

# Spektrum

DER WISSENSCHAFT

ERDE 3.0

GEOTHERMIE  
Kommt die  
Energiewende  
aus der Tiefe?

SEPTEMBER 2012

PHYSIK

Neuer Rechenrick zur Vereinheitlichung der Naturkräfte

ANTHROPOLOGIE

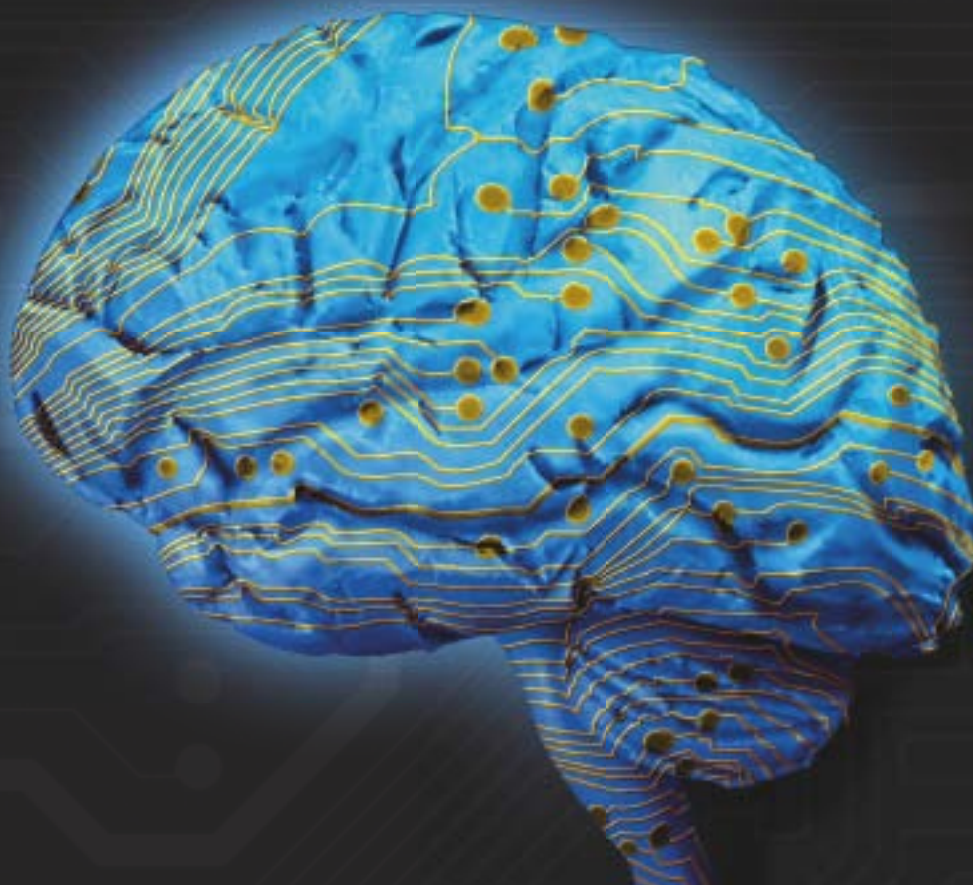
Unser wahrer Urahn gefunden?

IMMUNOLOGIE

Nobelpreisträger als Patient im Selbstversuch

## Die Simulation des Gehirns

Wie Forscher unser Denkorgan nachbauen



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



# Unsere Neuerscheinungen



epoc 3/2012

## OTTO DER GROSSE – EROBERER, KAISER, MISSIONAR

Als Sohn eines Sachsenherzogs geboren, im geschichtsträchtigen Aachen zum König des Ostfränkischen Reichs gekrönt, Sieger über die Ungarn und schließlich, vor 1050 Jahren, erster Kaiser der Deutschen. In der aktuellen Ausgabe von **epoc** dreht sich alles um Otto den Großen. Aus dem Inhalt:

- > Lechfeldschlacht: Legendärer Sieg des »Retters der Christenheit«
- > Regentinnen: Die mächtigen Frauen in Ottos Reich
- > Magdeburg: Antike Säulen für des Kaisers Kirchen

**epoc** kostet € 7,90 als Einzelheft und ist auch im Abonnement für € 27,- (vier Ausgaben pro Jahr) inklusive Inlandsporto (ermäßigt auf Nachweis € 23,-) zu beziehen.



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](http://www.spektrum.com/ahnert) zu bestellen.*



Spektrum Spezial – Physik · Mathematik · Technik 3/2012

## ERDE 3.0: DIE ENERGIE DER ZUKUNFT

Damit die Erde eine Zukunft hat, gilt es jenseits von Erdöl, Gas und Kohle Energiequellen zu erschließen und zu nutzen, die sauber sind und sich nicht erschöpfen. Gerade jetzt, da die Bundesregierung die Energiewende eingeläutet hat und energisch vorantreibt, ist es wichtig zu wissen, welche Möglichkeiten wir haben, von fossilen Rohstoffen unabhängig zu werden. In diesem Heft von **Spektrum der Wissenschaft** beleuchten Experten und Wissenschaftsjournalisten die Chancen und Probleme der verschiedenen Optionen für eine nachhaltige, umweltfreundliche Energieversorgung der Welt.

Das Spezial »Erde 3.0 – Die Energie der Zukunft« kostet € 8,90 zzgl. Versand.

Die Spezial-Reihen können auch unter [www.spektrum.de/spezialabo](http://www.spektrum.de/spezialabo) bezogen werden.



## GEHIRN&GEIST 9/2012

Zehnmal pro Jahr erwarten Sie in **G&G** spannende Berichte aus folgenden Themengebieten: Psychologie, Hirnforschung, Medizin, Psychiatrie, Psychotherapie, Philosophie, Pädagogik, Religion, Neurotheorie und künstliche Intelligenz. Themen der aktuellen Ausgabe sind:

- > ADHS: Was macht Kinder hyperaktiv?
- > Wahres Ich: Forscher vermessen das Unbewusste
- > Wahrer Gott: Rückschau auf 30 Jahre Neurotheologie
- > Wahre Lügen: Warum manche Hirngeschädigte konfabulieren

**Gehirn&Geist** kostet € 7,90 als Einzelheft und ist auch im Abonnement (zehn Ausgaben pro Jahr) für € 68,- inkl. Inlandsporto (ermäßigt auf Nachweis € 55,-) zu beziehen.

Alle Hefte sind im Handel erhältlich oder unter:



Hartwig Hanser  
Redaktionsleiter  
hanser@spektrum.com

## Das Gehirn im Computer

Seit 20 Jahren verfolge ich die Fortschritte bei der Erforschung des menschlichen Gehirns und seiner Funktionsweise: angefangen von Neurobiologievorlesungen im Studium an der ETH Zürich über meine Promotion am Friedrich-Miescher-Institut in Basel, meine Arbeit am »Lexikon der Neurowissenschaft« von Spektrum Akademischer Verlag bis zu meiner Tätigkeit als Redakteur – zuerst für »Gehirn&Geist« und seit 2010 für »Spektrum der Wissenschaft«. Im Verlauf dieser zwei Jahrzehnte erfuhr die Hirnforschung einen geradezu atemberaubenden Aufschwung. Neue Untersuchungstechniken wie bildgebende und genetische Verfahren vermittelten eine überwältigende Fülle von Einsichten in die neuronalen Abläufe. Und das auf verschiedensten Ebenen: von Neurotransmittern und Ionenkanälen bis hin zur Aktivität ganzer Hirnareale. Dennoch – richtig verstanden haben Forscher bis heute nicht, wie das Gehirn funktioniert. Jetzt versuchen sie daher, dem Rätsel aus einer ganz anderen Richtung beizukommen: durch Nachbilden des menschlichen Denkorgans mit Hilfe von Computern.

Am weitesten ist dabei wohl die Arbeitsgruppe von Henry Markram an der EPF Lausanne. Das Forscherteam sammelte jahrelang alle verfügbaren biologischen Informationen über Neurone und ihre Funktionsweise, um 2005 zunächst eine einzelne Nervenzelle per Computer zu simulieren – inklusive der Eigenschaften aller ihrer Bestandteile wie etwa Ionenkanäle. Als Nächstes erweiterten sie das Projekt 2007 auf eine so genannte kortikale Säule; das ist ein Netzwerk aus rund 10 000 Nervenzellen, eine Art Grundeinheit des Gehirns. Jetzt setzt Markram zum großen Sprung an: die komplette Simulation des menschlichen Denkorgans bis zum Jahr 2023. Für dieses »Human Brain Project« haben sich mehr als 100 Forschungsinstitute weltweit zusammengeschlossen. Ab S. 82 erläutert Markram seine kühne Vision – und welchen Erkenntnisgewinn und Nutzen die Wissenschaftler sich davon erhoffen.

Allerdings stehen andere Forscher Markrams Vorhaben kritisch gegenüber, allein schon wegen der ungeheuren benötigten Computerleistung, die derzeit so noch gar nicht zur Verfügung steht. Einer davon ist der Heidelberger Physiker Karlheinz Meier, der Markrams Vorgehensweise für ineffektiv hält. Die Schuld daran sieht er in der Arbeitsweise der dabei verwendeten herkömmlichen Digitalcomputer. Für sein eigenes, ebenfalls europaweit vernetztes Projekt »BrainScaleS« baut Meier daher eigens analoge Rechner aus elektronischen Bauteilen, um Hirnfunktionen zu emulieren statt zu simulieren. Wir baten Meier, sein Alternativkonzept der »neuromorphen Computer« ebenfalls für »Spektrum« darzustellen (S. 92).

**Konkurrenz belebt das Geschäft.** In diesem Sinne könnten sich beide Herangehensweisen gegenseitig befruchten und ergänzen. Dann rückt ein funktionsfähiges Modell des menschlichen Gehirns vielleicht tatsächlich in greifbare Nähe. Allerdings könnten sich damit noch ganz andere Probleme stellen, etwa ethischer Art: Ist ein solches Gebilde intelligent? Entwickelt es gar Bewusstsein? Und wie gehen wir dann damit um?

Über Fragen wie diese sollten wir heute schon nachdenken, findet Ihr

### AUTOREN IN DIESEM HEFT



**Henry Markram** von der EPF Lausanne (links) und **Karlheinz Meier** von der Universität Heidelberg verfolgen zwei grundsätzlich verschiedene Ansätze, um neuronale Strukturen elektronisch nachzubauen (S. 82, S. 92).



Ab S. 64 berichtet der Archäologe **Oliver Hüllden** von der LMU München über neue Ausgrabungen aus dem Reich des legendären Königs Krösus.

### AUSGEZEICHNET!

»Spektrum«-Autor **Robert Gast** erhielt am 14. Juli den Junior Science Writers Award der Euroscience-Stiftung in der Kategorie »Nachwuchs«. Gast hat zahlreiche Artikel für uns geschrieben, zuletzt etwa über Wasserkraftwerke in Heft 2/2012.

**Gerhard Samulat** wurde am 4. Juli für seinen Artikel über Windkraftnutzung in Heft 1/2012 mit dem Fraunhofer UMSICHT-Wissenschaftspreis ausgezeichnet.

Die Redaktion freut sich mit ihren Autoren über die Ehrungen!



3 Editorial

6 Leserbrief/Impressum

8 Spektrogramm

Algenblüte entsorgt CO<sub>2</sub> • Neandertaler waren tüchtige Fellschaber • Stern verliert plötzlich seine Staubscheibe • Lithium-Luft-Akku funktioniert • Tintenfische zeigen feminine Seite • Dunkle Galaxien

11 Bild des Monats

Rückzug der Gletscher

12 Forschung aktuell

Wo sind die Neutrinos?

Gammaausbrüche bieten keine Erklärung für energiereiche kosmische Strahlung.

Immer knapp daneben

Die Gesetze hinter den unsauberen Rhythmen menschlicher Spieler.

Den Schutzpanzer der Krebszellen ausschalten

Ein neuer Therapieansatz gegen Tumoren.

SPRINGER'S EINWÜRFE

Wie man soziale Netzwerke manipuliert

Einflussnahme per Internet als Forschungsobjekt.

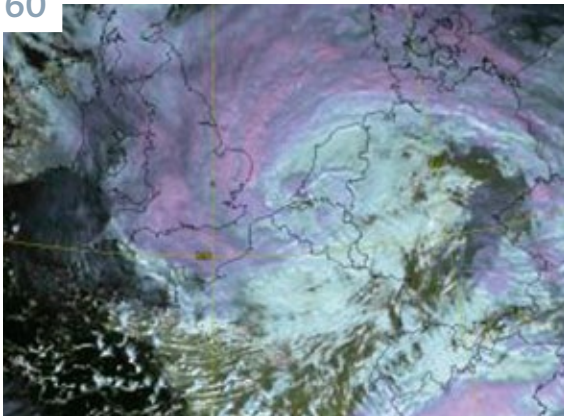
22



38



60



BIOLOGIE & MEDIZIN

► 22 Ein neuer Urahn?

Kate Wong

In Südafrika entdeckten Forscher einen Vormenschen – möglicherweise den Vorläufer der Gattung *Homo*.

► 32 Patient im Selbstversuch

Katherine Harmon

Der Nobelpreisträger Ralph M. Steinman wandte seine experimentellen Krebstherapien am eigenen Körper an.

PHYSIK & ASTRONOMIE

► 38 Umfassende Theorie der Naturkräfte

Zvi Bern, Lance J. Dixon, David A. Kosower

Mit einem Rechentrick könnte es endlich gelingen, eine Theorie aller fundamentalen Wechselwirkungen zu entwickeln.

SCHLICHTING!

46 Farbenschillernder Nebel

H. Joachim Schlichting

Die Natur muss erst einmal Wassertröpfchen nach Größe sortieren, damit wir Farbeffekte in Nebelfahnen beobachten können.

ESSAY

48 Komplexität und Emergenz

Michael Springer

Die beiden Begriffe sollen das Verhalten unübersichtlicher Systeme beschreiben. Doch was bedeuten sie konkret?

