe der Differenz von 0,254 Prozent verlangen (und bezahlt bekommen).

Die 6-Monats-EURIBOR-Rate vom gleichen Tag beträgt übrigens 0,446 Prozent. In die höhere Swaprate ist eben die Erwartung eingegangen, dass die zukünftigen Zinsen und damit auch die EURIBOR-Fixings deutlich höher liegen werden als heute. Die Swaprate ist eine Art Mittelwert der erwarteten zukünftigen EURIBOR-Fixings.

Eine andere Art von Swap ist der Basisswap. Dabei zahlen beide Parteien auf einen festgelegten Nennwert variable Zinsen, aber mit verschiedenen Zahlungsperioden. Zum Beispiel zahlt Bank A den 3-Monats-EURIBOR alle 3 Monate, während Bank B halbjährlich den 6-Monats-EURIBOR zahlt.

Benennung von 600 Billionen Dollar; ein hundertstel Prozentpunkt Unterschied im Jahreszins macht dann 60 Milliarden Dollar pro Jahr aus. Typischerweise wird zu vorab festgelegten Stichtagen der Zinssatz eines lang laufenden Darlehens an den dann gültigen LIBOR-Wert angepasst. Daher ist es für die Bank günstig, den LIBOR an einem Tag nach oben zu manipulieren, an dem ein großes Volumen von ihr ausgegebener Darlehen (minus den von ihr zu bedienenden Krediten) zur Anpassung (zum »Fixing«) ansteht. Am nächsten Tag kann entsprechend eine Manipulation nach unten vorteilhaft sein. Einzelnen Händlern ist es angeblich gelungen, den Gewinn ihrer Bank durch Verschieben des LIBOR um einen Basispunkt oder 0,01 Prozentpunkte an einem einzigen Tag um zwei Millionen Euro zu erhöhen.

Offensichtlich war diese Gewinnsteigerung vor Ausbruch der Finanzkrise das Hauptmotiv zur Manipulation. Danach bestimmte eine andere Sichtweise das Handeln der Banken: Die Höhe des von einer Bank zu zahlenden Zinssatzes im Vergleich zum Durchschnitt lässt Schlussfolgerungen auf ihre vom Markt wahrgenommene Kreditqualität zu. Nach Ausbruch der Krise Anfang 2008 hatten die Banken deshalb ein großes Interesse daran, ihre

Refinanzierungskosten möglichst niedrig darzustellen und dadurch der Schein der Solidität aufrechtzuerhalten. So wurden ab 2008 vor allem zu niedrige Zinsen an die BBA gemeldet. Der ehemalige Chef der Barclays Bank, Bob Diamond, behauptet sogar, dass die Bank of England ihn mehr oder weniger deutlich dazu aufgefordert habe.

Auf die verdächtigten Banken kommen Schadenersatzforderungen zu, die nach Einschätzung von Analysten zweistellige Milliardenbeträge erreichen könnten.

Neben der Frage nach der Bestrafung der Missetäter diskutiert man, wie die LIBOR-Feststellung manipulationsfest zu machen wäre. Da der Geldmarkt aber recht intransparent ist, weil alle Geschäfte nur zwischen den beiden jeweils beteiligten Banken abgesprochen werden, können nur die Banken selbst wissen, zu welchen Zinsen sie tatsächlich Geld geliehen bekommen. Eine Vergrößerung der Anzahl der teilnehmenden Banken allein wird das System wahrscheinlich nicht robuster machen: Die für den Euro relevanten Zinssätze – genannt Euro Interbank Offered Rate oder EURIBOR – basieren auf den Meldungen von 43 Banken, aber auch beim EURIBOR wird wegen des Verdachts auf Manipulationen ermittelt.

Damit können Banken die Fristen ihrer Zinszahlungen von einer Frequenz auf eine andere umstellen. So wird eine Bank, die ein variabel verzinstes Darlehen mit halbjährlichen Zahlungen vergibt, sich selbst aber mit vierteljährlichen Zahlungen refinanziert, ihre Zinseinkünfte aus dem Darlehen mit einem Basisswap von 6 auf 3 Monate transformieren wollen.

Der Swapmarkt ist sehr liquide. Es gibt viele Marktteilnehmer mit unterschiedlichen Interessen und Erwartungen, die jederzeit Zinstauschgeschäfte der einen oder anderen Art anbieten: variabel gegen fest oder umgekehrt. Man findet daher stets einen passenden Swap.

Bewertungen vor der Krise

Wie berechnet man nun den Preis eines Derivats, zum Beispiel eines Forward-Darlehens? Der einfachste Fall ist ein Forward Rate Agreement (FRA). Dabei einigen sich die Parteien bereits heute auf einen Zinssatz K für ein Darlehen, das erst in der Zukunft ausgezahlt wird. Nehmen wir an, A will sich in sechs Monaten einen Euro von B leihen und ihn drei Monate später mit Zinsen zurückzahlen. (Alles, was wir im Folgenden berechnen, ist proportional zur Kreditsumme. Also schadet es nicht – und vereinfacht das Rechnen –, wenn wir einen Kredit in der absurden Höhe von einem Euro betrachten.) Was ist ein fairer Wert für K ?

Solche Fragen pflegt man durch ein so genanntes Replikationsargument zu beantworten. Man »repliziert die Zahlungsströme«, das heißt, man findet einen Satz von einfacheren Geschäften (ein »Portfolio«), die zusammen dieselben Zahlungsströme erzeugen wie das in Frage stehende Geschäft. Das replizierende Portfolio hat also in neun Monaten denselben Wert wie das ursprüngliche. Dann, so das übliche Argument, muss es bereits heute denselben Wert haben. Wäre dem nicht so, dann könnte jemand »Arbitrage« betreiben, das heißt, das eine Geschäft in der Rolle von A , das andere in der Rolle von B abschließen und dabei risikolos und ohne Einsatz eigenen Geldes Gewinn machen. Wenn das möglich wäre, dann wäre bestimmt schon jemand anders auf die Idee gekommen und hätte durch seine Nachfrage nach den entsprechenden Geschäften die Preise so verändert, dass der Arbitragegewinn auf null zusammenschrumpft.

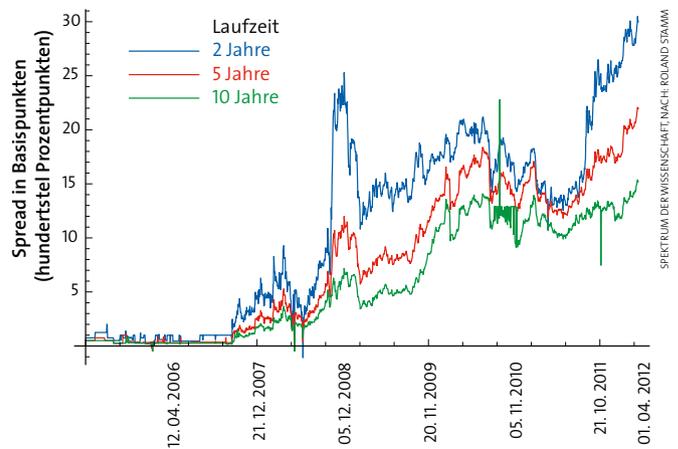
Die Zahlungsströme unseres Beispiel-FRAs sind

- 1 Euro von B an A in sechs Monaten,
- $1 + K/4$ Euro von A an B in neun Monaten.

(Zinssätze werden stets auf ein Jahr bezogen angegeben; für einen Anlagezeitraum von drei Monaten sind also Zinsen in Höhe von $K/4$ mal dem Kreditbetrag fällig.) Wir nehmen nun zusätzlich an, dass ein Marktteilnehmer Geld zum risikolosen Zinssatz anlegen und ausleihen kann. Dann kann A seine Zahlungsströme replizieren, indem er heute

- $f(0,75)(1 + K/4)$ Euro für neun Monate ausleiht, wofür er in neun Monaten $1 + K/4$ Euro zurückzahlen muss;
- $f(0,5)$ Euro für ein halbes Jahr anlegt, wofür er in sechs Monaten einen Euro zurückbekommt.

Dabei ist f die Diskontkurve zum risikolosen Zinssatz. Aus der Bedingung, dass heute netto kein Geld fließt, ergibt sich



Mit dem Ausbruch der Finanzkrise musste derjenige, der ein variabel verzinsliches Wertpapier mit Zinsanpassung alle sechs Monate gegen ein gleichartiges mit Zinsanpassung alle drei Monate tauschte, einen Aufschlag (den »Basisspread«) auf die replizierte Rate zahlen. Dieser ist ein indirektes Maß dafür, wie groß der Markt das Risiko einer Bankpleite oder einer allgemeinen Liquiditätsklemme einschätzt. Offensichtlich hält der Markt nach einer gewissen Beruhigung dieses Risiko 2012 für so hoch wie auf dem Höhepunkt der Krise oder sogar für noch höher.

für K die Gleichung $f(0,75)(1 + K/4) - f(0,5) = 0$ mit der Lösung

$$K = 4(f(0,5)/f(0,75) - 1).$$

Das wie in diesem Beispiel definierte K heißt replizierte Forward-Rate. In ihren Wert gehen – über die Diskontkurve f – die Erwartungen des Markts ein. Genauer gesagt stellt sich heraus, dass die replizierte Forward-Rate mathematisch dem Erwartungswert (unter einem geeigneten Wahrscheinlichkeitsmaß) des zukünftigen Zinssatzes entspricht. Sie ist also ein Mittelwert über alle vom Markt für möglich gehaltenen Zinsen für Dreimonatsgeld, wie sie zum Beispiel in den entsprechenden EURIBOR-Fixings dokumentiert sind.