PHYSIKALISCHE UNTERHALTUNGEN

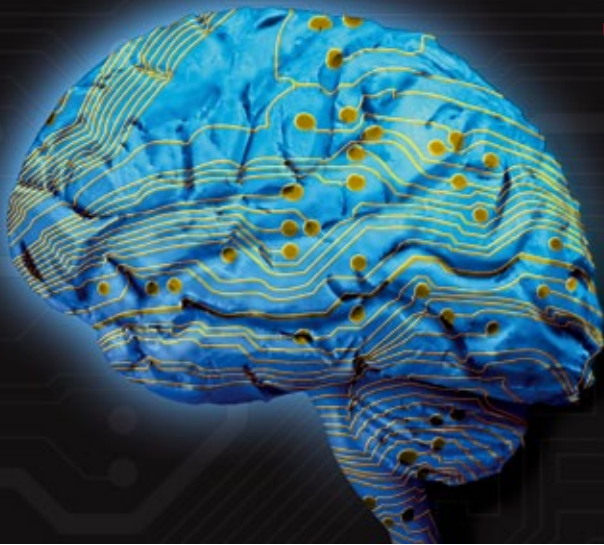
60 Wie Tief Xynthia Luft holte

Thomas Rubitzko

Warum strömt die Luft in einer linksdrehenden Spirale in ein Tiefdruckgebiet hinein? Paradoxe Antwort: Weil die Corioliskraft sie nach rechts ablenkt.



► TITELTHEMA



## Die Simulation des Gehirns

### 82 Auf dem Weg zum künstlichen Gehirn

*Henry Markram*

Ein ambitioniertes Projekt zielt darauf ab, in den nächsten zehn Jahren das menschliche Gehirn mittels Supercomputern vollständig zu simulieren.

### 92 Neurone & Co. – Imitieren mit Silizium

*Karlheinz Meier*

Um Computern das Denken beizubringen und obendrein das Gehirn besser zu verstehen, bauen Forscher es aus elektronischen Elementen nach.

64



72



### 100 Rezensionen

*Brian Greene: Die verborgene Wirklichkeit* • *Paul Krugman: Vergesst die Krise!* • *Steven S. Pinker: Gewalt* • *Sabine Paul: PaläoPower* • *Mary Roach: Die fabelhafte Welt der Leichen* • *Adam Hart-Davis: Das Buch der Zeit* • *Henning Aibel: Unser Technikerbe*

### 64 Neues aus dem Reich des Krösus

*Oliver Hülnden*

Schon in der Antike galt das kleinasiatische Lydien als Mythos: Die tragische Geschichte um König Krösus, der ein Orakel Delphis falsch deutete und sein Reich ins Verderben führte, war legendär. Archäologen und Historiker suchen nun nicht nur in der einstigen Hauptstadt Sardis nach seinen Spuren, sondern auch in der lydischen Provinz.

MENSCH & KULTUR

### ► 72 Geothermie: Energie aus der Tiefe

*Karl Urban*

In Pilotanlagen versuchen Ingenieure seit Jahren, die Wärme des Erdinneren in Kraftwerken nutzbar zu machen. Bislang blieb allerdings der Beitrag dieser Technologie zum Energiemix abseits vulkanischer Zonen noch überschaubar. Doch auch fernab von diesen, wie in Deutschland oder Australien, lässt sich die Tiefenwärme anzapfen – dank neuer Methoden.

ERDE & UMWELT

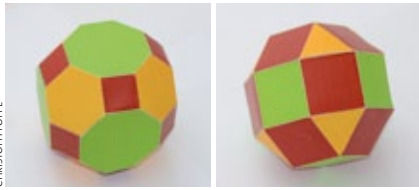


### 59 Wissenschaft im Rückblick

Vom Sonnendampfkessel zum Elektronenbeschleuniger

### 106 Vorschau

Titelmotiv: Spektrum der Wissenschaft / Daniela Leitner  
Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ► gekennzeichnet.



CHRISTOPH HOPE

## Erratum

In »Das ikosidodekaedrische Prismatohexakosihekatonikosachoron« (Heft 6/2012) wurden in der Bildunterschrift auf S. 62 oben bei den beiden letzten der fünf abgebildeten Körper die Namen verwechselt. Es muss heißen »das große [nicht das kleine] Rhombenkuboktaeder (4, 6, 8)« (drittletzte Zeile) und »das kleine [nicht das große] Rhombenkuboktaeder (3, 4, 4, 4)« (letzte Zeile). Heinrich Bubeck aus Ravensburg machte uns auf den Fehler aufmerksam.

## Bio-Begrifflichkeiten

*Edgardo D. Carosella und Nathalie Rouas-Freiss erklärten, weshalb das mütterliche Immunsystem den Fötus toleriert. (»Wie sich das Ungeborene vor der Mutter schützt«, Juni 2012, S. 22)*

**Hellmuth Zöltzer, Kassel:** Nicht der Embryo produziert den Trophoblasten, sondern nach der Befruchtung entsteht über das Blastomerenstadium die Mo-

ricula. Die späte Morula enthält zwei verschiedene Zelltypen: den Embryoblasten, aus dem die Strukturen des Embryos hervorgehen, und den Trophoblasten, aus dem die Plazenta und weitere Hilfsstrukturen hervorgehen. Bei der Kontaktaufnahme zwischen Mutter und Kind handelt es sich weder um embryonale Zellen noch um die Gebärmutter-schleimhaut im ursprünglichen Sinn. Wiederum sind es hier Trophoblastzellen, und außerdem hat die Gebärmutter-schleimhaut in der Kontaktzone die so genannte Dezidua ausgebildet. In dem Bereich oberhalb der Basalplatte der Plazenta existieren keine mütterlichen Blutgefäße, sondern vom Trophoblasten ausgekleidete Räume, durch die das mütterliche Blut fließt. Die embryonalen Blutgefäße befinden sich in den Trophoblastzotten.

## Echte und falsche Pilze

*Laut Harold Schmitz und Howard-Yana Shapiro bedrohen unter anderem Pilzkrankheiten den empfindlichen Kakaobaum. (»Die Zukunft der Schokolade«, Juli 2012, S. 78)*

**Ekkehard Gessner, Nottuln:** Leider hat Frau Pahler in ihrem Leserbrief in Heft 8/2012 eine richtige Aussage im Artikel

falsch verbessert. Während im Originaltext steht, dass *Phytophthora*-Arten »pilzähnliche Organismen« sind, widerspricht sie im Leserbrief mit der Bemerkung, dass *Phytophthora* doch ein Pilz sei. Das entspricht aber nicht dem heutigen Stand der Wissenschaft.

Die Gattung *Phytophthora* (Ordnung Peronosporales, Abteilung Oomycota) gehört nicht zu den Pilzen (Mycota) und ist auch nicht mit ihnen verwandt. Schon 1969 hat Hanns Kreisel in seinem Buch »Grundzüge eines natürlichen Systems der Pilze« die Oomycota aus dem Pilzreich »Eumycota« ausgeschlossen und sie als pilzähnliche Organismen bezeichnet. Diese Auffassung wurde durch neuere elektronenmikroskopische und molekulargenetische Untersuchungen bestätigt.

## BRIEFE AN DIE REDAKTION

... sind willkommen! Schreiben Sie uns auf [www.spektrum.de/leserbriefe](http://www.spektrum.de/leserbriefe)

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

Die vollständigen Leserbriefe und Antworten der Autoren finden Sie ebenfalls unter: [www.spektrum.de/leserbriefe](http://www.spektrum.de/leserbriefe)

**Spektrum**  
DER WISSENSCHAFT

**Chefredakteur:** Dr. Carsten Könneker (vi.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 Findeklea (Bild des Monats); E-Mail: [redaktion@spektrum.com](mailto: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  
**Redaktionsassistentin:** 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 338114  
**Verlagsleiter:** Richard Zinken  
**Geschäftsleitung:** Markus Bossle, Thomas Bleck  
**Herstellung:** Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733  
**Marketing:** Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: [service@spektrum.com](mailto:service@spektrum.com)  
**Einzelverkauf:** Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744  
**Übersetzer:** An diesem Heft wirkten mit: Gerald Bosch, Dr. Markus Fischer, Dr. Michael Springer.

### Leser- und Bestellservice:

Helga Emmerich, Sabine Häusser, Ute Park, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: [service@spektrum.com](mailto: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](mailto:spektrum@zenit-presse.de), Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn  
**Bezugspreise:** Einzelheft € 7,90 (D/A) / € 8,50 (L) / sFr. 14,-; im Abonnement € 84,- für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 69,90. Die Preise beinhalten € 8,40 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 8,40 Portomehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70). Die Mitglieder des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBio) und von Mensa e.V. erhalten SdW zum Vorzugspreis.

**Anzeigen:** iq media marketing gmbh, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH, Bereichsleitung Anzeigen: Marianne Dölz; Anzeigenleitung: Patrick Priesmann, Tel. 0211 887-2315, Fax 0211 887 97-2315; verantwortl. 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 Zugäng-

lichmachung, 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 Rechteinhaberschaft 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.





# NEHMEN SIE UNS MIT!

Ausgewählte Magazine aus dem Verlagshaus **Spektrum der Wissenschaft** nun auch für iPad und Android-Tablets



alle Artikel  
im Volltext

Lesemodus

zoombare  
Bilder und  
Grafiken

Videoclips  
& Weblinks

Lesezeichen

Suchoptionen

[www.spektrum.com/kioskapp](http://www.spektrum.com/kioskapp)



GEOENGINEERING

## Algenblüte entsorgt Kohlendioxid

**K**ünstlich ausgelöste Algenblüten können der Atmosphäre langfristig Kohlendioxid entziehen und damit der Erderwärmung entgegenwirken. Das haben Forscher im Experiment »Eifex« belegt. Jedoch lässt sich der Prozess kaum steuern und liefert nur schwer vorhersehbare Resultate.

Das Team um Victor Smetacek vom Alfred-Wegener-Institut in Bremerhaven leitete 14 Tonnen Eisensulfat ins Südpolarmeer ein. Eisen kommt in vielen Meeresregionen nur sehr niedrig konzentriert vor, was das Wachstum von Algen hemmt, da diese das Element unter anderem für die Foto-

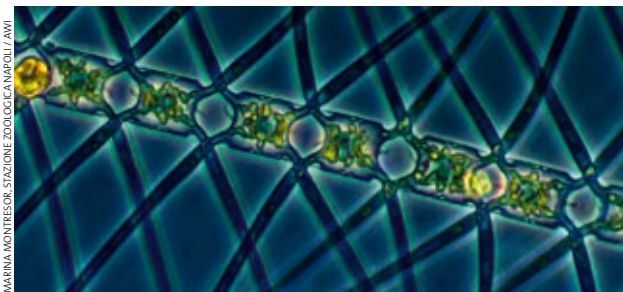
synthese benötigen. Gelangen große Mengen Eisen ins Ozeanwasser, etwa durch Staub vom Festland oder durch schmelzende Gletscher, führt das zur massenhaften Vermehrung von Algen. Die neu gebildete Biomasse bindet viel Kohlendioxid aus der Atmosphäre.

Auch beim Eifex-Experiment löste die Eisendüngung binnen weniger Wochen eine starke Algenblüte aus, die bis in 100 Meter Wassertiefe reichte. Nach etwa fünf Wochen begannen die Algen abzustarben und zum Grund zu sinken. Mindestens die Hälfte ihrer Biomasse verschwand dabei in mehr als 1000 Meter Tiefe – und wird wohl

in den kommenden Jahrhunderten auf dem Meeresboden bleiben.

Allerdings können solche Eingriffe auch andere Folgen haben. Im 2009 durchgeführten »Lohafex«-Experiment ließ sich zwar ebenfalls eine Algenblüte auslösen, doch die Algen wurden sofort von Zooplankton-Organismen gefressen, die das frisch gebundene Kohlendioxid gleich wieder ausschieden. Dass das bei Eifex nicht geschah, liegt daran, dass sich hier vor allem Kieselalgen vermehrten, die eine harte Schale haben und deshalb vor Fressfeinden relativ gut geschützt sind. Zudem sinken sie nach dem Absterben schneller in die Tiefe. Kieselalgen benötigen aber gelöstes Silikat, um ihre Schalen aufzubauen. Da es in vielen Meeren daran mangelt, müsste zum Auslösen einer Blüte auch dieser Stoff extra zugeführt werden. Zudem hängt das Wachstum schwer fressbarer Algenarten noch von anderen, teils unbekannteren Faktoren ab.

*Nature* 487, S. 313–319, 2012



MARRA MONTRESOR, STAZIONE ZOOLOGICA NAPOLI / AWI

**Kieselalgen – hier ein Exemplar der Spezies *Chaetoceros atlanticus* – besitzen eine harte Schale. Sie fallen deshalb nicht so schnell Fressfeinden zum Opfer.**

ANTHROPOLOGIE

## Neandertaler waren tüchtige Fellschaber

**D**ie Skelette von Neandertalern weisen auffallend kräftige rechte Oberarmknochen auf. Eine verbreitete Erklärung dafür lautet, dass diese Frühmenschen intensiv mit Speißen oder Lanzen jagten und sich ihr Knochenbau entsprechend angepasst habe. Colin Shaw von der University of Cambridge (England) und seine Kollegen sind anderer Meinung: Der starke rechte Arm könnte auf handwerklichen Tätigkeiten zurückgehen, etwa das Schaben von Tierfellen.

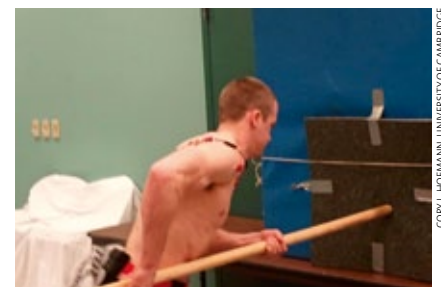
Zu diesem Schluss kamen die Forscher durch Experimente, in denen sie Männer mit einer Holzstange auf Teppiche und Matten einstechen ließen. Dabei zeichneten sie die Aktivität der beteiligten Muskeln auf. Alle Versuchspersonen waren Rechtshän-

der und angewiesen worden, mit beiden Händen zuzustoßen. Sie entschieden sich durchweg dafür, den Speiß mit der linken Hand zu führen – diese also weiter vorn am Schaft zu haben als die rechte. Das Ergebnis war eindeutig: Die Brust- und Schultermuskeln der linken Körperhälfte arbeiteten beim Zustechen sehr viel intensiver als die entsprechenden Muskeln der rechten Körperseite.