Forward-Raten werden für viele Periodenlängen und Termine quotiert. Vor der Krise waren die replizierten und die quotierten Forward-Raten praktisch identisch und unabhängig von den übrigen Parametern des Geschäfts (im Beispiel die sechs Monate Wartezeit und die drei Monate Laufzeit des Kredits).

Auch einen Basisswap konnte man bis 2007 sehr einfach bewerten: Bei Abschluss und zu jedem gemeinsamen Fixing-Termin war dieser genau null Euro wert, denn ein variabel verzinstes Wertpapier ist zumindest zum Fixing-Termin immer den Nominalbetrag wert. Demnach ist ein Basisswap nichts anderes als der Austausch von zwei variabel verzinsten Wertpapieren, die somit beide gleich viel wert sind, mit verschiedenen Fixing-Perioden. Nur zwischen den Fixing-Terminen kann es zu leichten Kursschwankungen kommen.

Ein normaler Zinsswap war ebenfalls einfach zu bewerten, da man ihn als Tausch eines variabel- gegen ein festverzinsli-

ches Wertpapier auffassen kann. Ersteres ist zum Fixing-Termin immer den Nominalbetrag wert, also muss man nur ein gewöhnliches festverzinsliches Wertpapier durch Abdiskontieren der bekannten Zahlungen bewerten und dann vom Wert den Nennwert abziehen. Auch hier kann es zwischen den Fixings zu Schwankungen kommen, aber diese sind ebenfalls nicht schwierig zu berechnen.

Im Gegensatz zu Aktienoptionen, deren Wert für den Inhaber stets positiv oder allenfalls null ist, können Derivate wie FRAs oder Swaps sowohl einen positiven als auch einen negativen Wert haben, je nachdem, wie sich das Zinsniveau entwickelt. Dieser Wert steht im Risiko: Wenn von zwei Banken A und B, die ein Derivat miteinander abgeschlossen haben, das Portfolio von A einen negativen Wert hat, verliert B diesen Wert, wenn A ausfällt.

Um dieses Risiko abzudecken, pflegen beide Banken bereits bei Vertragsabschluss eine so genannte Besicherung zu vereinbaren: Der Vertragspartner mit dem jeweils schlechter bewerteten Portfolio – im Beispiel A – gibt die Wertdifferenz als Sicherheit (»Collateral«) an den anderen, und zwar in der Regel in Form von Bargeld. Die Differenz wird täglich neu berechnet und das Collateral entsprechend angepasst. Das verbleibende Verlustrisiko ist also auf die Veränderung dieser Wertdifferenz von einem Tag zum anderen beschränkt. Diese Sicherheitslücke kann sich allenfalls auf einige Tage verlängern, bis Dispute über die Bewertung, die gerade bei komplexeren Produkten immer wieder vorkommen, aufgelöst sind.

Kleine Unterschiede, große Auswirkungen

Mit Ausbruch der Krise im Frühjahr 2008 veränderte sich der Markt. So waren bei Basisswaps auf einmal Aufschläge auf der Seite mit den kürzeren Perioden zu zahlen, die so genannten 3-Monats-6-Monats-Basisspreads (Bild links). Die replizierten und die quotierten Forwards stimmten nicht mehr überein (Bild rechts). Mit dem Ausfall von Lehman Brothers erreichte diese Unsicherheit ihren absoluten Höhepunkt. Wenn man bedenkt, dass Ende 2008 weltweit Zinsderivate mit Nennwerten von etwa 403 Billionen ($4,03 \cdot 10^{14}$) Dollar ausstanden (dieser Betrag wuchs trotz oder vielleicht auch gerade wegen der Finanzkrise bis Mitte 2010 auf 434 Billionen Dollar), dann kann man ermessen, dass selbst kleine Unterschiede in der Bewertung sehr große Auswirkungen haben können.

Was vor der Krise nur üblich war, ist inzwischen de facto zum Zwang geworden. Seit dem Zusammenbruch von Lehman Brothers im Herbst 2008 kann eine Bank ohne eine Vereinbarung über Sicherheiten (»Collateral Agreement«) praktisch keine Derivate mehr abschließen.

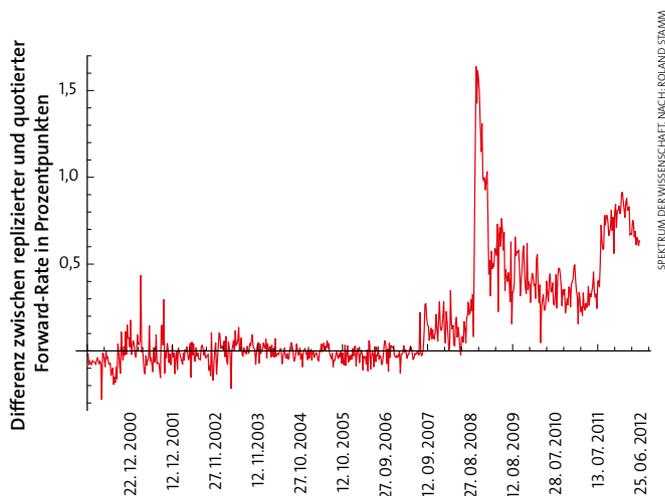
Das Geld für die Sicherheitszahlung muss sich Bank A aus dem obigen Beispiel – gegen Zinszahlung – am Markt beschaffen, während B sich Refinanzierungskosten in gleicher Höhe erspart. B zahlt zwar an A für die Sicherheiten Zinsen in Höhe des Zinssatzes zum nächsten Werktag (die »Overnight Rate«); die sind aber in der Regel deutlich geringer, als wenn sich B das Geld am Markt besorgen müsste. Insgesamt läuft

das darauf hinaus, dass Bank A für die Wertdifferenz, die sie Bank B schuldig ist, Kreditzinsen zahlt. Durch diesen Kunstgriff bleibt das Geschäft (fast) risikolos, obgleich im Gegensatz zur Vorkrisenzeit das Risiko einer Bankpleite in die Kalkulation einbezogen ist.

Damit funktioniert jedoch das oben angeführte Replikationsargument nicht mehr. Die Banken haben gelernt, dass selbst sehr gut bewertete Banken, die am LIBOR-Verfahren teilnehmen, pleitegehen können. Also werden Geldmarktgeschäfte zwischen Banken nicht mehr als risikolos angesehen, und die Instrumente, die zur Replikation verwendet wurden – Darlehen und Geldanlage –, passen nicht mehr zum Derivat. Denn bei einem Darlehen muss der Verleiher fürchten, dass er sein Geld nicht wiederbekommt, auch wenn der Darlehensnehmer eine Bank ist; also fordert er einen Risikoaufschlag. Der geht in die replizierte Rate ein, während er für ein Derivat nicht erforderlich ist. Deswegen liegt die replizierte Rate über der quotierten.

Mit demselben Argument kann man auch das Entstehen des Basisspreads erklären. Swaps sind besicherte Derivate, die aber an die EURIBOR-Raten gekoppelt sind. Die jedoch beziehen sich auf echte Darlehensgeschäfte und enthalten daher implizit auch Risikoaufschläge, die mit der Laufzeit ansteigen: In drei Monaten kann weniger Unerwartetes passieren als in sechs, und von einem Tag auf den anderen fast gar nichts. Der Sechsmonatszinssatz ist also typischerweise deutlich höher als der Dreimonatszinssatz. Dafür gibt es aber in einem Swap keinen Grund, denn der ist ja als besichertes Derivat (fast) ausfallsicher. Deswegen muss der Zahler mit der kürzeren Periode den entsprechenden Aufschlag als Ausgleich zahlen (Bild S. 100).

Mit welchen Modellen kann nun die Finanzmathematik die Ereignisse am Markt nachvollziehen? Bisher war es üblich, die Diskontkurve für Banken als Schuldner aus quotier-



So hoch lag der replizierte (durch Abgleich mit einfacheren Geldanlagen gewonnene) Zinssatz für ein Forward Rate Agreement (FRA), das die Zinsen in drei Monaten für drei Monate festlegt, über dem quotierten (veröffentlichten) Zinssatz. Die Unterschiede bis 2007 sind im Wesentlichen Ungenauigkeiten aus den Daten.

ten Derivatpreisen abzuleiten. Das war korrekt, solange ein Darlehen an eine Bank als risikolos und damit einem (risikolosen) Derivat vergleichbar gelten durfte. Das ist seit der Krise nicht mehr der Fall. Vielmehr spricht inzwischen vieles dafür, die Diskontkurve von den Overnight-Raten herzuleiten, also den Zinssätzen, die auch für die oben genannten Sicherheiten gelten. Seit einigen Jahren wird dieses Vorgehen von großen Investmentbanken propagiert und findet zunehmend Anhänger.

Zum Bewerten der eigenen Forderungen muss es nach wie vor (für alle Zahlungen von vergleichbarer Kreditqualität) eine einheitliche Diskontkurve geben; alles andere würde alsbald auf Widersprüche führen. Die taugt aber nicht mehr zum Replizieren der Forward-Raten. Ersatzweise konstruiert man zu jeder Periodenlänge – 1, 3, 6 und 12 Monate – eine eigene Kurve. Diese »Forward-Kurven« sehen zwar aus wie Diskontkurven, sind aber zum Diskontieren nicht brauchbar. Vielmehr sind sie abstrakte Rechenhilfsmittel. Man leitet sie aus Instrumenten der zugehörigen Periodenlänge her, und zwar so, dass die mit Forward-Kurven anstelle der Diskontkurven replizierten Forward-Raten genau gleich den quotierten sind. Und man nutzt sie, um daraus zukünftige Zinssätze und damit EURIBOR-Fixings zu prognostizieren, was mit der Diskontkurve nicht mehr gelingt.