Außerdem mussten die Teilnehmer mit verschiedenen Werkzeugen einen Teppich bearbeiten, wobei die Bewegungsabläufe denen beim Abschaben eines Fells glichen. Jetzt waren die Muskeln der rechten Körperhälfte deutlich aktiver. Das spricht nach Ansicht der Forscher dafür, dass der starke rechte Arm der Neandertaler un-

ter anderem von der Fellbearbeitung herrührte. Möglicherweise hätten sich die Frühmenschen damit ausgiebiger beschäftigt als mit der Jagd selbst – ein Verhalten, das ihnen vielleicht die Kaltzeiten des Pleistozäns zu überleben half.

*PLoS ONE* 7, e40349, 2012



CORY L. HOFFMANN, UNIVERSITY OF CAMBRIDGE

**Ein Versuchsteilnehmer sticht auf einen Teppich ein.**

## Stern verliert plötzlich seine Staubscheibe

Innerhalb von nur zwei Jahren scheint sich die Staubscheibe um einen jungen Stern fast aufgelöst zu haben, berichten Astronomen um Carl Melis von der University of California in San Diego. Etwas Vergleichbares ist noch nie beobachtet worden. Auch gegenwärtige astrophysikalische Modelle können das Phänomen nicht zufriedenstellend erklären.

Es handelt sich um den sonnenähnlichen Stern TYC 8241 26521, der 450 Lichtjahre entfernt ist. Messungen aus den Jahren bis 2008 belegen, dass sein Licht damals sehr starke Infrarotanteile enthielt – ein deutlicher Hinweis auf heißen, dichten Staub in der Umgebung des rund zehn Millionen Jahre alten Himmelskörpers. Im Januar 2009 beobachteten die Forscher den Stern durch das Gemini-Süd-Teleskop in Chile. Diesmal war die Intensität des Infrarotlichts auf ein Drittel des Vorjahreswerts abgefallen. Nochmals ein Jahr später zeigten Daten des amerikanischen Weltraumteleskops WISE einen weiteren Rückgang der Infrarotstrahlung um den Faktor zehn.

Offenbar sei die Staubscheibe um den Stern binnen zwei Jahren weit gehend verschwunden, schreiben die Astronomen. Laut Berechnungen muss sie sich dabei aus einem Gebiet zurückgezogen haben, das dem inneren Sonnensystem entspricht. Vermutlich hängt das Phänomen mit einer aktiven Phase der Planetenbildung zusammen – darauf deuten Schätzungen der früheren Staub-

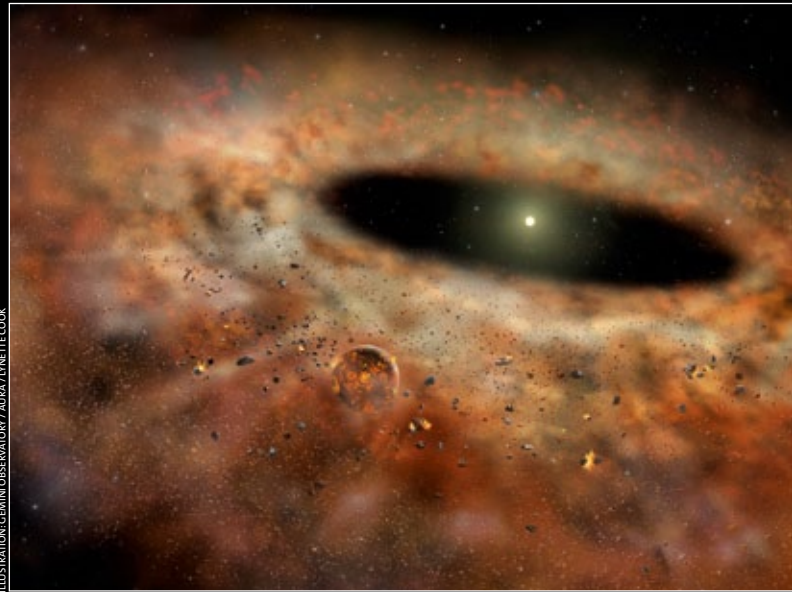


ILLUSTRATION: GEMINI OBSERVATORY / AURA / VNET/COOK

So könnte die Staubscheibe um den Stern TYC 8241 26521 ausgesehen haben, kurz bevor sie sich auflöste.

menge hin. Die überraschende Geschwindigkeit des Vorgangs wirft ein neues Licht auf die Frage, wie Planeten entstehen.

*Nature* 487, S. 74–76, 2012

## Lithium-Luft-Akku besteht Praxistest

Weltweit suchen Forscher nach leistungsfähigeren elektrischen Batterien. Eine viel versprechende Option ist der so genannte Lithium-Luft-Akku, der theoretisch eine Energiedichte von bis zu 11 Kilowattstunden pro Kilogramm erreicht – das 50-Fache heutiger Lithiumionenbatterien. Seine Anode besteht aus metallischem Lithium, seine Kathode hingegen aus Sauerstoff oder einfach aus Luft. Während des Entladens lösen sich positiv geladene Lithiumionen von der Anode und wandern durch den Elektrolyten hindurch zur Kathode. Die zurückbleibenden freien Elektronen fließen durch einen äußeren Strom-

kreis – den Verbraucher – zur Kathode und verbinden sich dort mit Sauerstoff und Lithiumionen zu Lithiumperoxid. Beim Aufladen läuft der umgekehrte Vorgang ab.

Das Konzept scheiterte bislang daran, dass an der Kathode stets reaktionsfreudige Sauerstoffspezies entstanden, die entweder mit dem Kathoden-Trägermaterial oder dem Elektrolyten reagierten, wodurch der Akku nur wenige Lade-Entlade-Zyklen durchhielt. Wissenschaftlern um Peter Bruce von der University of St. Andrews (Schottland) ist es nun gelungen, diese Schwierigkeit zu überwinden. Als Trägermaterial für die Kathode ver-

wendeten sie poröses Gold, als Elektrolyt diente das organische Lösungsmittel Dimethylsulfoxid, versetzt mit kleinen Mengen Lithiumchlorat. In diesem Akku erwiesen sich die Reaktionen an der Kathode als hoch reversibel, wodurch er selbst nach 100 Ladezyklen nur 5 Prozent seiner anfänglichen Speicherkapazität verlor.

Für eine Massenproduktion ist der Bautyp wegen der benötigten Gold-Elektroden zwar zu teuer. Möglicherweise ließen sich aber stattdessen Kohlenstoffelektroden verwenden, die mit Gold beschichtet sind, spekulieren die Forscher.

*Science* 10.1126/science.1223985, 2012

BIOLOGIE

## Tintenfische zeigen ihre feminine Seite

Um sich zu tarnen, können Tintenfische das Muster und die Farbe ihrer Haut ändern. Die Männchen der Art *Sepia plangon* nutzen diese Fähigkeit zusätzlich zum Täuschen von Rivalen. Begegnet ihnen ein Konkurrent, während sie um ein Weibchen werben, dann stellen sie auf der ihm zugewandten Körperhälfte eine unauffällige Tarnfärbung zur Schau, wie sie

für Weibchen typisch ist. Auf der zur Angeboteten weisenden Seite jedoch zeigen sie pulsierende Streifen, die Paarungsbereitschaft signalisieren. Das haben Forscher um Culum Brown von der Macquarie University in Sydney, Australien, entdeckt, als sie das Kommunikationsverhalten der Tiere untersuchten (siehe Video unter [www.spektrum.de/artikel/1156489](http://www.spektrum.de/artikel/1156489)).



Das werbende Tintenschmännchen (rechts im Bild) gibt sich auf der rechten Körperseite als harmloses Weibchen aus, auf der linken hingegen als feuriger Verehrer.

CULUM BROWN, MACQUARIE UNIVERSITY



MEHR WISSEN BEI  
**Spektrum.de**



Aktuelle Spektrgramme  
finden Sie täglich unter

[www.spektrum.de/spektrgramm](http://www.spektrum.de/spektrgramm)

In der Fortpflanzungszeit kommt es unter *Sepia-plangon*-Männchen häufig zu kräftezehrenden oder gar lebensgefährlichen Angriffen. Mit ihrer halbseitigen Färbetechnik schützen sich die Männchen davor und halten Konkurrenten davon ab, das Paarungsritual zu unterbrechen. So steigern sie ihren Fortpflanzungserfolg.

Die Kopffüßer wenden den Trick allerdings nur an, wenn lediglich ein Rivale in Sicht ist. Denn sobald mehrere auftauchen, wird das Risiko zu groß, dass der Betrug auffliegt. In diesem Fall muss der Entlarvte mit heftiger Bestrafung rechnen.

*Biology Letters* 10.1098/  
*rsbl.2012.0435*, 2012

ASTRONOMIE

## Dunkle Galaxien im Licht eines Quasars

Das Wissen über die frühe Galaxienbildung ist mangels Beobachtungsdaten noch lückenhaft. Viele Theorien gehen von so genannten »dunklen Galaxien« als Vorform heutiger Sterninseln aus. Diese Systeme sollten klein sein und viel Gas enthalten, aber kaum leuchten, weil in ihnen nur wenige Sterne entstehen. Es ist daher äußerst schwierig, sie zu entdecken.

Den bislang überzeugendsten Nachweis ihrer Existenz haben nun Forscher um Sebastiano Cantalupo von der University of California in Santa Cruz erbracht. Sie konzentrierten ihre Suche auf den Bereich um den Quasar HE 0109-3518, dessen intensives ultraviolettes Licht das Wasserstoffgas der Umgebung fluoreszieren lässt. Mit Hilfe lang belichteter Aufnahmen, die das Very Large Telescope in Chile lieferte, konnte das Team

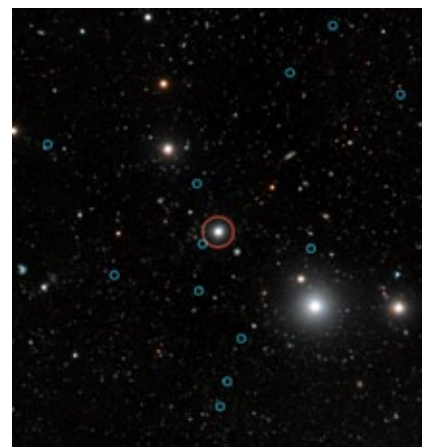
mehr als 100 kompakte, fluoreszierende Objekte aus Gas nachweisen. Nach Ausschluss jener Gebilde, die möglicherweise von eigenen Sternen erleuchtet werden, blieben zwölf dunkle Galaxien übrig, die nur im Licht von HE 0109-3518 aufscheinen. Sie enthalten jeweils rund eine Milliarde Sonnenmassen Gas.

Möglicherweise hilft der Befund zu erklären, warum die Zahl der im Universum beobachteten Galaxien kleiner ist, als es das vorhandene Gas erwar-

Der helle Quasar HE 0109-3518 (im roten Kreis) strahlt intensiv im Ultraviolettbereich. Sein Licht lässt mehrere dunkle Galaxien in der kosmischen Nachbarschaft schwach aufglimmen (blaue Kreise). Von selbst leuchten diese kaum, weil in ihnen nur wenige Sterne entstehen. Das macht sie nahezu unsichtbar.

ten lässt – die praktisch unsichtbaren dunklen Galaxien sind vielleicht schlicht übersehen worden. Einer der Gründe, weshalb in ihnen so wenig Sterne entstehen, könnte ihr geringer Anteil an schweren Elementen sein.

*Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, im Druck



ESO, DSS, SEBASTIANO CANTALUPO, IACS

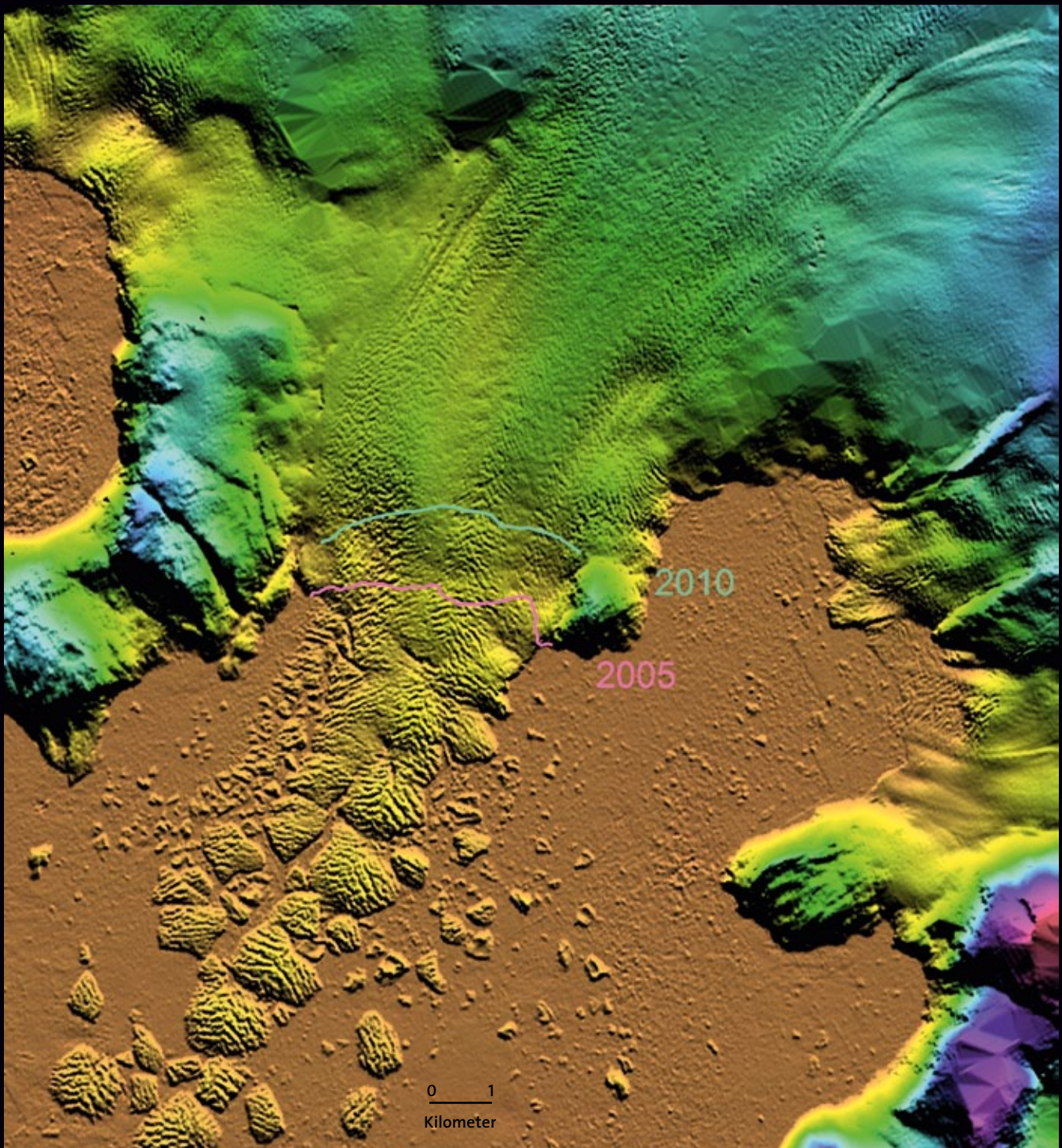


## RÜCKZUG DER GLETSCHER

Anhand von Luftaufnahmen aus den 1980er Jahren entstand ein digitales Höhenmodell der grönländischen Eisdecke an der Nordwestküste. Wie hier am Kong-Oscar-Gletscher zeigte sich, dass sich die Eiszungen schon damals deutlich zurückzogen und zahlreiche Eisberge abbrachen. Danach stabilisierten sich die Gletscher wieder, bis sich der Abbau ab 2005 erneut beschleunigte (siehe

Markierungslinien für die Gletscherstirn 2005 und 2010). Aktuelle Klimamodelle stützen sich bisher auf Satellitendaten der Eisdynamik, die aber kaum mehr als zehn Jahre in die Vergangenheit reichen – zu wenig, um sichere langfristige Prognosen zu erstellen. Hier kann die neue Methode wichtige zusätzliche Informationen liefern.

*Science 337, S. 569–573, 2012*





# Das Rätsel der fehlenden Neutrinos

Sind Gammastrahlenausbrüche die lang gesuchten Quellen der energiereichen kosmischen Strahlung? Dann müssten sie Unmengen Neutrinos aussenden. Doch trotz zweijähriger Suche hat das größte Neutrino-teleskop der Welt kein einziges extraterrestrisches Geisterteilchen aufgespürt!

VON JAN HATTENBACH

Victor Franz Hess dürfte nicht schlecht gestaunt haben in seinem Heißluftballon irgendwo über Böhmen und Brandenburg, im August 1912. Je höher der Ballon stieg, desto schneller entluden sich seine mitgeführten Elektrometer. Das hatte der österreichische Physiker nicht erwartet. Die ionisierende Strahlung, die für das Entladen der Messgeräte verantwortlich war, sollte nach damaliger Ansicht doch von der Erde ausgehen, also mit der Höhe abnehmen. Das Gegenteil war der Fall, und Hess hatte die richtige Erklärung: Offenbar bombardiert eine energiereiche Strahlung aus dem Weltall unseren Planeten. Diese Entdeckung bescherte Hess den Nobelpreis – und seinen Kollegen bis in die heutige Zeit Kopfzerbrechen.

Denn obwohl Hess' Ballonflug schon hundert Jahre zurückliegt, sind nicht alle Rätsel gelöst. Ein Teil dieser kos-

mischen Strahlung, die eigentlich eine Teilchenstrahlung ist, stammt aus extragalaktischen Quellen – doch aus welchen? Diese Frage zählt zu den derzeit wichtigsten der Astrophysik. Messungen am modernsten Neutrino-detektor der Welt zeigen nun, dass sie wohl auch bis auf Weiteres unbeantwortet bleiben wird. Möglicherweise müssen die Astronomen sogar eine ihrer Lieblingstheorien aufgeben.

Als heiße Kandidaten für die extragalaktischen Quellen der kosmischen Strahlung favorisieren sie seit Langem Gammastrahlenausbrüche. Solche »Gamma Ray Bursts« (GRBs) sind die gewaltigsten Energieausbrüche, die sich im Weltall beobachten lassen. Viele davon dürften »Todesschreie« verschmelzender Neutronensterne oder energiereicherer Supernovae sein, die zu Schwarzen Löchern kollabieren. In ihrer Umgebung werden, so die Vermutung, geladene Teilchen durch starke Magnetfelder beschleunigt. In der kosmischen Strahlung müssten diese als extrem energiereiche Partikel nachzuweisen sein. Solch energiereiche Teilchen finden sich darin tatsächlich – aber stammen sie wirklich aus Gammastrahlenausbrüchen? Diesen Zusammenhang konnten Physiker nun erstmals direkt überprüfen, indem sie versuchten, Gammastrahlenausbrüche im »Licht« der Neutrinostrahlung zu sehen. Zu ihrer Überraschung ließ sich jedoch kein einziges Neutrino nachweisen.

Den Umweg über Neutrinos gingen die Astrophysiker aus einem guten Grund. Denn die energiereichen Teilchen, deren Herkunft sie eigentlich feststellen wollen, sind elektrisch geladen. Sie erreichen die Erde deshalb nicht auf geradem Weg, sondern werden durch

Magnetfelder in der Milchstraße und im Sonnensystem auf völlig ungeordnete Bahnen gezwungen. Außerdem reagieren sie unterwegs mit Materie und Strahlung. So verlieren sie auf dem Weg von ihren Quellen bis zur Erde ihre Richtungsinformation. Neutrinos dagegen – jene fast masselosen, kaum zu fassenden Elementarteilchen – sind elektrisch neutral und reagieren nur sehr selten mit Materie. Staubwolken, Planeten, ja ganze Sterne durchdringen sie ungehindert, so dass ihre Flugrichtung direkt zu ihren Entstehungsorten zurückweist. Für Astrophysiker sind sie damit ideale Boten aus dem All – und machen ihnen gleichzeitig das Leben schwer.

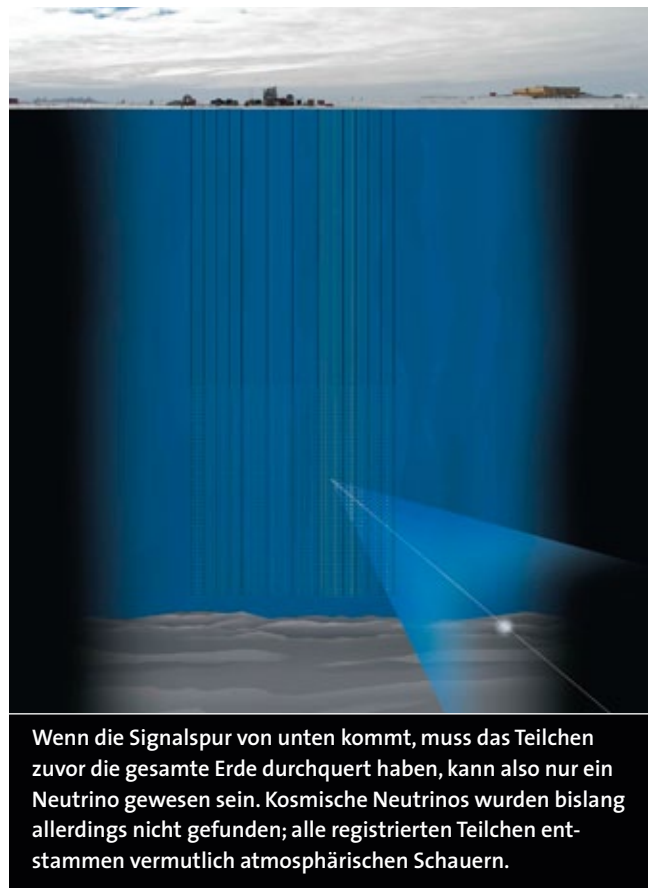
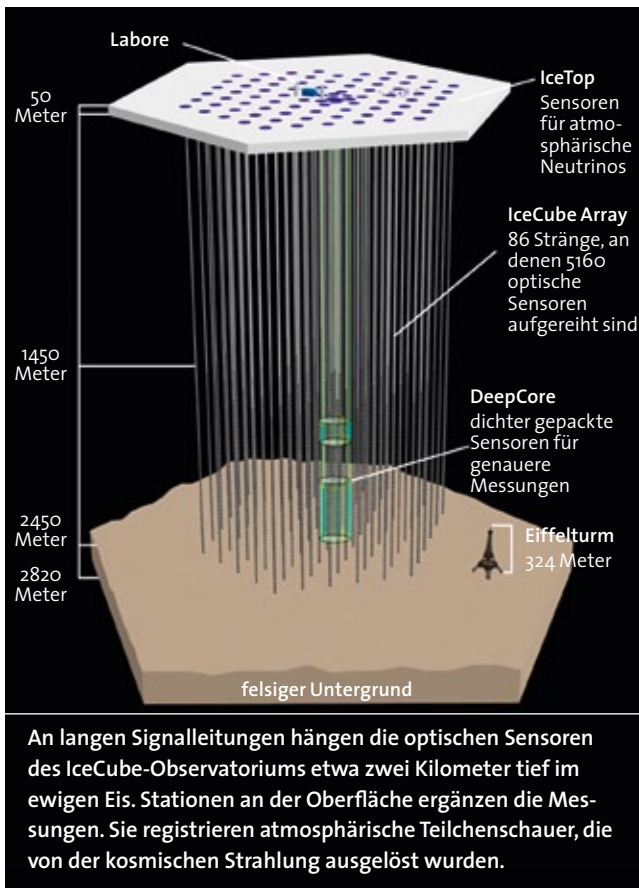
## Auch Riesendetektoren finden nur eine Handvoll Teilchen

Denn Teilchen, die mit Materie kaum in Kontakt treten, lassen sich auch schlecht nachweisen. Von den Abermilliarden beständig von der Sonne ausgesendeten Neutrinos durchqueren die allermeisten die Erde völlig unbemerkt. Erst seit wenigen Jahrzehnten gelingt es Physikern, mit ausgeklügelten Experimenten wenigstens einige dieser Sonnenneutrinos aufzuspüren. 1987 wiesen sie sogar erstmals Neutrinos aus einer anderen Galaxie nach: In verschiedenen Detektoren weltweit wurden insgesamt etwa 30 Exemplare gemessen – in einigen Fällen blieb der Nachweis zweifelhaft –, die von einer 160 000 Lichtjahre entfernten Supernova stammten. GRBs sind aber nicht nur energiereicher als Supernovae, sondern auch erheblich weiter entfernt. Um auch nur eine Handvoll ihrer Neutrinos auffangen zu können, benötigt man gewaltige Messinstrumente.

Das größte von ihnen wurde im Dezember 2010 nach einer Bauzeit von



Für IceCube wurden über 5000 lichtempfindliche Sensoren kilometertief ins antarktische Eis eingelassen.



LINKS: DANIELLE VEVEA & JAMIE YANG / NSF. RECHTS: ICECUBE-COLLABORATION / NSF

fast sieben Jahren fertig gestellt. Ein unterhalb der Amundsen-Scott-Station am Südpol gelegener Eisquader von einem Kubikkilometer Größe, »IceCube« genannt (siehe »IceCube – Neutrinojagd am Südpol«, SdW 8/2007, S. 38), dient dabei als Neutrinodetektor. Mit heißem Wasser bohrten die Forscher Löcher hinein und ließen mehr als 5000 lichtempfindliche Sensoren in sie hinab. Die kugelförmigen »Digital Optical Modules« (DOMs) hängen nun in 1,5 bis 2,5 Kilometer Tiefe an 86 langen Kabelsträngen wie Perlen an einer Kette. Jedes DOM ist etwas größer als ein Fußball und registriert schwache Lichtblitze, die durch Myonen ausgelöst werden, schwere Verwandte der Elektronen. Diese geladenen Elementarteilchen entstehen unter anderem, wenn Teilchen der kosmischen Strahlung auf Moleküle der Erdatmosphäre prallen und dabei Kaskaden von Sekundärteilchen erzeugen. Die meisten von IceCube registrierten Myonen stammen aus solchen atmosphärischen Teilchenschauern. Spannender wird es, wenn

die Forscher das Licht von Teilchen auffangen, die von »unten« kommen. Weil Myonen in Materie schnell absorbiert werden, müssen diese Exemplare knapp unterhalb des Detektors entstanden sein – erzeugt durch die Wechselwirkung eines Neutrinos mit einem Molekül. Erfassen gleich mehrere DOMs das Licht der Myonenspur, können die Forscher daraus die Flugbahn des Myons und damit die Herkunftsrichtung des ursprünglichen Neutrinos rekonstruieren.

### Das Warten auf kosmische Neutrinos hat noch kein Ende

Seit ihrer Fertigstellung registrierte die Apparatur auf diese Weise insgesamt etwa 100 000 Neutrinos. Dennoch ist es den Wissenschaftlern bislang nicht gelungen, auch nur eine einzige Quelle auszumachen: Projiziert auf den Himmel, ergibt sich kein Muster – die Neutrinos stammen gleichermaßen aus allen Richtungen. »Unsere Neutrino-Himmelskarte bleibt vorerst dunkel«, fasste Markus Ahlers von der Universi-

tät Wisconsin in den USA und Mitglied der IceCube-Kollaboration diesen Befund im Mai auf einer Fachtagung in München zusammen. Zum einen kam nur ein kleiner Teil der Neutrinos tatsächlich von »unten«. Zum anderen seien selbst diese Neutrinos höchstwahrscheinlich in atmosphärischen Schauern entstanden, nämlich auf der entgegengesetzten Seite der Erde. Auf das erste kosmische Neutrino müssen die Astronomen offenbar noch warten.

Dabei hatten Ahlers und seine Kollegen in den letzten Jahren ganz gezielt nach Neutrinos aus Gammastrahlenausbrüchen gefahndet. Fast täglich leuchtet es irgendwo am Himmel auf, unvermittelt und an völlig zufälligen Positionen. Die Blitze dauern selten länger als einige Minuten, manche sind gar nach Sekunden wieder verblasst. Satelliten überwachen den Himmel darum permanent und leiten ihre Meldungen unverzüglich an boden- und weltraumgestützte Teleskope weiter, damit auch diese das Phänomen in den Blick nehmen. Die Neutrinforscher bei IceCube



können sich allerdings Zeit lassen. Ihr Teleskop registriert sämtliche aus einem großen Himmelsabschnitt eintreffenden Neutrinos. Anschließend schauen sie in den Daten nach, ob aus den gemeldeten Richtungen in einem bestimmten Zeitraum mehr Neutrinos als üblich gekommen sind.