Damit gibt man nicht nur das Prinzip »eine Kurve pro Währung« auf; das Leben wird insgesamt komplizierter. Schon für die Bewertung eines Basiswaps benötigt man statt einer einzigen bis zu drei verschiedene Kurven – oder noch mehr, wenn zusätzlich fremde Währungen involviert sind. Waren bisher die Marktrisiken eines Finanzprodukts nur durch Veränderungen auf einer Kurve gegeben, so muss man nun mehrere Kurven gleichzeitig im Auge behalten und zusätzlich deren statistische Korrelationen untereinander bestimmen. Das erhöht die Anforderungen an das Risikomanagement und im Allgemeinen auch die Kosten, sich gegen diese Risiken abzusichern.

Das gilt noch viel stärker für kompliziertere Produkte, die nur mit stochastischen Modellen bewertet werden können, da sich auf einmal die Zahl der zu bestimmenden Parameter erheblich erhöht. Dies ist insbesondere bei Geschäften der Fall, die sich auf zwei oder mehr Währungen beziehen. Die akademische Gemeinschaft steht hier gerade erst am Anfang der Forschung.

Für einen Finanzmathematiker noch viel erstaunlicher ist die Tatsache, dass seit dem Zusammenbruch von Lehman Brothers die Märkte die Bedingung, dass es keine Arbitrage geben kann, nicht mehr zu beachten scheinen, insbesondere, wenn Derivate im Spiel sind. Der Grund ist wohl wie bei den oben besprochenen Änderungen, dass zum einen die Kreditwürdigkeit selbst exzellent beurteilter Schuldner wie der USA oder Deutschlands wegen der steigenden Neuverschuldung in Zweifel gezogen wird und zum anderen die erwarteten Refinanzierungskosten von Sicherheiten eine Rolle spielen. So verlangen mittlerweile Investmentbanken für ein und dasselbe Derivat unterschiedliche Preise je nachdem, wel-

chen Status der Kontrahent hat und in welcher Währung Sicherheiten hinterlegt werden.

Wenn der Markt aber Arbitrage-Möglichkeiten erlaubte, brähe für die Quants (»Quantitative Analysts«) – die Finanzmathematiker, die sich mit der Bewertung von Finanzprodukten beschäftigen – eine Welt zusammen. Denn das würde bedeuten, dass Finanzprodukte keinen eindeutigen Preis mehr haben. Vielleicht gibt es die scheinbaren Arbitrage-Möglichkeiten ja auch gar nicht, da in der Theorie die entsprechenden Kosten und Risiken noch nicht oder nur unzureichend berücksichtigt werden. In jedem Fall ist noch ein langer Weg zurückzulegen, bis die Theorie wieder mit dem Marktgeschehen in Einklang gebracht werden kann.

Eine weitere Quelle neuer Komplikationen ist eine Bewertungskomponente, die Credit Value Adjustment (CVA) genannt wird. Das CVA beschreibt den Erwartungswert des Verlusts, den der Ausfall eines Derivatkontrahenten verursacht. Selbst besicherte Derivate sind nämlich, wie oben schon bemerkt, nicht vollkommen ohne Kreditrisiko. Dieses Restrisiko misst eben das CVA. Für Derivate einer Bank mit Kunden, die keine Sicherheiten stellen, ist das Risiko und damit das CVA natürlich noch größer.

Die Kreditwürdigkeit und die damit verbundenen Refinanzierungskosten beeinflussen inzwischen wesentlich die Bewertung von Finanzinstrumenten. Damit musste sich der Markt von der früheren einheitlichen Bewertung verabschieden. Und wie beim Smile von 1987 ist davon auszugehen, dass auch kein Weg dorthin zurückführen wird. ☞

DER AUTOR



Roland Stamm hat in Mainz Mathematik studiert und in Münster über Algebraische Topologie promoviert. Er ist bei der Deutschen Pfandbriefbank in Eschborn für Risikomethodik und die Bewertung komplexer Finanzprodukte zuständig.

QUELLEN

Bianchetti, M.: Two Curves, One Price: Pricing & Hedging Interest Rate Derivatives Decoupling Forwarding and Discounting Yield Curves. November 2008. <http://ssrn.com/abstract=1334356>

Kenyon, C., Stamm, R.: Discounting, LIBOR, CVA and Funding. Palgrave Macmillan, London 2012

Mercurio, F.: Interest Rates and the Credit Crunch: New Formulas and Market Models. März 2009. http://papers.ssrn.com/abstract_id=1332205

Tuckman, B., Hom, J.-B.: Consistent Pricing of FX Forwards, Cross-Currency Basis Swaps and Interest Rate Swaps in Several Currencies. Lehman Brothers Report, September 2003

Whittall, C.: The Price is Wrong. In: RISK magazine, 5. März 2010. Nur online: www.risk.net/risk-magazine/feature/1594823/the-price-wrong

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: www.spektrum.de/artikel/1165739

Sie möchten noch mehr WISSEN?

Erleben Sie ZEIT WISSEN, das intelligente Wissenschaftsmagazin!
Lesen Sie Neues und Spannendes über Wissenschaft, Technik, Umwelt und Gesundheit:
faszinierend, lebendig und lebensnah.



Der Einfluss von Sprache auf das Denken



Wenn Unternehmer für die Forschung stiften



Dossier: Synthetische Biologie



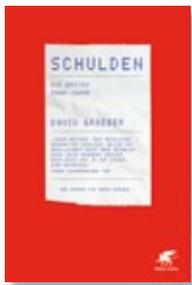
Tiere in der deutschen Wildnis



**Jetzt im Handel, mehr Informationen auch unter:
www.zeit-wissen.de oder per Tel. 0180/52 52 909**

(14 Cent/Min. aus dem deutschen Festnetz, max. 42 Cent/Min. aus dem Mobilfunknetz)





David Graeber

Schulden**Die ersten 5000 Jahre**

Aus dem Englischen von

Ursel Schäfer, Hans Freundl und Stephan Gebauer.

Klett-Cotta, Stuttgart 2012. 600 S., € 26,95

WELTWIRTSCHAFT

»Schulden braucht man nicht zurückzuzahlen!«

Der Anthropologe und Anarchist David Graeber erklärt die Welt neu und bekämpft das Dogma der Zahlungsmoral.

Es kommt wie gerufen: ein Buch, das einem erklärt, warum es vielleicht keine moralische Pflicht sein muss, Schulden immer zurückzuzahlen. In Zeiten der Dauerfinanzkrise, in denen Zockerschulden übergroßer Banken gerne sozialisiert werden, mag das für manchen, der sich in den Klauen von Baukrediten und Zinslasten gefangen sieht, ein verlockender Gedanke sein.

Prophet der Frohbotschaft ist David Graeber, selbst ernannter Anarchist und Motor der weltweiten Occupy-Bewegung. Sein Buch liest sich über weite Strecken wie ein Krimi, was den Inhalten nur zugutekommt. Und seine These gibt zu denken: Die stillschweigende Gleichsetzung von »Schuld« im Sinn einer moralischen Verpflichtung mit der rein ökonomischen Pflicht, geliehenes Geld zurückzuerstatten, muss nicht immer gelten. »Die Dehnbarkeit des Begriffs ist zugleich die Grundlage seiner Macht«, sagt der Forscher.

Das Beispiel liefert der Anthropologieprofessor am Goldsmith College in London aus persönlicher Erfahrung. Als er einmal zwei Jahre im Hochland von Madagaskar verbrachte, hatte es dort kurz zuvor den ersten heftigen Malariaausbruch nach zwei Generationen der Ruhe gegeben. 10 000 Menschen starben, da inzwischen kaum noch einer von ihnen immun gegen die Seuche war. Das jahrelang betriebene Programm zur regelmäßigen Überwa-

chung und Vernichtung der Moskitos hatte die Regierung gestrichen, da sie einem Sparprogramm des Internationalen Währungsfonds IWF unterstand.

»Es ging nicht um viel Geld«, erinnert sich Graeber. »Nur damit die Citibank keinen unverantwortlichen Kredit abschreiben muss, der in der Bilanz sowieso nicht groß ins Gewicht fällt.« Kein Wunder, dass er seitdem den IWF massiv kritisiert. Der sei »in der Hochfinanz das Äquivalent zu den Jungs, die kommen und einem die Beine brechen«, wenn man seine Schulden nicht zurückzahle. Um ihre Schulden zu bedienen, sähen sich manche Staaten gezwungen, Leistungen wie die Subventionierung von Grundnahrungsmitteln zu streichen.

Das ist erschütternd und stützt natürlich die alte Forderung vom Schuldenverzicht bei den ärmsten der Entwicklungsländer. Aber Graeber holt viel weiter aus und stellt das Schuldentema in den gesamtzivilisatorischen Zusammenhang. Auf über 400 Seiten zeigt er, wie Kredite von Anfang an – Geschichte des alten Mesopotamien, antiker Sklavenmärkte und Schuldkerker – die Entwicklung von Gesellschaften vorantrieben.

Seine These: Wir haben die Neigung, alle menschlichen Beziehungen auf Tausch zu reduzieren, so als könnten wir »unsere Verbindungen zur Gesellschaft oder sogar zum Kosmos in denselben

Begriffen fassen wie ein Geschäft«. Und so sieht Graeber generell Tauschgeschäfte »als eine Folge von Gewalt«, mit der die Ansprüche durchgesetzt werden können. So, wie es für Schuld die Synonyme »Sünde« oder »Verfehlung« gebe, habe der Schuldner immer etwas von einem Kriminellen. Jede Form der Verpflichtung würde »durch Verbrechen und Vergeltung« aufrechterhalten – als Antrieb für Kriege, Sklaverei, Ehre, Schuld und Sühne. Das mag zwar ein arg pessimistisches Licht auf die Evolution von Gesellschaft und Zivilisation generell werfen, aber es ist schwer, sich dem Sog seiner Argumente zu entziehen.

Wer jedoch nicht durch die ganze Geschichte antiker Kulturen und des Mittelalters ziehen will und eher nach einer Analyse der gegenwärtigen Finanzkrise sucht, wird erst am Ende des Buchs bedient. Immerhin benennt Graeber dort ihre Ursache: die Entkopplung des Dollars vom Goldstandard. Erst dieser Schritt, der 1971 für Nixon womöglich wegen der Unsummen für den Vietnamkrieg unvermeidlich gewesen sei, habe die Real- und die virtuelle Geldwirtschaft katastrophenträchtig auseinandergetrieben.

Den großen Crash des Jahres 2008 sieht er als einen »Betrug«, bei dem die Krise schon mit der Gewissheit geplant war, »dass die Opfer am Ende gezwungen sein würden, die Täter zu retten«. Der Staat behandelte das imaginäre Geld der Investment-Banker, als wäre es real. Den Bankern wurde geholfen, aber verschuldete Hausbesitzer mussten ihr Heim verlassen.

Am Ende packt Graeber richtig aus und spart nicht mit Appellen und Beschimpfungen, so plausibel sie auch klingen mögen. Der heilige Grundsatz, dass Schulden zurückgezahlt werden müssten, sei nur »eine schamlose Lüge«. Keineswegs müsse »jeder« alles zurückzahlen. Das müssten nur einige von uns. Und so seien Schulden nichts »als eine Perversion eines Versprechens, das von Mathematik und Gewalt verfälscht wurde«. Der Occupy-Aktivist fordert folgerichtig nichts weniger als den Umsturz: »Wir sollten alle reinen Tisch machen, unsere überkommene Moral über

den Haufen werfen und einen Neuanfang wagen.«

In dieser Platttheit wird das kaum jemanden dazu veranlassen, aktiv etwa gegen die herrschende Marktwirtschaft zu Felde zu ziehen – selbst Graebers Occupy-Bewegung verodet inzwischen mangels erkennbarer Ziele. Statt konkreter Vorschläge empfiehlt der Anthropologe einen generellen Schuldenerlass – sowohl für Staats- als auch für Konsumschulden. Aber nicht etwa als Reformprogramm, sondern weil es halt zeige, dass Schuldentilgung »nicht das Wesen der Sittlichkeit« darstelle.

Zweifellos ist dem Autor Recht in seiner Grundthese zu geben, wenn er die generelle Moralisierung von Schulden als verderblich ansieht. Was daraus folgt, wird aber auch am Ende dieses Buchs nicht so recht klar.

Sieht man von den schon traditionellen Untergangsszenarien für den Kapitalismus mal ab, so liegt die zerstörerische Wirkung der »gewaltigen Schuldenmaschine« schließlich auf der Hand. Doch dann geht Graeber die Luft aus. Schließlich verlangt er nur noch kleinlaut, diese Maschine »ein wenig zu drosseln« – wegen dieser Quintessenz

braucht man das Buch eigentlich nicht zu lesen.

Aber selbst wenn der Durchmarsch durch Jahrtausende der Menschheitsgeschichte nicht immer gleichermaßen fesselt, so liefert David Graeber doch einen originellen Blick auf die Entwicklung der Zivilisation, wie ich ihn bisher noch nicht gelesen habe.

Reinhard Breuer

Der Rezensent ist Editor-at-large von »Spektrum der Wissenschaft«. Er hat zwar Schulden, sieht aber keine Möglichkeit, sie nicht zurückzahlen.



Alan Weisman

Gaviotas

Ein Dorf erfindet die Welt neu

Aus dem Englischen von Ursula Pesch.

Piper, München 2012. 379 S., € 19,99

ALTERNATIVES LEBEN

Von einem, der auszog, die Welt zu retten

Seit den 1970er Jahren zieht es die besten Ingenieure, Techniker und Naturwissenschaftler an den unwegsamen Ort Gaviotas, um dort zu forschen, zu arbeiten und dauerhaft mit ihren Familien zu leben.

Der Kolumbianer Paolo Lugari hatte Anfang der 1970er Jahre eine Vision: Er wollte am unwirtlichsten, unfruchtbarsten Ort der Erde ein Dorf gründen, in dem es den Menschen an nichts fehlte. Wenn das gelänge, so Lugari, würde es überall möglich sein, und der explosionsartig anwachsenden Menschheit würde der Platz auf der Erde nicht knapp werden.

Knapp 30 Jahre später reiste der bekannte Journalist Alan Weisman, Autor des internationalen Bestsellers »Die Welt ohne uns«, selbst in das kleine kolumbianische Dorf Gaviotas und schrieb daraufhin das Buch, das uns dessen unglaubliche Geschichte erzählt.

Östlich der kolumbianischen Anden erstreckt sich eine ausgedörrte Graslandschaft, die etwa die Hälfte der Flä-

che Deutschlands einnimmt: »los Llanos«. Dürreperioden wechseln sich mit monatelangem Regen ab, der den nährstoffarmen Boden in eine Schlammwüste verwandelt. Buschfeuer brennen die Vegetation fast schneller nieder, als sie nachwachsen kann. Lange Zeit waren deshalb die nomadischen Guahibo-Indianer die einzigen Menschen, die in dieser Gegend lebten. In jüngerer Zeit flohen etliche Menschen vor dem Drogenkrieg in die Llanos, konnten dort aber – bei der Alternative Wohnen am Fluss mit unzähligen Malariamücken oder kilometerweiter Weg zum Trinkwasser – nie recht heimisch werden.

Anfangs glaubte daher außer Lugari kaum jemand an das Projekt. Aber mit seinen Überzeugungskünsten und guten akademischen Beziehungen lockte

er innerhalb kurzer Zeit viele wissensdurstige Studenten in das kleine Dorf im Niemandsland. Sie erforschten die Natur, die einheimische Tier- und Pflanzenwelt und fanden kreative Möglichkeiten, sich der Umgebung anzupassen und sie für sich nutzbar zu machen. Von den Guahibo lernten sie, wie man die eingeweichten Blätter der Buritipalme zu Netzen und Hängematten verarbeitet und aus dem Palmöl ein dem Olivenöl gleichwertiges Speisefett herstellt.

Der Anspruch der Wissenschaftler war es, nachhaltig zu wirtschaften und zu bauen. Zumindest langfristig wollten sie ohne Plastik und andere, mühsam herbeizuschaffende Rohstoffe auskommen (wer nach Gaviotas will, muss 16 Stunden durch unwegsames, straßenloses Gelände fahren). So entwickelten die Ingenieure eine Erde-Zement-Mischung, die zum Großteil aus dem Savannenboden bestand. Diese verarbeiteten sie in einer selbstgebauten Presse ohne weitere Bindemittel zu Backsteinen – die Erde war feucht genug, um den Zement zu härten.

Aus demselben Material bauten sie Abwasserrohre, die mühelos das Gewicht mehrerer Lastwagen aushielten: Sie gossen einen Graben mit der Erde-Zement-Mischung aus, gossen Wasser in einen Plastikschauch, so dass er die Form des späteren Hohlraums annahm, und füllten mit dem selbstgemachten Mörtel auf. Nach einem Tag war das Material ausgehärtet, und die Gavioteros holten den Schlauch wieder heraus.

1976 wurde Gaviotas von den Vereinten Nationen zu einer Modellgemeinde ernannt. Die Wissenschaftler erhielten Fördergelder und ein Reisebudget, um ihre Ergebnisse auf internationalen Konferenzen vorzustellen – und neue Ideen zu sammeln.

Im Lauf der Zeit entwickelte sich Gaviotas zu einer richtigen Gemeinde. Die Leute bauten ein Krankenhaus, Kindergärten, Schulen und eine große Gemeindehalle, in der das ganze Dorf sämtliche Mahlzeiten gemeinsam einnahm. Es klingt wie ein Märchen, wenn man liest, dass ohne jedes Wettbewerbs- und Eigentumsdenken alle gemeinsam hart arbeiteten und quasi alles miteinander teilten.

Die Gavioteros entwickelten hocheffiziente Warmwasser-Solaranlagen, die billig und ohne Hightech-Aufwand direkt

in den Llanos hergestellt werden konnten. Mit einer einfachen Biogasanlage sammelten sie das Methan aus Kuhmist und leiteten es über Rohre zu den Feuerstellen der Gasherde im Krankenhaus. Sie bauten Kühlschränke und Trinkwasseraufbereitungsanlagen, schlossen Kinderwippen an ein Pumpsystem an, so dass in jeder Schulpause Grundwasser nach oben gepumpt wurde. Sie hatten so viele Ideen, dass sie gar nicht alle realisieren konnten.

Doch nach etwa zwei Jahrzehnten der Förderung bekam Gaviotas Anfang der 1990er Jahre kein Geld mehr. Nun drohte ihre Arbeit zu einem Überlebenskampf zu werden. Trotzdem blieben sie alle, denn Gaviotas war ihre Heimat geworden.