Vergeblich. Über 300 Gammablitz haben die Forscher untersucht, etwa acht Neutrinos hatten sie nachzuweisen erhofft, gesehen haben sie kein einziges. »Das Ergebnis hat uns überrascht, vielleicht auch ein wenig enttäuscht«, gibt Ahlers zu. Doch selbst diese Nullmessung war der Fachzeitschrift »Nature« eine Veröffentlichung wert (484 (7394), S. 351–354, 2012). Schließlich stellen die IceCube-Daten die gängigen Modelle der Gammastrahlenausbrüche auf eine harte Probe. Haben die Physiker dieses Phänomen überhaupt verstanden – und entsteht die kosmische Strahlung am Ende ganz woanders?

IceCube-Mitarbeiterin Elisa Resconi von der TU München warnt allerdings

vor schnellen Schlüssen: »Das Standardmodell der Gammastrahlenausbrüche bekommt durch unsere Messungen Probleme – vom Tisch ist es noch lange nicht.« Einerseits wurden die bislang veröffentlichten Daten mit einem noch unfertigen Detektor gewonnen. Nur etwa die Hälfte der DOMs standen zur Verfügung. Andererseits beruhen die erwarteten Neutrinoflüsse auf vielen Annahmen. Ein paar Veränderungen an den theoretischen Modellen, und das Nullresultat ist keine Überraschung mehr. Die Gammastrahlenausbrüche senden vielleicht einfach weniger Neutrinos aus als gedacht. Dann bräuchte es lediglich einen noch größeren »Eiswürfel« oder einfach mehr Zeit, um ihrer habhaft zu werden.

Doch was, wenn selbst ein vergrößerter Detektor keine Neutrinos aus den GBRs sieht? Theoretiker haben längst Alternativen parat. Beispielsweise könnten auch aktive Galaxienkerne (»Active Galactic Nuclei«, AGN) für die energiereichsten der kosmischen Teil-

chen verantwortlich sein. AGN werden ebenfalls von Schwarzen Löchern angeheizt, allerdings von solchen, die millionen- oder gar milliardenfach massereicher sind als jene, die bei Gammastrahlenausbrüchen beteiligt sein sollen. Ob sie Neutrinos aussenden, untersuchen Physiker bereits. Die Analyse von AGN-Messungen ist allerdings schwieriger. Anders als bei den kurzen GRB-Ereignissen spielt hier das statistische Untergrundrauschen eine größere Rolle. Erste Ergebnisse werden aber in naher Zukunft erwartet.

Dass man die mysteriösen Verursacher der Strahlung entlarven wird, dessen ist sich Markus Ahlers jedoch sicher. »Wir messen die kosmische Strahlung schließlich seit 100 Jahren, also müssen irgendwo auch ihre Quellen zu finden sein.« Bleibt zu hoffen, dass dies nicht noch einmal 100 Jahre dauert.

---

Jan Hattenbach ist Physiker und freier Wissenschaftsjournalist in Aachen. Er bloggt auf [www.scilogs.de/himmelslichter](http://www.scilogs.de/himmelslichter).

---

## MEDIZIN

# Den Schutzpanzer der Krebszellen ausschalten

Wissenschaftler der Stanford University haben einen neuen Therapieansatz für Krebs entdeckt: Ist ein von Tumoren ausgehendes Signal blockiert, können Immunzellen sie attackieren.

VON GERLINDE FELIX

Zwar hat die Krebstherapie in vielen Bereichen inzwischen eindrucksvolle Fortschritte zu verzeichnen, doch immer noch lassen sich manche Tumorformen kaum oder gar nicht heilen. Um entscheidende Verbesserungen zu erreichen, sind wohl auch grundsätzlich neue Ansätze erforderlich. Irving Weissman und seine Mitarbeiter von der Stanford University konzentrieren sich daher auf ein bestimmtes Protein auf der Oberfläche von menschlichen Krebszellen, genannt CD47. Dieses verhindert nämlich, dass das Im-

munsystem Tumorzellen als Störenfriede erkennt und vernichtet.

Die Bildung von CD47-Proteinen ist an sich ein normaler Schutzmechanismus von Körperzellen, um sich vor Angriffen durch Fresszellen (Makrophagen) zu schützen. Daher reichern etwa Blutstammzellen, die vorübergehend ihre sichere Nische im Knochenmark verlassen haben und im Blutkreislauf zirkulieren, CD47 auf ihrer Oberfläche an, um nicht attackiert zu werden. Das hatten Weissman und seine Kollegen bereits 2009 herausgefunden (*Cell* 138

(2), S. 271–285, 2009). Weiterhin erkannten die Forscher, dass bei bestimmten Blutkrebskrankungen – der myeloiden Leukämie und Lymphomen – die Tumorzellen ebenfalls mehr CD47 aufweisen. Ihre Schlussfolgerung: Krebszellen nutzen diesen Schutzmechanismus, um nicht von Fresszellen vernichtet zu werden. Dabei bindet sich das CD47 kurzzeitig an ein Protein namens SIRPalpha (signalregulatorisches Protein alpha) auf den Makrophagen. Der Kontakt löst in diesen eine Kette biochemischer Reaktionen aus, woraufhin

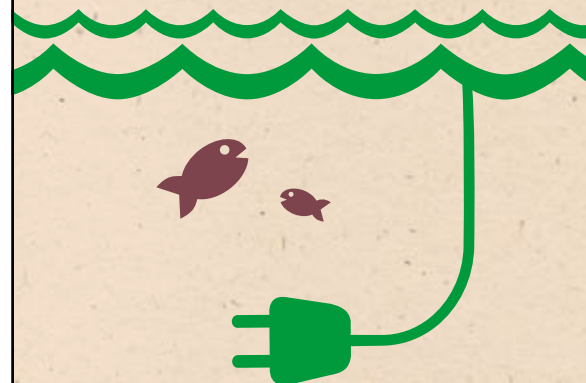


Natur  
Energie  
Plus

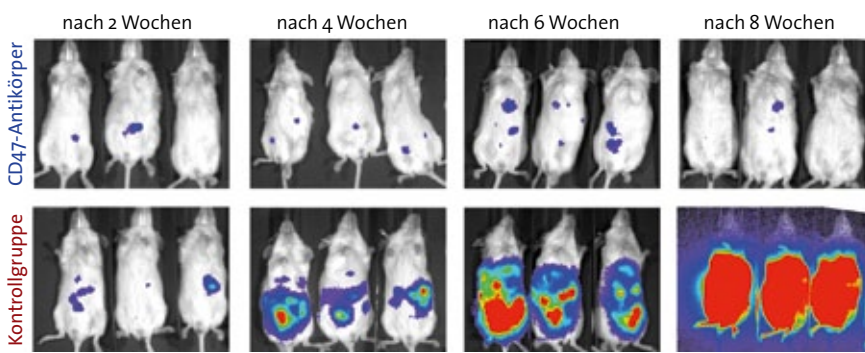
## Mit der Natur auf einer Welle.

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!



[www.naturenergieplus.de](http://www.naturenergieplus.de)



Antikörper gegen das Oberflächenprotein CD47 halten in Mäuse eingepflanztes menschliches Tumorgewebe in Schach (oben). Ohne die Behandlung würden die Tiere bald dem Krebs zum Opfer fallen (unten). Blau markiert schwaches, rot starkes Tumorstadium.

die Krebszelle verschont wird. Die Forscher sprechen vom »Don't eat me«-Signal des CD47, das auf die Fresszellen wie ein Stoppschild wirkt.

In einer neuen Studie kamen nun Stephan B. Willingham und Jens-Peter Volkmer aus der Arbeitsgruppe von Weissman und Kollegen zu dem Ergebnis, dass sich die meisten menschlichen Krebsarten dieses Tricks bedienen (*PNAS 109(17), S. 6662–6667, 2012*). »So produzieren nahezu alle Krebszellen das Oberflächenprotein CD47 in einer Menge, die durchschnittlich etwa das Dreifache jener von gesunden Zellen beträgt«, sagt Volkmer. Die Zahl der CD47-Moleküle bestimmten die Forscher mit der so genannten Durchflusszytometrie.

Des Weiteren entnahmen sie Gewebeproben von menschlichen Brust-, Eierstock-, Prostata-, Blasen-, Leber- und Hirntumoren und transplantierten sie in speziell gezüchtete Mäuse, die menschliches Tumorgewebe nicht abstoßen. Ein paar Wochen später injizierten sie dann einen gegen CD47 gerichteten Antikörper in die Tiere. »Der Antikörper dockte bei allen untersuchten Krebsarten an CD47 an und blockierte auf diese Weise das »Don't eat me«-Signal«, so Volkmer. Daraufhin attackierten die Fresszellen die Tumoren. Allerdings zeigte sich, dass Krebszellen zusätzlich noch eine andere Struktur auf ihrer Oberfläche haben müssen, die Makrophagen zum Mahl einlädt. Denn: Wurden die deutlich seltener auftretenden CD47-Proteine auf der Oberfläche

gesunder Zellen mit dem Antikörper blockiert, war dies allein noch kein Startsignal für die Fresszellen, sich diese Zellen einzuverleiben.

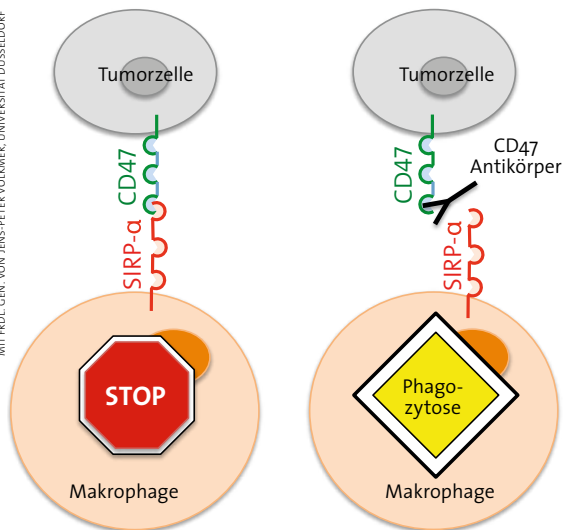
Bereits Ende 2010 beschrieben Mark Chao und Ravindra Majeti vom Weissman-Team, dass auf Krebszellen nicht nur ein »Don't eat me«-Signal zu finden ist, sondern als Gegenspieler auch ein »Eat me«-Signal: das Oberflächenprotein Calreticulin (*Sci Transl Med 2(63): 63ra94, 2010*). Solange CD47 und Calreticulin ihre Signale ungestört senden können, wird eine Krebszelle offenbar nicht gefressen. Ist jedoch von den beiden Proteinen selektiv das CD47 blockiert, attackieren die Immunzellen.

### Als Müll markiert

Doch warum sollten Krebszellen überhaupt »Eat me«-Signale aussenden, um sich den Fresszellen als Häppchen anzubieten? Vermutlich hilft Calreticulin normalerweise, beschädigte Zellen zu entfernen. Für diese Annahme spricht, dass gesunde Zellen kein Calreticulin zeigen. Werden sie aber geschädigt, taucht das Protein plötzlich auf ihrer Oberfläche auf. Es scheint die Zelle für Makrophagen als »Müll« zu markieren. »Bei Krebs könnte die Calreticulin-Expression auf der Oberfläche die kranke Zelle dazu anregen, vermehrt CD47-Proteine auszubilden, um eine Phagozytose durch Fresszellen doch noch abzuwenden«, erläutert Mark Chao von der Stanford School of Medicine.

Dass Calreticulin bei gesunden Zellen fehlt, erklärt, warum eine Therapie mit

MIT FRODL GEN, VON JENS-PETER VOLLMER, UNIVERSITÄT DÜSSELDORF



**CD47 auf der Oberfläche von Tumorzellen bindet sich an SIRP-Alpha auf Fresszellen (Makrophagen), was auf letztere wie ein Stoppsignal wirkt. Verhindert ein Antikörper diese Interaktion, kann die Fresszelle den Krebs ungehindert angreifen.**

einem gegen CD47 gerichteten Antikörper nur vergleichsweise wenig schädliche Nebenwirkungen hat, einmal abgesehen von einer vorübergehenden Blutarmut. »Das Blockieren des »Don't eat me«-Signals unterdrückte das Wachstum nahezu jedes menschlichen Krebsgewebes in den von uns getesteten Mäusen, mit minimaler Toxizität für den Organismus«, führt Weissman aus.

Innerhalb einiger Wochen nach der Antikörpertherapie schrumpften die

implantierten Tumoren in den Tieren, was Biolumineszenz-Aufnahmen zeigen (siehe Bild S. 15). Abhängig von der Ausgangsgröße des Tumors verschwindet der Krebs entweder ganz oder bildet zumindest keine Tochtergeschwülste mehr. Zirkulierende Krebszellen dürften ebenfalls effektiv beseitigt werden. Die CD47-Antikörpertherapie scheint umso besser zu wirken, je kleiner der Tumor ist und je früher die Therapie beginnt. Allerdings hat bei einigen

Mäusen mit implantiertem Brusttumorgewebe der neue Therapieansatz nicht zum erhofften Erfolg geführt. Woran dies liegt, ist bislang unklar.

Die aggressivsten Krebstypen haben übrigens die größte Zahl an Calreticulinmolekülen auf ihrer Oberfläche. Damit sollte die Antikörpertherapie bei diesen auch am durchschlagendsten wirken. Die an der Studie beteiligten Wissenschaftler sind sich ziemlich sicher, dass erste klinische Untersuchungen in ein oder zwei Jahren starten werden. Weissman könnte sich vorstellen, den Tumor vorab mittels Operation oder Radiotherapie zu verkleinern, um die Antikörperbehandlung noch effektiver zu machen. Bei einer Kombination mit Chemotherapie oder antientzündlicher Behandlung sei allerdings Vorsicht geboten, so der Wissenschaftler. Durch den dabei auftretenden Zellstress besteht das Risiko, dass gesunde Zellen plötzlich vermehrt »Eat me«-Signale aussenden – und dann ebenfalls ein Opfer der Fresszellen werden.

**Gerlinde Felix** ist freie Medizin- und Wissenschaftsjournalistin in Markt Wartenberg.

MUSIKALISCHE RHYTHMEN

# Immer haarscharf daneben

Forscher analysieren die geringfügigen Schwankungen in musikalischen Rhythmen mit den Methoden der Statistik. Die so aufgedeckten Gesetzmäßigkeiten erlauben es beispielsweise auch, computergenerierte Musik natürlicher zu gestalten.

VON HOLGER HENNIG, RAGNAR FLEISCHMANN UND THEO GEISEL

**W**arum klingen Musik und Schlagzeugrhythmen, die von Computern erzeugt werden, manchmal so unnatürlich? Ein Grund dafür liegt im Fehlen der winzigen Ungenauigkeiten, die zu jeder menschlichen Tätigkeit gehören. Egal welcher Musiker spielt: Abweichungen vom exakten Zeitmaß finden sich in jedem einzelnen Schlag eines jeden Taktes. Diese Abweichungen sind zumeist klein, etwa 10 bis 20 Millisekunden. Dies ist kürzer als die Dauer

eines Flügelschlags einer Libelle, dennoch kann man den Unterschied hören.

Toningenieuren ist das Phänomen seit Langem bekannt. Sie bauen sogar kleine zufällige Abweichungen in computergenerierte Musikrhythmen ein, um sie natürlicher wirken zu lassen – ein Verfahren, das *Humanizing* (Vermenschlichung) genannt wird. Doch die genauen Eigenschaften solcher Abweichungen, wenn der Mensch komplexe Rhythmen spielt, waren bislang

noch nicht untersucht worden. Sind die Variationen von einem Schlag zum nächsten rein zufällig? Oder stehen sie in einer Beziehung, die sich in einem Gesetz erfassen lässt? Um das herauszufinden, haben wir Methoden der Zeitreihenanalyse verwendet, wie sie in der Chaostheorie gebräuchlich sind.

Lassen Sie uns dem menschlichen Taktgefühl anhand eines einfachen musikalischen Experiments nachgehen. Ein professioneller Schlagzeuger



aus Ghana wurde gut fünf Minuten lang aufgenommen, während er seine Trommelschläge mit einem über Kopfhörer vorgegebenen Metronom synchronisierte. Die mittlere Abweichung des Musikers gegenüber der Vorgabe betrug –16 Millisekunden (Kasten S. 18). Der Schlagzeuger schlug seine Trommel also im Mittel leicht verfrüht, das Klicken des Metronoms vorausahnend.

Ein auffälliges Merkmal im unteren Diagramm im Kasten ist das Auftreten von Trends in der Zeitreihe. Zum Beispiel betragen die Abweichungen der Schläge in den Takten 200 bis 280 im Mittel –29 Millisekunden, deutlich mehr als im Gesamtmittel. Für eine Weile spielte der Schlagzeuger deutlich der Vorgabe voraus. Dagegen neigte er etwa eine halbe Minute (90 Schläge) vorher dazu, leicht hinter dem Metronomklick zu spielen. Offensichtlich treten die Abweichungen keineswegs rein zufällig auf. Erklingt ein bestimmter

Schlag vor dem Klicken des Metronoms, dann ist es wahrscheinlich, dass nachfolgende Schläge ebenfalls zu früh kommen. Solche Korrelationen zwischen den Abweichungen können bis zu mehrere Minuten erhalten bleiben. Es scheint, als hätte das Gehirn ein Gedächtnis für zeitliche Abweichungen. Das gilt im Übrigen nicht nur für zeitliche Intervalle: Ein verwandtes Phänomen tritt auch auf, wenn Probanden räumliche Abstände mehrmals möglichst gleichmäßig wiederholen sollen.

### Gedächtnis für Rhythmen

Der Einfluss einer Schlagabweichung auf einen nachfolgenden Schlag nimmt ab, je mehr Takte dazwischen liegen. Um dieses Abklingen der Korrelationen zu charakterisieren, zerlegten wir die Zeitreihen, das heißt die zeitlichen Abfolgen der Abweichungen, in eine Summe von Sinus- und Cosinusfunktionen verschiedener Frequenzen und

ermittelten daraus die relative Stärke bei jeder Frequenz  $f$ , das sogenannte Leistungsspektrum. Diese Methode kann man sich veranschaulichen, indem man sich ein altes analoges Radiogerät vorstellt, dessen Abstimmknopf man langsam durch das gesamte Frequenzband fährt, während man bei jeder Frequenz die Senderstärke notiert.

Im Fall unseres Schlagzeugvirtuosens fanden wir für dieses Leistungsspektrum  $S$ , dass es die Form eines Potenzgesetzes,  $S \propto 1/f^\alpha$  besitzt, wobei  $\alpha$  eine dimensionslose Zahl der Größe ungefähr gleich eins ist:  $\alpha \approx 1$ . Wäre  $\alpha = 0$ , hätte jede Frequenz die gleiche Intensität. Dann wäre die ursprüngliche Zeitreihe ein »weißes Rauschen«, und alle Signale wären jeweils von früheren Ereignissen vollkommen unabhängig. Für  $\alpha$ -Werte zwischen 0 und 1 fällt der Einfluss einer bestimmten Rhythmusabweichung auf einen Schlag, der eine Zeit  $\tau$  später folgt, ab wie  $\tau^{\alpha-1}$  (mathe-

ANZEIGE

ENCOURAGE. empowering people



## Stadt – Land – Fluss. Zukunftsplanung ist ein Muss!

### Mitmachen beim Schülerwettbewerb 2013 in Mathematik, Naturwissenschaften und Technik!

Die Welt von morgen, wie soll sie aussehen? Wir suchen junge Forscherinnen und Forscher, die mit ihren Ideen zu Nachhaltigkeit, Klima- und Umweltschutz unsere Zukunft mitgestalten wollen.

Teilnehmen können Schülerinnen und Schüler der oberen Jahrgangsstufen in → Deutschland (ab Klasse 10) → Österreich (Oberstufe ab Klasse 6) → der Schweiz (Sekundarstufe II) → sowie der deutschen Auslandsschulen in Europa (ab Klasse 10). Die Besten präsentieren ihre Arbeiten vor Professoren der Partner-Universitäten RWTH Aachen, TU Berlin und TU München.

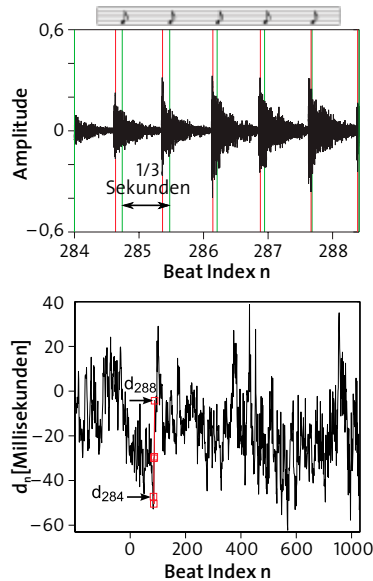
Gewinnen Sie Geldpreise im Gesamtwert von rund 100.000 Euro!

Anmeldeschluss zur Teilnahme: 15. November 2012  
Einsendeschluss für die Arbeiten: 15. Januar 2013

[www.siemens-stiftung.org/schuelerwettbewerb](http://www.siemens-stiftung.org/schuelerwettbewerb)

**SIEMENS** | Stiftung

FOTO: AGBENYEGA ATTIOGBE-REDLICH (WWW.HIPPOCRITZ-SCHOOL.COM), MIT FRODL. GEN. VON HOLGER HENNIG; DIAGRAMME: HOLGER HENNIG, RAGNAR FLEISCHMANN UND THEO GEBEL



## Gefühl für Rhythmus

Ein professioneller Schlagzeuger schlägt eine Handtrommel, während er einem Metronom folgt. Die obere Grafik zeigt fünf Schläge in einem Ausschnitt von zwei Sekunden: den regulären Metronomrhythmus (grüne Linien) sowie die Schläge des Musikers (rote Linien). In der unteren Grafik sind für 1030 Schläge die Abweichungen  $d_n$  vom Metronom aufgezeichnet: Negative (positive) Abweichungen bedeuten Schläge vor (hinter) dem Klick. Der kurze Ausschnitt der oberen Grafik ist in der unteren mit roten Quadraten markiert. Er zeigt, wie der Schlagzeuger von Schlägen vor dem Klick (Beat 284) zu einem Spiel fast auf dem Klick (Beat 288) wechselt.

matisch wird dieser statistische Einfluss beschrieben durch die so genannte Autokorrelationsfunktion,  $C(\tau) \propto \tau^{\alpha-1}$ . Liegt der Wert von  $\alpha$  nahe bei 1, wie bei unserem Schlagzeuger, so schwindet das Gedächtnis also tatsächlich nur sehr langsam; je näher  $\alpha$  bei 1 liegt, umso länger bleibt das Gedächtnis erhalten. Das Gleiche gilt übrigens auch für Werte etwas oberhalb von 1. Fachleute sprechen bei  $\alpha$  zwischen 0 und 2 von langreichweitigen Korrelationen (Long-range Correlations, kurz LRCs).

Diese treten also auf, wenn ein Schlagzeuger seine Schläge mit dem Metronom synchronisiert. Aber dieses tickt ja nun im denkbar einfachsten Rhythmus, so dass sich die Frage stellt, ob solche Korrelationen auch auftreten, wenn Musiker komplexere Rhythmen spielen, wie etwa in zeitgenössischer Pop- und Rockmusik. Wie sich zeigte, traten die LRCs in allen möglichen komplexen Rhythmen auf, egal ob sie nun mit den Händen, Füßen oder der Stimme erzeugt wurden – so lange die Testperson nicht gänzlich aus dem Takt geraten war (Hennig, H. et al., *PLoS ONE* 6, e26457, 2011; <http://dx.plos.org/10.1371/journal.pone.0026457>).

In den 1970er Jahren untersuchten die Physiker Richard Voss und John Clarke von der University of California Tonhöenschwankungen in verschiedenen Musikstücken (etwa in J. S. Bachs Brandenburgischen Konzerten). Dabei stie-

ßen sie ebenfalls auf langreichweitige Korrelationen. Diese liefern einen statistischen Beleg dafür, dass beispielsweise das Ende eines Musikstücks mit vorhergehenden Teilen der Komposition verwoben ist. Dieses Vorhandensein eines melodischen Gedächtnisses leuchtet ein: Während er komponierte, erinnerte sich Bach zweifellos an die Themen und die Entwicklung des gesamten Stückes. Anfang dieses Jahres berichtete zudem der amerikanische Neurowissenschaftler Daniel Levitin, dass er und sein Team LRCs in den Veränderungen der notierten Notenlängen in den Stücken von 40 Komponisten gefunden hätten. Diese und viele weitere Untersuchungen spiegeln die menschliche Vorliebe für eine Balance aus Vorhersagbarkeit und Überraschung in der Musik wider (denn weißes Rauschen kann man als pure Überraschung deuten). Das Gedächtnis, wie es sich in den LRCs abbildet, ist genau richtig, um dieses Gleichgewicht aufrechtzuerhalten.

Was könnte die Ursache unseres Gedächtnisses für Abweichungen von nur wenigen Millisekunden in Musikrhythmen sein? Forscher haben sich schon seit Jahrzehnten mit der Frage beschäftigt, was uns auf einer Zeitskala von Millisekunden ticken lässt, aber die Antwort liegt immer noch weitgehend im Dunkeln. Erstaunlicherweise fehlen LRCs völlig bei solchen Menschen, die beim Musizieren zu häufig den Rhyth-

mus verlieren und mit Hilfe des Metronoms wieder in den Takt finden müssen. Das Fehlen von LRCs könnte seine Ursache im Zurücksetzen des Gedächtnisses in den neurophysiologischen Mechanismen haben, die unser rhythmisches Timing steuern. Es gilt nun, mit weiteren Forschungen die neuronalen Grundlagen aufzuklären, die jene beeindruckende Präzision menschlicher Koordination auf der Zeitskala von Millisekunden ermöglichen. Es gibt dafür verschiedene Modelle, beispielsweise neuronale »Populationsuhren«, in denen sich die Zeit in den dynamischen Aktivitätsmustern eines neuronalen Netzwerks widerspiegelt.

### Musik mit menschlicher Note

Wie eingangs erwähnt wirken computergenerierte Rhythmen oft künstlich und roboterhaft. Aus diesem Grund bietet professionelle Audiosoftware die Möglichkeit, mittels einer »Humanizing«-Funktion, künstliche Rhythmusfluktuationen einzubauen. Diese basieren jedoch auf Zufallszahlengeneratoren, die lediglich unkorrelierte Schwankungen erzeugen. Das Resultat ist ein holpriger Ritt: Ein eher ruckeliger, rumpeliger Rhythmus. Toningenieure fügen daher die Abweichungen auch per Hand, nach Gefühl zu den Rhythmen hinzu. Eine Alternative wäre, die mangelnde Perfektion menschlicher Musik zu imitieren, indem LRCs

# Gesunde Zähne ohne Umwege.



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 1000\*,  
Fax 0180 5 480 1001  
[www.focus-gesundheit.de](http://www.focus-gesundheit.de)

\*0,14 €/Min. aus dem dt. Festnetz.  
Aus dem Mobilnetz max. 0,42 €/Min.

**Spezialisten-Liste:** Deutschlands Experten für Parodontitis, Wurzelbehandlungen, Kieferorthopädie und Implantate.

**Die Wahrheit über Amalgam:** Müssen die Quecksilber-Plomben wirklich alle raus?

**Zähne richtig pflegen:** Was Elektrobürsten, Zahnseide und Mundwässer nützen.

**Zähne ersetzen:** Wann Implantate nötig sind – und was sie kosten.

**Zähne verschönern:** Ein strahlend weißes Lächeln mit Bleaching oder Veneers.

**FOCUS**

Wissen, das hilft. **GESUNDHEIT**



## Wie man soziale Netzwerke manipuliert

Über die Einflussnahme per Internet wird schon eifrig geforscht.

Das Internet ist eine feine Sache. An Stelle mehrbändiger Lexika nutze ich Wikipedia, Briefe schreibe ich nur noch per E-Mail, Zeitschriften lese ich online. Zwar komme ich noch ohne Facebook und Twitter aus, höre aber, dass viele Menschen – darunter auch Berufspolitiker – sich ein Leben ohne elektronisches Dauergeplauder gar nicht mehr vorstellen können.

Die Piratenpartei definiert sich geradezu durch solche Netze. Die von ihr anvisierte »Liquid Democracy« lädt im Prinzip jeden ein, sich über das Internet an einer Mischform von direkter und repräsentativer Demokratie zu beteiligen: Wer immer einen Internetanschluss hat, kann wahlweise Anhänger für eigene Anträge werben oder sich einer im Netz bereits vorhandenen Initiative anschließen.