Und sie hatten Glück – ihre jahrelange Forschungsarbeit und ihre Neugierde

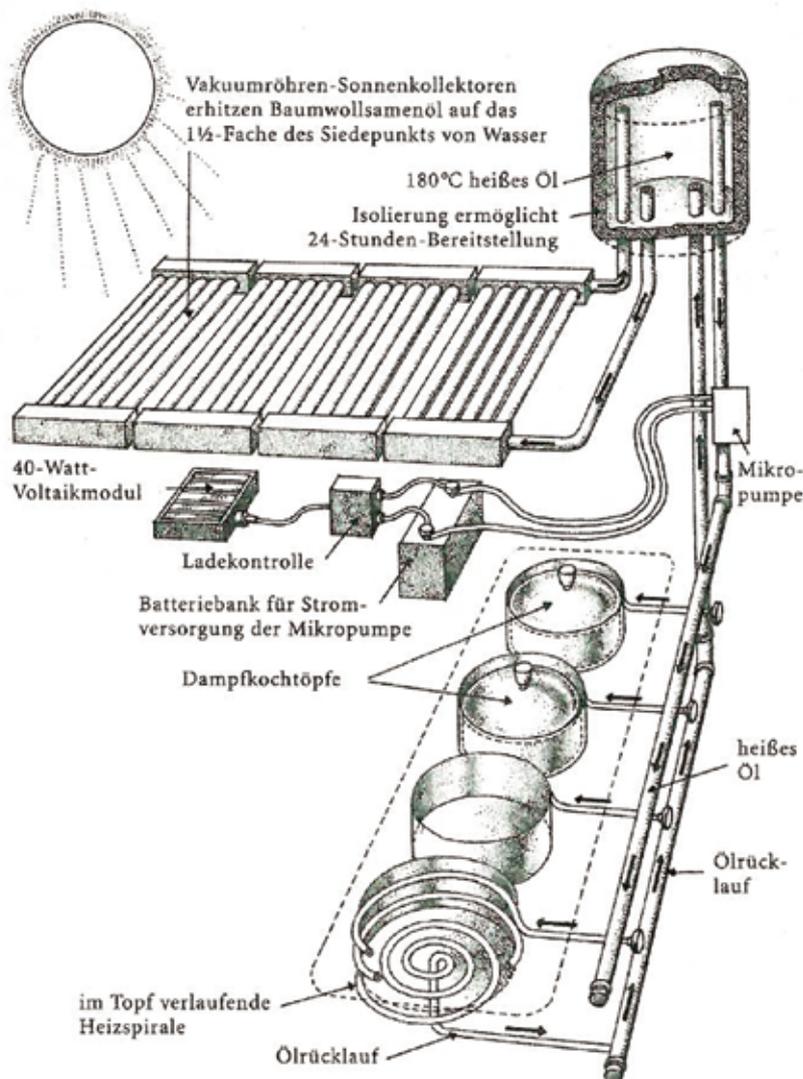
zahlten sich aus. Jahre zuvor hatten einige Biologen Setzlinge von Karibischen Kiefern in den Llanos eingepflanzt. Damit die Bäume dem Boden genügend Nährstoffe entziehen konnten, hatten sie die Wurzeln mit Mykorrhizapilzen geimpft. Die Pilze vermehrten sich im Lauf der Zeit, weil die Gavioteros weder Insektizide noch künstliche Düngemittel verwendeten, und die Kiefern wuchsen prächtig heran.

Damit hatten die Gavioteros es geschafft, das Ödland in eine grüne Oase zu verwandeln. Das lokale Klima wurde ausgeglichener, und der Schatten der Bäume bot vielen Pflanzen und Tieren neuen Lebensraum. Doch wozu konnten sie den Wald nutzen? Bauholz und Zellstoff wären wegen des Transportaufwands auf dem Weltmarkt kaum konkurrenzfähig gewesen.

Genau zur richtigen Zeit stieß Lugari selbst durch einen Zeitungsartikel auf die entscheidende Möglichkeit: In Europa gab es bereits eine Nachfrage nach natürlichem Baumharz zur Verwendung in hochwertigen Farben, Klebstoffen, Kosmetika und Arzneimitteln, das durch Produkte auf Erdölbasis nicht zu ersetzen war. So lernten die Menschen in Gaviotas, hochwertiges Kiefernharz von den Bäumen zu zapfen, ohne ihr Wachstum zu beeinträchtigen. Aus irgendeinem Grund wuchsen die Bäume in den Llanos so rasant, dass die Gavioteros bereits nach acht statt der üblichen 20 Jahre einen immensen Harzertrag hatten. Zudem gewannen sie bei der Aufreinigung des Rohharzes als Nebenprodukt Terpentin, das sie ebenfalls verkaufen konnten.

Die Einwohner Gaviotas hatten es geschafft: Sie konnten sich selbst finanzieren. Lugaris Traum war Realität geworden.

Alan Weisman zerlegt die große Erzählung in viele kleine Geschichten über die verschiedenen Charaktere, die Gaviotas aufbauten und prägten, darüber, wie sie auf ihre kreativen Erfindungen kamen und warum Gaviotas für sie so lebenswert ist. Streckenweise springt der Autor von einer Anekdote zur nächsten und liefert die Pointe oft erst Seiten später nach. Viele technische



Solarküche in der Klinik von Gaviotas

Unsere Neuerscheinungen



Ahnerts

ASTRONOMISCHES JAHRBUCH 2013

Wo und wann ist welcher Planet am Himmel zu sehen? Welche besonderen Ereignisse sind in der kommenden Nacht zu beobachten? **Ahnerts Astronomisches Jahrbuch 2013** liefert alle wichtigen Informationen für das eigene Erkunden des Sternenhimmels. Der Kalender präsentiert Tag für Tag die bedeutendsten astronomischen Ereignisse. Sternkarten für jeden Monat, Beschreibungen der Himmelsobjekte und viele Astroaufnahmen erleichtern Ihnen die Orientierung am Nachthimmel. Für Einsteiger und fortgeschrittene Sternfreunde ist der **Ahnert** das unentbehrliche Standardwerk. *Zirka 210 Seiten mit zahlreichen, meist farbigen Fotografien und Grafiken.* € 10,90 zzgl. Porto, als Standing Order € 8,50 inkl. Inlandsversand, ISBN: 978-3-941205-79-6, ab 28. 9. 2012 im Handel oder unter www.spektrum.com/ahnert zu bestellen.



KALENDER »HIMMEL UND ERDE 2013«

Astronomen präsentieren im Bildkalender »Himmel und Erde 2013« ihre schönsten Aufnahmen und lassen Sie an den fantastischen Möglichkeiten der modernen Naturbeobachtung teilhaben. Zusätzlich bietet er wichtige Hinweise auf die herausragenden Himmelsereignisse 2013 und erläutert auf einer Extraseite alle auf den Monatsblättern des Kalenders abgebildeten Objekte knapp und anschaulich. 14 Seiten; 13 farbige Großfotos; Spiralbindung; Format: 55 x 45,5 cm; € 29,95 zzgl. Porto; als Standing Order € 27,- inkl. Inlandsversand

www.spektrum.com/kalender2013

Alle Produkte sind im Handel erhältlich oder unter:

Spektrum
DER WISSENSCHAFT
WISSENSCHAFT AUS ERSTER HAND

online: spektrum.de/lesershop
E-Mail: service@spektrum.com
Tel.: +49 6221 9126-743

Fax: +49 6221 9126-751
Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH
Slevogtstraße 3-5 | 69126 Heidelberg



Konrad Adam

Kampf gegen die Natur. Der gefährliche Irrweg der Wissenschaft

Rowohlt, Berlin 2012. 272 S., € 19,95

Da hat sich der langjährige Feuilletonchef der »Frankfurter Allgemeinen Zeitung« und ehemalige politische Chefkorrespondent der »Welt« seine tiefempfundene Abneigung gegen die moderne Naturwissenschaft wortgewaltig von der Seele geschrieben. Diese Abneigung hat viele Wurzeln, darunter auch legitime – es gibt Größenwahn unter Forschern. Nur vermischt Adam das mit einem allgemeinen Wehklagen über die Naturwissenschaft selbst, das die übelsten Vorurteile gegen die Geisteswissenschaftler bestätigt: Sie sei »durch und durch esoterisch«, der unmittelbaren Wahrnehmung hoffnungslos entrückt und überhaupt vollkommen unverständlich. Merkwürdig: Hinter diesem Unfug steckt zweifellos ein kluger Kopf. Der hätte zumindest dem letzten Problem durch regelmäßige Lektüre von »Spektrum« mit leichter Mühe abhelfen können.

CHRISTOPH PÖPPE



Werner Gruber, Heinz Oberhummer, Martin Puntigam

Gedankenlesen durch Schneckenstreicheln. Was wir von Tieren über Physik lernen können

Hanser, München 2012. 296 Seiten, € 19,90

Wer Schnecken streichelt – an der richtigen Stelle natürlich, und bitte nicht zu früh aufhören –, um in ihren Gehirnen neuronale Veränderungen zu bewirken, kann damit Nobelpreisträger werden (wie Eric Kandel, siehe Spektrum der Wissenschaft 11/1979, S. 58). Und wer rasant, unterhaltend und pointiert über solche Forschung berichtet, wird Popstar im Kleinkunstbetrieb. Zwei österreichische Physiker, deren satirisches Potenzial von einem Kabarettisten noch einmal kräftig aufgemotzt wird, sind als »Science Busters« zu solchen Stars geworden. In ihrem neuen Buch berichten sie nun über Verblüffendes aus dem Tierreich. Das Tempo des Textes ist derart hoch, dass man sich bei den eingestreuten Fact Boxes – etwa zu Graphen und Lithium-Akkus, zu Synchronizität und Spiegelneuronen, aber auch zum Unfug morphogenetischer Felder – regelrecht entspannen kann.

THILO KÖRKELE



Bas Kast

Ich weiß nicht, was ich wollen soll.

Warum wir uns so schwer entscheiden können und wo das Glück zu finden ist

S. Fischer, Frankfurt am Main 2012. 288 S., € 18,99

Je mehr Möglichkeiten wir haben, unser Leben zu gestalten, desto rastloser und unzufriedener werden wir. Denn der Weg, der uns am meisten Glück beschert, ist in unserer komplexen Welt immer schwerer zu finden. Das illustriert der Psychologe und freie Autor Bas Kast anhand einer Fülle wissenschaftlicher Studien, deren anschauliche Darstellung er mit beispielhaften Anekdoten aus seinem eigenen Leben auflockert. Im zweiten Teil des Buchs führt er uns, wieder mit vielen wissenschaftlichen Belegen, schonungslos vor Augen, wie wir uns heutzutage Sozialleistungen erkaufen, für die wir uns früher auf Freunde und Familie verlassen haben. Angesichts der Präzision, mit der Kast die Problematik analysiert, enttäuscht es ein wenig, dass er am Ende auf die Frage, wo das Glück denn nun zu finden ist, nicht mehr als Pauschalantworten zu bieten hat.

MAREN EMMERICH



Dale Templar, Brain Leith (Produktion)

Planet des Lebens

Polyband, München 2012. 400 Minuten, 3 DVDs, € 25,99, auch als Blu-ray erhältlich

Die BBC ist berühmt für ihre aufwändigen und häufig einzigartigen Natur- und Tier-Dokumentationen. Diesmal aber geht es, entgegen dem deutschen Titel, um den Menschen, wie er sich in teilweise extremen Umgebungen sein Leben, häufig sein Überleben, eingerichtet hat. Acht verschiedene Lebensräume haben die Filmemacher in vierjähriger Arbeit beleuchtet: »Leben am Meer«, »in der Wüste«, »in der Arktis«, »im Dschungel«, »im Gebirge«, »in der Steppe«, »am Fluss« und »in der Stadt«. So treffen wir in der ersten Folge auf die Bajau auf Borneo, die an Land »seekrank« werden, und zittern mit, wenn Rankenfußkrebssammler an der spanischen Küste jedes Mal ihr Leben für ihren Verdienst riskieren. Die Bilder und Informationen sind von der exzellenten Qualität, die man von der BBC gewohnt ist. Und sie bringen tatsächlich Neues: Ich zumindest habe hier von der Lebensweise vieler dieser Menschengruppen zum ersten Mal gehört.

ELKE REINECKE

Beschreibungen sind mangels Skizzen kaum zu verstehen. Und zwischen all dem erzählt er nebenbei noch allerlei aus der Geschichte Kolumbiens, so dass der Leser das Projekt Gaviotas auch in die politischen Zusammenhänge einordnen kann.

Man kann nur staunen über dieses Dorf, das die Welt verbessern möchte,

und bekommt Lust, sich mit eigenen Augen davon zu überzeugen. Doch das kann über ein großes Manko nicht hinwegtäuschen: Die Erstausgabe des Buchs erschien bereits 1998, zehn Jahre später eine überarbeitete Neuauflage. Noch einmal vier Jahre sind vergangen, bis nun die erste deutsche Übersetzung vorliegt. Das Vorwort zu dieser Ausgabe

gibt kaum aktuelle Informationen, die der Leser sich aber dringend wünscht. So ist das Buch eindeutig veraltet. Die Idee, die hinter Gaviotas steckt, könnte jedoch aktueller nicht sein.

Janina Fischer

Die Rezensentin ist promovierte Chemikerin und arbeitet in Iserlohn.



Ulrich Herb (Hg.)

Open Initiatives

Offenheit in der digitalen Welt und Wissenschaft

Universitätsverlag des Saarlandes,

Saarbrücken 2012. 220 S., € 13,50

Online unter <http://universaar.uni-saarland.de/monographien/volltexte/2012/87/>

INFORMATIONSWISSENSCHAFT

Die Zukunft der offenen Netze ist offen

Die vielfältigen Bestrebungen, Inhalte im Netz kosten- und restriktionsfrei verfügbar zu machen, rechtfertigen einen – hervorragend gemachten – Sammelband.

Die Vielfalt all dessen, was mit »Open« beginnt, ist schon fast unüberschaubar. Allein in den Titeln der Beiträge des vorliegenden Sammelbands kommen vor: Open Access, Open Source, Open Metrics, Open Science, Open Knowledge, Open Data, Open

Collectivity. Und im Text werden noch sehr viel mehr »Offenheitsinitiativen« behandelt.

»Open« wird zum Paradigma für den Umgang mit Wissen und Information in elektronischen Umgebungen. Gemeint ist freie Verfügbarkeit, und

zwar nicht nur kosten-, sondern auch restriktionsfrei. Manche Protagonisten wollen ein einmal öffentlich zugänglich gemachtes Werk modifizieren und weiterentwickeln dürfen – ein Konzept, das für Programmcodes unter dem Namen »Open Source« große Erfolge verzeichnet, aber in der Wissenschaft immer noch umstritten ist. Gelegentlich erklärt ein Autor sogar sein Werk für gemeinfrei und verzichtet damit auf das Recht, als Autor genannt zu werden.

Das Open-Prinzip setzt einen unübersehbaren Kontrapunkt zum immer noch dominierenden Verständnis, nach dem Wissen und Information Güter mit Eigentumscharakter sind und dementsprechend knapp gehalten, kontrolliert und kommerziellen Verwertungsansprüchen unterworfen werden dürfen.

Die Autoren des Bands stehen insgesamt dem Open-Konzept positiv gegenüber. Bis auf zwei Beiträge, die einem potenziell frauenfeindlichen und imperialistischen Charakter der Bewegung nachspüren (in der Tat dominieren un-

ANZEIGE

www.fischerverlage.de

Vorträge von Jared Diamond:
5. November, 19 Uhr: Berlin, Museum für Kommunikation
6. November, 20 Uhr: Zürich, Kaufleuten
7. November, 20 Uhr: Tübingen, Museum Obere Säle

Der neue Bestseller von Jared Diamond

Noch heute leben zahlreiche Stämme als Jäger und Sammler in unzugänglichen Teilen der Welt. Jared Diamond kennt sie aus vielen Expeditionen, die er in den letzten Jahrzehnten geleitet hat. In seinem neuen Buch entfaltet er den ganzen Reichtum ihrer verblüffend anderen Lebensweise. Eine überraschende und unterhaltsame Lektion über die Vielfalt der Kulturen – und eine Kritik unseres modernen Selbstverständnisses.

592 Seiten, gebunden, € (D) 24,99 Ein Buch von S. FISCHER



JARED
DIAMOND
VERMÄCHTNIS
Was wir von traditionellen
Gesellschaften lernen können
S. FISCHER



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

ter deren Protagonisten unstreitig die männlichen Vertreter der westlichen Wissenschaftskultur), stellen die meisten Artikel umfangreiches Orientierungswissen bereit, allen voran der Einleitungsbeitrag von Ulrich Herb. Dem Soziologen, Wissenschaftsdienstleister und Leiter diverser Projekte an der Saarbrücker Universitätsbibliothek ist es offensichtlich ein Anliegen, die durchaus divergierenden Ansprüche und Ziele der verschiedenen Open-Gruppierungen zusammenzubringen.

Jens Klump vom GeoForschungsZentrum Potsdam (GFZ) befasst sich mit »Open Data«: dem Konzept, dass die mit öffentlichen Mitteln produzierten Daten aus den empirischen Wissenschaften frei und offen oder sogar gemeinfrei verfügbar sein sollten. Das klingt plausibel, ist jedoch höchst kontrovers. Während die Wissenschaftsorganisationen »Open Data« einfordern, sind die potenziellen Nutznießer wenig begeistert, weil sie zugleich die Datenproduzenten sind. Um ihre Basisdaten überhaupt nutzbar zu machen, müssten sie diese mit einer aussagekräftigen Dokumentation versehen, was mangels geeigneter Erfassungssoftware überaus aufwändig ist und vor allem nicht als eigenständige Leistung zählt, ebenso wenig wie die Bereitstellung der Daten selbst. Solange die Datenlieferung nicht die eigene Veröffentlichungsliste bereichert, wird sich das Open-Data-Konzept kaum so breit durchsetzen wie »Open Access« für die wissenschaftlichen, die Daten interpretierenden Texte.

Daniel Mietchen, Berater für webbasierte Wissenschaft aus Jena, setzt sich mit einem weiteren, durchaus heiklen Problem auseinander: Inwieweit lassen sich die klassischen Peer-Review-Verfahren durch offene Begutachtungs- und Bewertungsverfahren ergänzen oder ersetzen, die einer elektronischen Umgebung angemessen sind? Ebenfalls sehr informativ!

Vom klassischen Urheberrecht halten die Verfechter von Open Access verständlicherweise nicht viel. Eckhard Höffner kann gar nicht anders, als zu dem Schluss zu kommen, dass die »eigentumsähnliche Gestaltung des Urheberrechts« gestört sei und sich kaum mehr legitimieren lasse. Und John Hendrik Weitzmann zeigt am Beispiel des seit 1996 gültigen Leistungsschutzrechts der EU für Datenbanken die fatalen Auswirkungen einer solchen Regelung. Das Recht gewährt den Erstellern der Datenbanken einen weit gehenden Schutz ihrer Kompilationen. Das führt dazu, dass die Ersteller der Daten zwar die Arbeit leisten, aber den Erfolg, näm-

Das Wikileaks-Prinzip ist zwar derzeit aus der politischen Debatte verschwunden, wird aber nicht in Vergessenheit geraten.

lich dass ihre Daten gefunden werden, nicht einfahren können. Denn vor dem Zugriff auf die Datenbank steht die Bezahlschranke des Datenbankanbieters. Der Ausweg wäre, dass die Datenproduzenten freie Lizenzen für die Nutzung der Daten vergeben dürfen. Welche Art von Lizenz wissenschaftsgerecht und für die Beteiligten akzeptabel wäre, ist noch in der Diskussion. Weitzmann plädiert für das von der Lizenzorganisation Creative Commons entwickelte Open Access Data Protocol.