Um politisch unerwünschte Inhalte zu unterdrücken, steht einem autoritären Staat bislang nur der Holzhammer der Zensur zu Gebote – dann bleibt der Bildschirm eben bei gewissen Themen auffallend leer. Doch feinere Mittel sind bereits in Arbeit. Sie beruhen auf der Erforschung von sozialen Netzwerken, sowohl realen als auch elektronischen; dabei liefern letztere die Daten, um erstere zu manipulieren.

Beispielsweise beschreibt Thomas W. Valente von der University of Southern California in Los Angeles ganz allgemein, wie man soziales Verhalten durch »Netzwerk-Interventionen« am besten beeinflusst (*Science* 337, S. 49 – 53, 2012). Dem Forscher, der am Department of Preventive Medicine arbeitet, geht es zunächst um vorbeugende, gesundheitsfördernde Verhaltensänderungen wie Kondomnutzung oder Impfbereitschaft, also um etwas zweifellos Gutes. Doch die angeführten Tipps und Tricks – Meinungsführer anvisieren, Untergruppen separat bearbeiten, das soziale Netzwerk um passende Neuzugänge erweitern oder es durch Entfernen störender Mitglieder fragmentieren – lassen sich ebenso gut einsetzen, um ein erwünschtes Kaufverhalten zu etablieren oder gegen politische Gegner zu intrigieren. Valente selbst erwähnt als Beispiel außerhalb der Gesundheitsvorsorge nur die Terroristenbekämpfung: Da gelte es, einige Netzteilnehmer in Schlüsselstellungen gezielt auszuschalten, um das Terrornetz insgesamt zu schwächen. Darf man hoffen, dass solche Methoden stets nur der Abwehr echter Gefahren dienen und nicht auch dazu, missliebige Konkurrenten hinterrücks zu erledigen?

Wer soziale Netzwerke manipulieren möchte, will wissen, welche Mitglieder besonderen Einfluss ausüben und welche leicht umzustimmen sind. Diese Frage stellten sich Sinan Aral und Dylan Walker von der Stern School of Business an der New York University (*Science* 337, S. 337–341, 2012). Ihr Interesse galt der Verbreitung von Meinungen über Konsumgüter durch Mundpropaganda – wobei die »Münder« 1,3 Millionen Facebook-Nutzer waren. Die Resultate dürften nicht nur Werbestrategen interessieren: Jüngere sind leichter zu beeinflussen als Ältere, Frauen überreden eher Männer als andere Frauen, und verheiratete Paare lassen sich besonders schwer etwas andrehen. Außerdem: Einflussreiche Individuen neigen zur Clusterbildung mit ihresgleichen – und nichts übt stärkeren Einfluss aus als solche Pressure-Groups.

So sammelt sich anhand unverfänglicher Studien über Krankheitsprävention und Konsumverhalten allmählich ein Knowhow an, das hinter dem Rücken der Nutzer im Internet eingesetzt werden kann – zum Guten wie zum Schlechten, aber in jedem Fall zur unauffälligen Manipulation eines vermeintlich transparenten Mediums.



Michael Springer

Eingang in die Software fänden. Um zu testen, wie vermenschlichte Computermusik auf Zuhörer wirkt, haben wir zusammen mit einem Tonstudio einen Popsong in zwei unterschiedlichen Versionen aufgenommen – eine mit den üblichen unkorrelierten Fluktuationen, die andere unter Berücksichtigung von LRCs. Befragt, was ihnen nun besser gefallen hätte, gaben die Zuhörer deutlich der zweiten Fassung den Vorzug. Sie, die Leser, können das selbst testen; Audiobeispiele inklusive einiger humanisierter Stücke von J. S. Bach haben wir hier eingestellt: [www.nld.ds.mpg.de/~holgerh/gallery](http://www.nld.ds.mpg.de/~holgerh/gallery).

Wir haben auch eine Online-Umfrage entworfen, siehe [www.nld.ds.mpg.de/humanized\\_audio](http://www.nld.ds.mpg.de/humanized_audio). Auf diese Weise möchten wir mehr Daten darüber gewinnen, welche Art musikalischer »Fehler« Hörer bevorzugen. Sowohl Nichtmusiker wie auch Profis sind herzlich eingeladen, daran teilzunehmen.

Unsere Beobachtung von langreichweitigen Korrelationen in den von Menschen gespielten Rhythmen ist typisch für einen aktuellen Ansatz in der Physik. Man untersucht dabei komplexe Systeme mit viel Rauschen und einer zunächst wenig fassbaren Struktur. Im Fall der menschlichen Musikkorrelationen ist das System nicht nur komplex – es ist ein lebendiger Musiker! Gleichwohl lassen sich dahinter mathematische Gesetze finden, die die dem System zu Grunde liegenden Mechanismen enthüllen. Bei unserem Musiker zeigt ein Potenzgesetz einen Aspekt menschlicher Koordination auf.

Irren ist menschlich. Aber ist das nicht Teil der Komplexität und Schönheit menschlicher Aktivität? Ja – vor allem, wenn der Mensch ein richtig guter Schlagzeuger ist.

---

**Holger Hennig** ist Postdoctoral Associate an der Harvard University in Cambridge, Massachusetts. **Ragnar Fleischmann** ist Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Max-Planck-Institut für Dynamik und Selbstorganisation in Göttingen. **Theo Geisel** ist Direktor am gleichen Institut, Professor für Theoretische Physik an der Universität Göttingen sowie Leiter des Bernstein Center für Computational Neuroscience Göttingen.

# herrenhäuser FORUM

Mensch - Natur - Technik

Wie viel kostet ein Regenschauer?  
Wer entscheidet über das Klima der Zukunft?  
Kann Geo-Engineering unsere Erde retten?

Do **11.10.2012 / 19.00 / HANNOVER**

**GEO-ENGINEERING –**

Wem gehört das Wetter?

MIT **Prof. Dr. Werner Aeschbach-Hertig** Institut für Umweltphysik, Universität Heidelberg, **Prof. Dr. Konrad Ott** Professor für Umweltethik, Universität Greifswald, **Prof. Dr. Ulrich Bathmann** Leibniz-Institut für Ostseeforschung, **Dr. Franz May** Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, **Prof. Dr. Sabine Schlacke** Professorin für Öffentliches Recht, Universität Bremen

MODERIERT VON **Dr. Daniel Lingenhöhl** Redaktionsleiter Spektrum Online

VERANSTALTUNGSORT Kleiner Sendesaal, NDR Funkhaus, Hannover

ANMELDUNG [forum@volkswagenstiftung.de](mailto:forum@volkswagenstiftung.de)

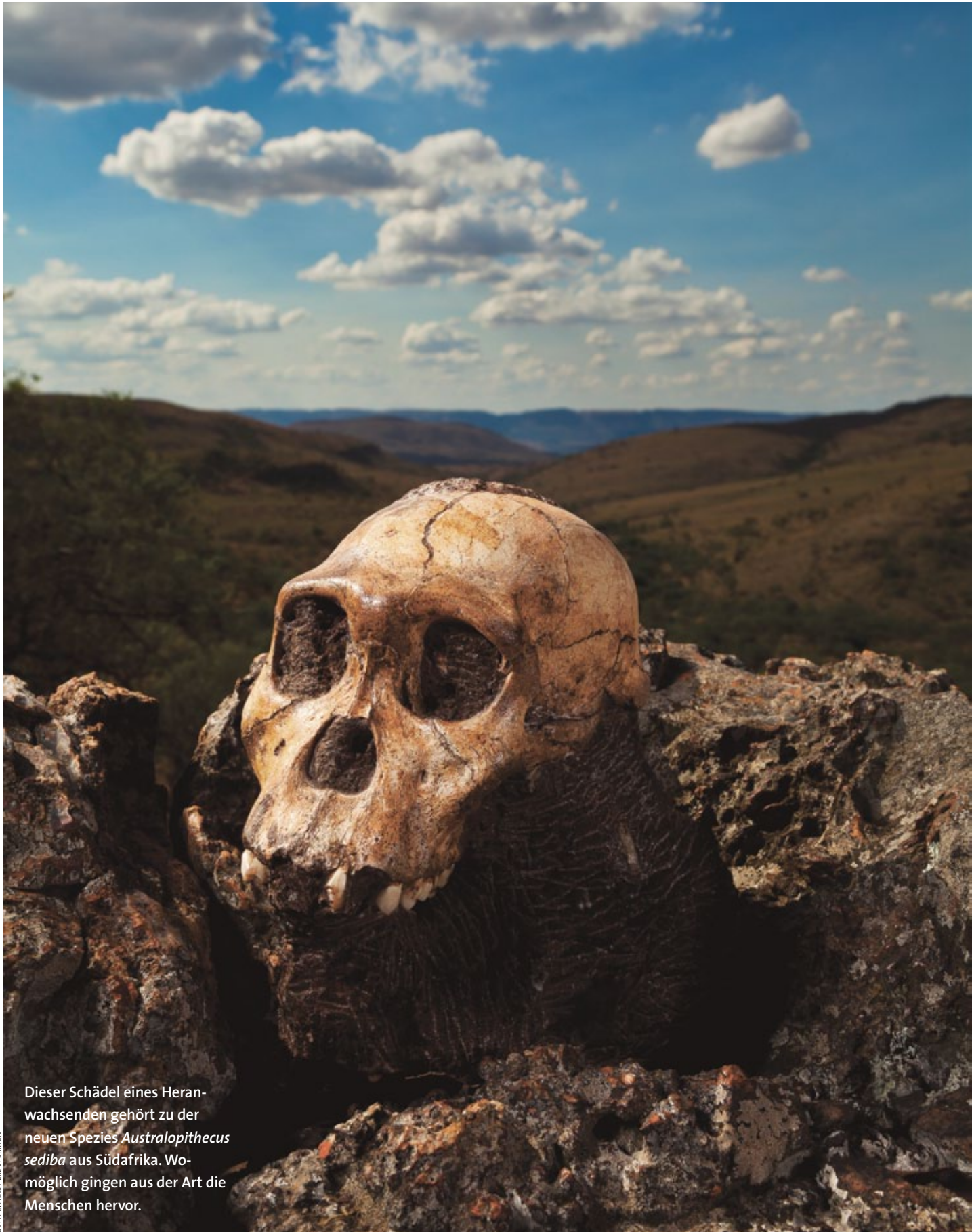
MEHR INFOS [www.spektrum.de/mnt](http://www.spektrum.de/mnt)

Eine Veranstaltungsreihe von



VolkswagenStiftung

**Spektrum**  
DER WISSENSCHAFT



Dieser Schädel eines Heranwachsenden gehört zu der neuen Spezies *Australopithecus sediba* aus Südafrika. Womöglich gingen aus der Art die Menschen hervor.

GETTY IMAGES / BRENT STIRTON



## MENSCHWERDUNG

# Ein neuer Urahn?

Zwei Millionen Jahre alte Skelette aus Südafrika erschüttern das Weltbild der Paläoanthropologen. Über die Bedeutung dieser Überreste aus der Entstehungszeit der Gattung Mensch sind sich die Forscher keineswegs einig – doch der neue Fundort verspricht noch mehr Fossilschätze.

Von Kate Wong

Irgendwann vor zwei bis drei Millionen Jahren bekamen unsere Vorfahren das Aussehen von Menschen. Nach allem, was wir wissen, spielte sich der Übergang in Afrika ab, vermutlich in einer Savannenlandschaft mit weiten Grasfluren, wie sie sich zu der Zeit ausbreiteten. In lichten Wäldern und an Waldrändern hatten damals schon über eine Million Jahre lang ihre Vorgänger gelebt, die Australopithecinen («Südaffen») – darunter auch »Lucy« und ihre Verwandtschaft. Diese Hominiden – noch als Vormenschen bezeichnet – besaßen zwar schon einen aufrechten Gang, erinnerten in vielem aber noch deutlich an Menschenaffen. Sie waren kurzbeinig, hatten lange Arme, große, kräftige Kletterhände und ein ziemlich kleines Gehirn. Doch das Klima wurde trockener, die Vegetation offener, und in Anpassung daran brachten sie neue Evolutionslinien hervor. In einer davon entstanden schließlich langbeinige Wesen mit geschickten Händen und einem viel größeren Gehirn: Die Gattung *Homo* trat in Erscheinung.

Seit Jahrzehnten durchkämmen Paläoanthropologen entlegene Winkel Afrikas nach fossilen Überresten der allerersten Menschen und ihrer unmittelbaren Vorgänger. Sie wurden aber nie richtig fündig, abgesehen vielleicht von einem Kieferbruchstück oder ein paar Zähnen hier und da. Denn die meisten entdeckten Knochenfossilien sind ent-

weder zu alt oder zu jung für die entscheidende Übergangsphase. Das heißt, sie gehören zu den älteren Australopithecinen – oder aber schon zu etwas späteren Frühmenschen. Zusammenhängende Skeletteile aus dem Zeitraum von vor rund zwei Millionen Jahren und ein wenig davor fehlten.

Da die bisher ältesten der Gattung *Homo* zugeschriebenen Fossilien aus Ostafrika stammen und dort zudem eine große Anzahl Knochen von *Australopithecus*-Arten gefunden wurden, postulieren viele Forscher seit Langem, dass der Mensch einst in dieser Region entstand. Sie glauben auch, dass jener Urahn mehr Fleisch gegessen haben muss als seine *Australopithecus*-Vorfahren. In einer Umwelt, die immer weniger Früchte und Nüsse lieferte, vermochte er sich damit energiereich zu ernähren. Im Dunkeln liegt allerdings nach wie vor, aus welcher Linie der Australopithecinen sich der Mensch entwickelte und wie der Wandel vonstattengegangen sein mag.

Nun glaubt Lee Berger, Paläoanthropologe an der University of the Witwatersrand in Johannesburg (Südafrika), ein großes Puzzleteil des Rätsels präsentieren zu können. Nach Ansicht von ihm und seinem Forscherteam stellen die seit 2008 ein Stück nördlich der Stadt entdeckten zwei Millionen Jahre alten Hominidenfossilien das herkömmliche Bild vom menschlichen Ursprung womöglich auf den Kopf. Kollegen aus aller Welt reisen an, um die Funde selbst in Augenschein zu nehmen, seit die Forschergruppe 2010 die ersten Arbeiten dazu veröffentlichte.