Über den Bereich der Wissenschaft hinaus, die in diesem Buch im Mittelpunkt steht, ist das Open-Konzept eine Herausforderung für die digitale Welt insgesamt. Das wird deutlich durch den detailreichen Beitrag von Nils Barnickel und Jens Klessmann zu den Daten des öffentlichen Sektors (»Open Government«). Artikel über »Offene Geodaten durch OpenStreetMap«, ein kollaboratives, nichtkommerzielles Gegenprojekt zu »Street View« von Google (Roland Ramthun), und über »Open Collectivity« – die Menge jener Leute, die sich anonym im Netz äußern und sich bereits dadurch in einem Kollektiv namens »Anonymous« wiederfinden (Carolyn Wiedemann) – runden das Spektrum ab.

Die kontroverse Diskussion um Wikileaks zeigt, dass Begriffe wie Öffent-

lichkeit, Publizität, Transparenz, Aufklärung, Misstrauen, Geheimnis, Privatheit, Verrat, Macht und Kontrolle im elektronischen Umfeld neu bestimmt werden müssen – so der äußerst lesenswerte Artikel von Christiane Schulzki-Haddouti. Das Wikileaks zu Grunde liegende Offenlegungsprinzip ist zwar derzeit aus der politischen Debatte weit gehend verschwunden, aber niemand kann darauf hoffen, dass es in Vergessenheit gerät. Für Schulzki-Haddouti deutet alles darauf hin, dass Wikileaks »Teil einer weitreichenden, weltweiten Transparenzbewegung ist, die von staatlichen wie privaten Institutionen mehr Offenlegung ihrer Aktivitäten

verlangt«. Wohin das führt, ist – nun ja – offen.

Unvermeidlich bleiben einige Aspekte des vielschichtigen Themas ausgeblendet, so vor allem der informationsökonomische. Zunehmend kommen den wissenschaftlichen Verlagen die Autoren abhanden, weil die Nutzung ihrer Werke durch kommerzielle Verwertung verknappt wird. Verlage wie Springer fangen daher an, Zeitschriften nach Open-Access-Prinzipien (entgeltfreie Nutzung für jedermann) zu veröffentlichen, erwarten allerdings, dass die Öffentlichkeit die Erstellung dieser Zeitschriften finanziert (und damit auch die Gewinne der Verlage), wie das bisher über die Bibliotheken geschieht. Das würde zu erheblichen Umschichtungen öffentlicher Mittel führen.

Dass Open Source im Sammelband fehlt, kann man angesichts der reichen Literatur dazu verschmerzen.

Ulrich Herb hat eine beeindruckende Vielfalt an Open-Themen aufgespürt und dafür kompetente, meistens jüngere Autoren gefunden. Dem Thema entsprechend ist der Band auch via Open Access verfügbar.

Rainer Kuhlen

Der Rezensent ist Professor für Informationswissenschaft an der Universität Konstanz.

Top-Ärzte. Aus ganz Deutschland. Auf einen Blick.



In FOCUS-GESUNDHEIT bündeln wir die Erfahrung unserer Fachredaktion mit der Kompetenz von Experten.

JETZT AM KIOSK.

FOCUS-GESUNDHEIT gibt es auch unter:
Tel. 0180 5 480 1006*,
Fax 0180 5 480 1001
www.focus-gesundheit.de

*0,14 €/Min. aus dem dt. Festnetz.
Mobil max. 0,42 €/Min.

Verständlich präsentiert:

196 Seiten prallvoll mit den wichtigsten Gesundheitsthemen: Die FOCUS Ärzteliste ist fundiert, nutzwertstark und wird verständlich präsentiert.

Exzellente recherchiert:

Die FOCUS Ärzteliste basiert auf Kollegen-Empfehlungen von Klinikchefs, Oberärzten und niedergelassenen Spezialisten sowie persönlichen Erfahrungen von Patienten und Selbsthilfegruppen.

Erfahrungsbasiert:

FOCUS-GESUNDHEIT hat bereits fünfmal die besten Ärzte Deutschlands in ausgewählten Fachgebieten getestet und bewertet. Auch diese Erfahrung steckt in der sechsten Ausgabe!

Wissen, das hilft. **FOCUS**
GESUNDHEIT

Signale aus dem Magen

»Die üblichen Methoden mit Hilfe des Magenschlauches zur Feststellung des pH-Wertes des Magensaftes lassen sich nun durch einen verschluckbaren Hochfrequenzsender durchführen. Er gibt die Meßergebnisse nach außen ab. Der Sender ist für einmaligen Gebrauch vorgesehen, da die Kapsel den Körper auf natürlichem Wege verläßt. In verschiedenen Universitätskliniken und Krankenhäusern wird diese Methode bereits verwandt.« *Naturwissenschaftliche Rundschau* 11, 1962, S. 447

Lärmrecycling

»Zur Zeit ist ein Energie-Wandler in Entwicklung, der die Fähigkeit hat, den Lärm der Antriebs-Aggregate von Düsenflugzeugen in Elektrizität umzuwandeln. In der endgültigen Form soll das Gerät soviel Elektrizität erzeugen, daß das elektrische System einer mit vier Aggregaten angetriebenen Maschine versorgt werden kann. Dadurch wird die Reichweite dieser Flugzeuge vergrößert, denn im Augenblick wird ein Drittel des mitgeführten Brennstoffes zur Erzeugung des notwendigen Stromes verbraucht.« *Elektronik* 11, 1962, S. 348



»Brutpflege« bei Kreuzottern

»In dem Bändchen Floerickes über »Kriechtiere und Lurche fremder Länder« wird mitgeteilt, daß junge Klapperschlangen bei Gefahr in den Rachen ihrer Mütter flüchten. Nun schrieb uns Herr Dr. Naubert Leipzig, daß er vor Jahren ganz ähnliches bei unserer einheimischen

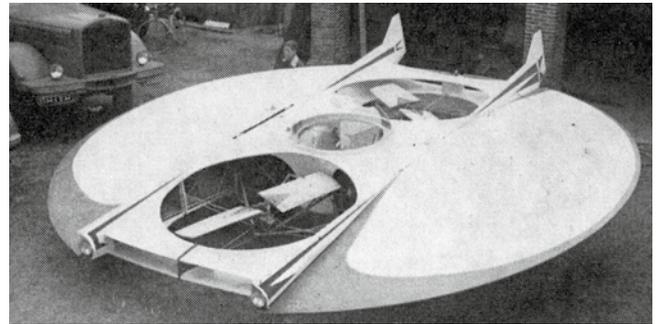
Kreuzotter beobachtet habe. Wir geben aus dem darob entstandenen Briefwechsel den Bericht des Bahnwärters Nestler aus Wolkenstein wieder: »Er sah am Bahndamm eine Otter liegen, die hatte sich zusammengerin- gelt, und in der Mitte hatte sie die Jungen, 8–10 Stück. Beim Herannahen des Bahnwärters sperrte die Otter das Maul auf, und die Jungen schlüpfen hinein. Nun verschwand die Otter in einem nahegelegenen Loch.« *Kosmos* 11, 1912, S. 447

Kühne Konstruktion

»Ein anschaulicher Beweis für die Festigkeit des Eisenbetons wurde auf einer Ausstellung geliefert. Die Kühnheit des Bauwerkes liegt darin, daß die Treppe ohne Pfeiler oder Stützen in geknicktem Lauf gewissermaßen aus dem Erdboden herauswächst und sich freistehend im Gleichgewicht hält, ohne umzukippen. Die Abmessungen der Treppenläufe, der Plattform und des Pavillons sind dabei so gering, daß es auf den

UFO gesichtet

»Jean Grimaldi konstruierte den ersten fliegenden Teller Frankreichs. Sein Durchmesser beträgt 7 m, sein Gewicht 270 Kilo. Er ist mit zwei Volkswagenmotoren ausgerüstet, von denen jeder zwei Propeller treibt. Der »Teller« erreicht eine Geschwindigkeit von 150 Stundenkilometer.« *Neuheiten und Erfindungen* 324, 1962, S. 201



Ein UFO made in France.

ersten Blick kaum glaublich erscheint, daß sich das Ganze selbst tragen kann. In Wirklichkeit aber halten Treppen, Plattform und Pavillon noch dazu eine Belastung (durch Menschengedränge) von 500 kg auf den Quadratmeter völlig sicher aus.« *Technische Monatshefte* 11, 1912, S. 346



Treppe ohne Träger dank Eisenbeton.

Frischfisch im Eis

»Man hält die Fische einige Stunden bei einer dem Gefrierpunkt nahen Temperatur. Dann läßt man bis auf 0° abkühlen und läßt die Fische 15–18 Stunden stehen. Dann läßt man das Wasser gefrieren, indem man das Gefäß in eine Kältemischung eintaucht. Man hat dann eine wenige Zentimeter dicke Scheibe von Eis, eine Art Kuchen, der die eingefrorenen Fische enthält. Der wird in ein Tuch eingeschlagen und mit wärmeundurchlässigem Stoff versehen. Das Auftauen muß sehr langsam geschehen. Sollen die Fische wieder zum Leben erweckt werden, so ist es nötig, sie mehrere Stunden bei annähernd 0° im Wasser zu halten. Sollten nicht alle lebendig werden, so sind doch auch die toten im allerbesten Erhaltungszustand.« *Die Umschau in Wissenschaft und Technik* 49, S. 1046



DIE GESCHENKIDEE* FÜR JUNGE WISSENSCHAFTLER!

* Spektrum **NEO** jetzt auch im Abo:
Für alle Kinder zwischen 10 und 14 Jahren,
die nicht nur das »Was«, sondern
auch das »Wie« und »Warum« interessiert.
4 Ausgaben für nur € 5,50 pro Heft.

(Das Abo ist jederzeit kündbar)

Als Dank für Ihre Bestellung erhalten
Sie ein Präsent Ihrer Wahl!

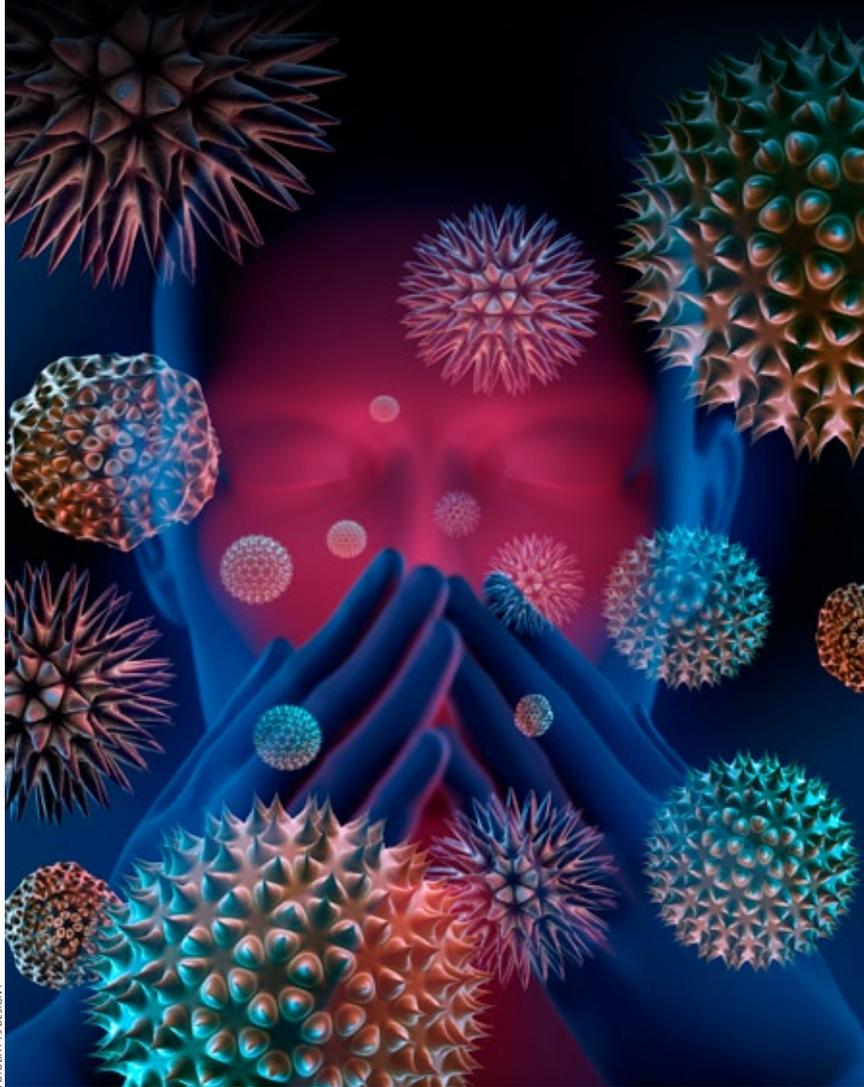


Bestellen Sie jetzt für Ihr Kind!

www.spektrum-neo.de/abo

Volkseuche Allergie

Es ist paradox: Je größer der Wohlstand, je besser die Ernährung, sauberer die Umwelt und höher die Hygienestandards, desto mehr greifen Allergien um sich. Eine vierteilige Serie beleuchtet die vielfältigen Aspekte dieser ebenso rätselhaften wie fatalen Fehlfunktionen unseres Immunsystems.



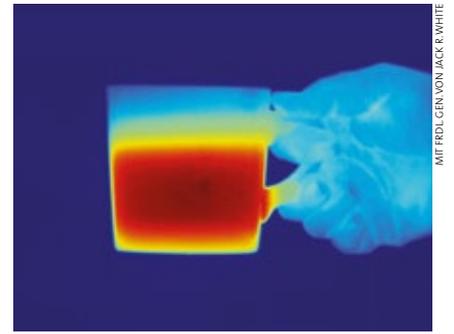
FOTOLIA / PS DESIGN 1

Das Universum in der Kiste

Anatoly Klypin von der New Mexico State University leitet ein Projekt namens »Bolshoi«, eine immens aufwändige Simulation des Weltalls vom Urknall bis heute. Das Programm arbeitet mit mehr als acht Milliarden Einzelobjekten. Damit ist sie aber immer noch sehr grob: Jedes Objekt muss 200 Millionen Sonnenmassen vertreten.

Vermessenes Glück

Die Deutschen werden zwar immer reicher, fühlen sich aber nicht besser. Dieses Paradox scheint die ökonomische Glücksforschung heute zu widerlegen. Wirtschaftswissenschaftler suchen daher nach einem neuen Verständnis von Lebensqualität und Wohlstand und behaupten: *Das Glück gibt es gar nicht.*



MIT FRIEDL GEN VON JACK R. WHITE

Herschels Erbe

Infrarotes Licht kann heute jeder mit speziellen Kameras sichtbar machen. Doch Ende des 18. Jahrhunderts war das Rätsel der »strahlenden Wärme« noch ungelöst. Erst der hannoveranisch-britische Astronom William Herschel ersann die entscheidenden Experimente, die den Durchbruch brachten.



PHOTO RESEARCHERS / HANS REINHARD

Wann kippt ein Ökosystem?

Mit Modellen zu den Nahrungsbeziehungen möchten Forscher früh genug vorhersagen, ob ein Ökosystem umzukippen droht. Denn ab einem bestimmten Punkt ist es fast unmöglich, das Desaster aufzufangen oder die Entwicklung umzukehren.

NEWSLETTER

Möchten Sie regelmäßig über die Themen und Autoren des neuen Hefts informiert sein?

Wir halten Sie gern auf dem Laufenden: per E-Mail – und natürlich kostenlos.

Registrierung unter:
www.spektrum.com/newsletter

Naturwissenschaftliches Wissen aus erster Hand für Schulen und Schüler



wissenschaft
in die schulen!

AUS DER FORSCHUNG IN DEN UNTERRICHT

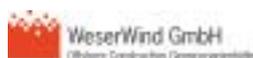
Das Projekt Wissenschaft in die Schulen!

Jugendliche nachhaltig für Naturwissenschaft begeistern – das ist das Ziel der Initiative „Wissenschaft in die Schulen!“. Wir zeigen durch unsere Unterrichtsmaterialien zu aktuellen Themen aus der Forschung, dass Biologie, Physik, Chemie, Mathematik, Geowissenschaften und Astronomie spannende Fächer sind. Wir – das sind der Verlag Spektrum der Wissenschaft, die Gesellschaft für Biochemie und Molekularbiologie sowie das Max-Planck-Institut für Astronomie.

Unterstützen Sie das Projekt

Ohne weitere Partner ist die Realisierung des Projektes nicht möglich und deshalb möchten wir Sie einladen, das Projekt aktiv zu unterstützen. Wenn Sie wissen möchten, wie Sie sich persönlich oder als Firma einsetzen können, dann finden Sie hier Informationen dazu: www.wissenschaft-schulen.de

TAUSENDE SCHÜLER SIND SCHON DABEI. TAUSEND DANK AN UNSERE SPONSOREN!



Märkischer Arbeitgeberverband | Großdrebritzer Agrarbetriebe | Freundeskreis des evang. Heidehofgymnasiums Stuttgart | Symbio Herborn Group | Weinmann GmbH | Stadtwerke Düsseldorf | Karl-Möller-Stiftung | Förderverein des Eichenfeldgymnasiums | Kernkraftwerk Isar, Essenbach | HUK Coburg | Verein der Freunde und Förderer des Gymnasiums der Stadt Kerpen | Vollmer Werke Maschinenfabrik GmbH | Förderverein »Freunde des Helmholtzgymnasiums« Zweibrücken | Freundeskreis des Gymnasiums Neuenbürg | Freundeskreis des Hartmanni-Gymnasiums | Sternwarte am Wallgarten

SYMPOSIUM ZKM | KARLSRUHE 22.-24.11.2012 Eintritt frei

NEUROÄSTHETIK

DONNERSTAG, 22.11.2012
ab 14 Uhr Vorträge

ab 19 Uhr Konzert mit Werken von
Tim Otto Roth, Kiyoshi Furukawa und Conlon Nancarrow
Eintritt € 10 / 7

FREITAG, 23.11.2012
ab 10 Uhr Vorträge

SAMSTAG, 24.11.2012
ab 10 Uhr Vorträge

u.a. mit

Neurowissenschaften

Shihui Han (Peking University)
Shinobu Kitayama (University of Michigan)
Fiona Newell (Trinity College Dublin)
Georg Northoff (University of Ottawa)
Ernst Pöppel (Ludwig-Maximilians-Universität München)

Geisteswissenschaften

Eckart Altenmüller (Hochschule für Musik, Theater und
Medien Hannover)
Alva Noë (University of California, Berkeley)
Patricia Pisters (University of Amsterdam)

Kunst

Helga Griffiths (Deutschland)
Arijana Kaifes (Schweden)
Warren Neidich (Deutschland und USA)

Das gesamte Programm finden Sie unter:
www.zkm.de

Mit freundlicher Unterstützung und
in Kooperation mit der

Gemeinnützigen
Hertie-Stiftung 

Medienpartner

Spektrum.de

**GEHIRN
UND
GEIST**

Gefördert durch



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR WISSENSCHAFT, FORSCHUNG UND KUNST

www.dasgehirn.info
Der Kosmos im Kopf

ZKM Zentrum für Kunst und
Medientechnologie Karlsruhe

Lorenzstraße 19, 76135 Karlsruhe