Gespannt sieht Berger zu, wie sein amerikanischer Gast, Bernard Wood von der George Washington University der US-Hauptstadt Washington, vor vier auf einem Tisch aufgereihten, mit Schaumstoff ausgepolsterten Plastikboxen hin- und hergeht und den Inhalt in Augenschein nimmt. In der ersten Kiste liegen Becken- und Beinknochen, in der nächsten Rippen und Wirbel. Die dritte enthält Armknochen und ein Schlüsselbein, die vierte einen Schädel – alles Überreste desselben Individuums, eines großen Jungen, der schätzungsweise einem heutigen Zwölf- oder Dreizehnjährigen entspräche. Gegenüber stehen mehr Kisten mit Teilen eines zweiten Skeletts, dabei ein Arm und fast alle Knochen der zu-

## AUF EINEN BLICK

### WIE VERLIEF DER WEG ZUM MENSCHEN?

**1** Der **Ursprung der Gattung *Homo*** zählt zu den größten Rätseln der menschlichen Evolution. Viele halten **Ostafrika** für die maßgebliche Region und glauben, dass der *Homo habilis* dort aus der Vormenschenart *Australopithecus afarensis* hervorging.

**2** **Neue Fossilien aus Südafrika**, von der Malapa-Höhle bei Johannesburg, stellen das in Frage. Sie stammen direkt aus der Übergangsphase vor zwei Millionen Jahren und zeigen ein **Mosaik alter und neuer Merkmale**.

**3** Die Entdecker nannten die neue Art *Australopithecus sediba*. Ob von ihr die **Menschengattung *Homo*** abstammt, ist allerdings heiß umstritten.

gehörigen Hand. Diese Fossilien stammen von einer Frau mittleren Alters (Bild S. 27).

Vor dem Schädel des Jungen mit der nur pampelmusengroßen Hirnschale und den schlanken Zähnen hält Wood schließlich inne, kratzt seinen Bart und beugt sich tiefer hinab. Als er sich wieder aufrichtet, schüttelt er den Kopf und murmelt: »Ich bin selten um Worte verlegen. Aber das hier – wow! Einfach wow!«

Berger grinst. Diese Reaktion kennt er schon von anderen Forscherbesuchen. Seine Mitarbeiter und er ordnen die beiden Skelette einer neuen Art zu, die sie *Australopithecus sediba* nennen (»sediba« heißt in einer einheimischen Sprache »Urquell«). Diese Fossilien vereinen in bisher nicht gekannter Manier Altes und Neues, nämlich Kennzeichen der Gattung *Australopithecus* mit solchen, die schon auf die Gattung *Homo* weisen. Darum mutmaßt das Team, es könne sich tatsächlich um einen unmittelbaren *Homo*-Vorfahren handeln. Zu den herrschenden Vorstellungen passt das alles allerdings ganz und gar nicht.

Ortstermin: Wir fahren auf einer Schotterstraße durch das John-Nash-Reservat 40 Kilometer nordwestlich von Johannesburg, um uns herum Giraffen, Gnus und Warzenschweine. Scheinbar mitten im Nirgendwo hält Berger an und deutet auf eine rechts abbiegende schmalere Piste. 17 Jahre lang ist er hier unzählige Male vorbeigefahren – zur nur

wenige Kilometer entfernten Gladysvale-Höhle, in der er damals Ausgrabungen durchführte. Rund acht Kilometer weiter liegen die für ihre Hominidenfossilien berühmten Höhlen von Sterkfontein und Swartkrans, wo auch der Paläontologe Robert Broom (1866–1951) in den 1930er und 1940er Jahren arbeitete.

### Für Überraschungen gut: Ein verlassener Steinbruch

Ende der 1940er Jahre hatten zwei amerikanische Paläontologen die Gegend der Gladysvale-Höhle auf Anweisung Brooms in Augenschein genommen. Die beiden Forscher wollten dort nach Fossilien von Früh- und Vormenschen, zusammen Homininen genannt, suchen. Sie fanden aber nichts Interessantes, weswegen sie argwöhnten, man habe sie absichtlich ins Leere laufen lassen.

Berger ahnte nicht, dass ganz in der Nähe ein Sensationsfund zu machen war – nämlich an dieser Piste, einem Fuhrweg zu einem der vielen kleinen Steinbrüche, von denen sich Johannesburg Anfang des 20. Jahrhunderts Baumaterial beschafft hatte.

Zwar hielt es Berger schon zuvor durchaus für möglich, dass die ersten Menschen nicht in Ost-, sondern in Südafrika lebten, denn auch von dort stammen viele wichtige Funde von Australopithecinen, und es kommen immer wieder



ALLE DREI FOTOS: GETTY IMAGES / BRENT STIRTON



neue hinzu. Nur sind aufschlussreiche Fossilien aus jener Zeit so extrem rar, dass er selbst eigentlich nicht mit solch einer Entdeckung rechnete – zumal die Vormenschen dieser Region seit Langem zu Seitenzweigen im Menschenstammbaum gezählt werden. Immerhin bezeichnet die UNESCO die Gegend bei Johannesburg seit 1999 als »Cradle of Human-kind« (Wiege der Menschheit) und ernannte die berühmten Höhlen mit ihren vielen bemerkenswerten Hominidenfossilien zum Welterbe. Doch in der Gladysvale-Höhle fand Berger neben vielen Tierfossilien nur einige eher unspektakuläre Stücke von Australopithecinen.

Der Paläoanthropologe und seine Mitarbeiter befassten sich daher damit, das Alter der Höhlenablagerungen genauer zu bestimmen. Die zeitliche Einordnung der südafrikanischen Hominidenfunde befand sich seit jeher im Argen, was ihre Eingliederung in den menschlichen Stammbaum erheblich behinderte. In Ostafrika liegen die Fossilien zwischen Schichten vulkanischer Asche. Weil man deren Alter mit heutigen Messverfahren gut ermitteln kann, lässt sich auch das der Knochen ziemlich exakt eingrenzen. Die Höhlen der »Wiege der Menschheit« bildeten sich dagegen in Dolomitstein, einem Karbonatgestein, das einst aus Korallenriffen eines warmen, flachen Meeres hervorgegangen war. Es gelang Bergers Team, verlässliche Messmethoden zur Altersbestimmung zu finden – was ihm später sehr zupasskommen sollte.

Unter anderem verwenden die Forscher für die Gesteine die so genannte Uran-Blei-Datierung, die auf dem radioaktiven Uranzerfall basiert, und kombinieren sie mit Daten von Um-polungen des Erdmagnetfelds. Auch die vielen begleitenden Tierfossilien werden berücksichtigt.

### Finderglück dank Sohn und Hund

Am 1. August 2008 fuhr Berger das Naturreservat nach möglichen neuen Fossilstätten ab, die er über »Google Earth« ausgemacht hatte. Diesmal bog er in die erwähnte Piste ein – und kam zu einem ungefähr drei mal vier Meter großen Loch im steinigen Untergrund, das frühere Sprengungen hinterlassen hatten. Als er den Ort kurz inspizierte, sah er einige Tierfossilien. Die Stelle erschien ihm lohnend genug, um wiederzukommen, was er am 15. August tat. Mit von der Partie waren sein neunjähriger Sohn Matthew und ihr Hund. Das Tier lief ins Gebüsch, der Junge hinterher – und ein paar Minuten später hörte der Vater ihn rufen: »Ich habe ein Fossil gefunden!« Gutwillig stapfte Berger hinüber – sicherlich handelte es sich einfach um einen dicken Antilopenknochen. Aber was da im hohen Gras neben einem vom Blitz getroffenen toten Baum aus einem schwärzlichen losen Gesteinsbrocken ragte, war das Ende eines Schlüsselbeins. Berger begriff augenblicklich, dass das Fossil von einem Hominiden herrührte.



Lee Berger (links) und Mitarbeiter Meskack Kgasi in der Malapa-Höhle, dem Fundort der *Australopithecus-sediba*-Skelette. Solche bei früherer Gesteinsgewinnung herausgesprengten Sedimentblöcke voller Fossilien (oben) gibt es in Malapa zuhauf. Zunächst sollen sie auf Knochen hin durchleuchtet werden. Das rechte Bild zeigt das von Tälern durchzogene Gebiet um Malapa bei Johannesburg aus der Luft.





In der Grube selbst, also keine 20 Meter weiter, fanden er und seine Mitarbeiter im Verlauf der nächsten Wochen und Monate noch mehr Skeletteile desselben Individuums: des großen Jungen, der später den Namen »Karabo« (Antwort) erhielt. Und ganz dicht daneben tauchten Stücke eines zweiten Hominidenskeletts auf: jenes der Frau. Bisher hat das Forscherteam über 220 Knochen von *Australopithecus sediba* gefunden – mehr, als es vom frühen *Homo* derzeit insgesamt gibt. Sie stammen offenbar von insgesamt sechs Individuen. Nach dem Lesothowort für Heimstätte nannte Berger die Stelle Malapa. Es gelang auch, das Alter dieser Fossilien bemerkenswert genau zu bestimmen. Sie sind demnach 1,977 Millionen Jahre alt – mit einer Ungenauigkeit von höchstens 2000 Jahren nach oben und unten.

### Ein unpassendes Sammelsurium als Herausforderung an die Forscher

Dass von *A. sediba* so viele Skelettelemente vorhanden sind, erlaubt einen einzigartigen Blick auf die Frühzeit der Menschwerdung – und zwar darauf, in welcher Reihenfolge die typisch menschlichen Merkmale entstanden sein könnten. Diese Fossilien besagen nämlich, dass manche der neuen Merkmale nicht zwangsläufig gemeinsam auftraten, anders als bisher vermutet. Beispielsweise glaubten Anthropologen, bestimmte Umgestaltungen der Beckenform würden nicht nur Anpassungen an ein besseres aufrechtes Gehen darstellen, sondern zugleich eng mit der notwendigen Größe des Geburtskanals zusammenhängen, weil die Kinder einen größeren Kopf hatten. Doch *A. sediba* besaß ein in der Form in manchem eher *Homo*-artiges Becken, und dennoch hatte die Art noch ein kleines Gehirn. Mit 420 Kubikzentimetern maß es gerade ein Drittel von unserem.

Auch im Kleinen scheinen manche Merkmalskombinationen nicht recht zueinander zu passen. So ergab die Durchleuchtung des Schädels von dem Jungen trotz des kleinen Gehirns ausgeprägte Strukturen im Stirnhirnbereich, als ob die Hirnrinde stellenweise schon weiter entwickelt war als sonst bei Australopithecinen (siehe Bild S. 30). Das erwachsene weibliche Individuum hatte die langen Arme der baumlebenden Vorfahren, dabei allerdings recht kurze Finger mit einem langen Daumen, die sich vielleicht zum Benutzen und Herstellen von Werkzeug eigneten. Gleichzeitig waren dies den Muskelansätzen zufolge offenbar kräftige Kletterhände. Teilweise verblüfft das Nebeneinander von Alt und Neu derart, dass viele Forscher einzelne Knochen sicherlich verschiedenen Hominidenarten zugeordnet hätten, wären sie nicht im Skelettverbund gefunden worden. Die Füße stellen ebenfalls so ein Mosaik dar: Nach Bernard Zipfel von der University of the Witwatersrand, einem Mitarbeiter des Malapa-Teams, wirkt das Fersenbein von *A. sediba* wie das eines Menschenaffen, das Sprungbein wie das eines Menschen.

Berger meint, die Paläoanthropologen sollten hieraus ihre Lehren ziehen und isoliert gefundene fossile Knochen nicht zu schnell zuordnen. Er wäre selbst in die Irre gegangen – hätte zum Beispiel das Becken von *A. sediba* einem *Homo erectus*

zugesprochen, den Arm ohne die Hand einem Menschenaffen, aber das Sprungbein einem modernen Menschen. Seiner Ansicht nach könne man nun zum Beispiel nicht mehr sicher sein, ob etwa ein 2,3 Millionen Jahre alter Oberkiefer, der im äthiopischen Hadar zum Vorschein kam und manchen als eines der ältesten Zeugnisse unserer Gattung *Homo* gilt, wirklich der menschlichen Linie zuzurechnen ist.

Abgesehen von den vereinzelt, wenigen Funden aus derart frühen Phasen, die schon Menschen zugeschrieben werden – so auch ein fast zweieinhalb Millionen Jahre alter Unterkiefer aus Malawi, den Friedemann Schrenk vom Forschungsinstitut Senckenberg und der Universität Frankfurt fand –, wären die neuen südafrikanischen Fossilien einerseits älter als alle anderen gut datierten *Homo*-Überreste, zugleich aber jünger als die Fossilien von *Australopithecus afarensis*. Unter den Anwärtern auf den unmittelbaren *Homo*-Vorfahren stünde *A. sediba* laut Bergers Team in dem Fall ganz vorn. Landläufig gilt derzeit die ostafrikanische Art *A. afarensis* als Stammform des *Homo habilis*, aus dem dann der *Homo erectus* hervorgegangen sein soll – der heute nach einer anderen systematischen Einteilung als *Homo ergaster* bezeichnet wird. Die Forscher um Berger halten es dagegen für möglich, dass *A. sediba* mit seinen teilweise fortschrittlichen Merkmalen in der Evolutionslinie zum *Homo erectus* / *ergaster* stand. *A. sediba* wiederum könnte von der südafrikanischen Art *A. africanus* abstammen. Falls dieses Szenario zuträfe, würde der *Homo habilis* in einen Seitenzweig verwiesen (siehe Grafik S. 28/29).

Unter Umständen verlöre sogar *A. afarensis* die ihm bisher zugewiesene zentrale Stellung als Ahn aller späteren Vormenschen – einschließlich *A. africanus* – sowie des Menschen. Berger hebt hervor, dass die Ferse von *A. sediba* ursprünglicher gebaut war als die von *A. afarensis*. Das mag eine Rückentwicklung gewesen sein. Genauso gut aber könnte dieses Merkmal die Herkunft aus einer anderen, noch nicht entdeckten Evolutionslinie bezeugen, zu der weder *A. afarensis* noch *A. africanus* gehörten.

»Wo ich herkomme, heißt es: Man tanzt mit dem Mädchen, das man mitgebracht hat«, witzelt Berger, der in den USA auf einer Farm in Georgia aufwuchs. »Das machen im Grunde Forscher nicht anders.« Viele würden die Herkunft des Menschen von den ostafrikanischen Fossilien herzuleiten versuchen, einfach weil sie die haben und dort arbeiten. Vor diesem Hintergrund galten bislang die ältesten Fossilien aus Südafrika als Zeugnisse eines eigenen, fehlgeschlagenen Evolutionsexperiments. Nun aber, so Berger, könnte sich das Geschehen ganz anders darstellen.

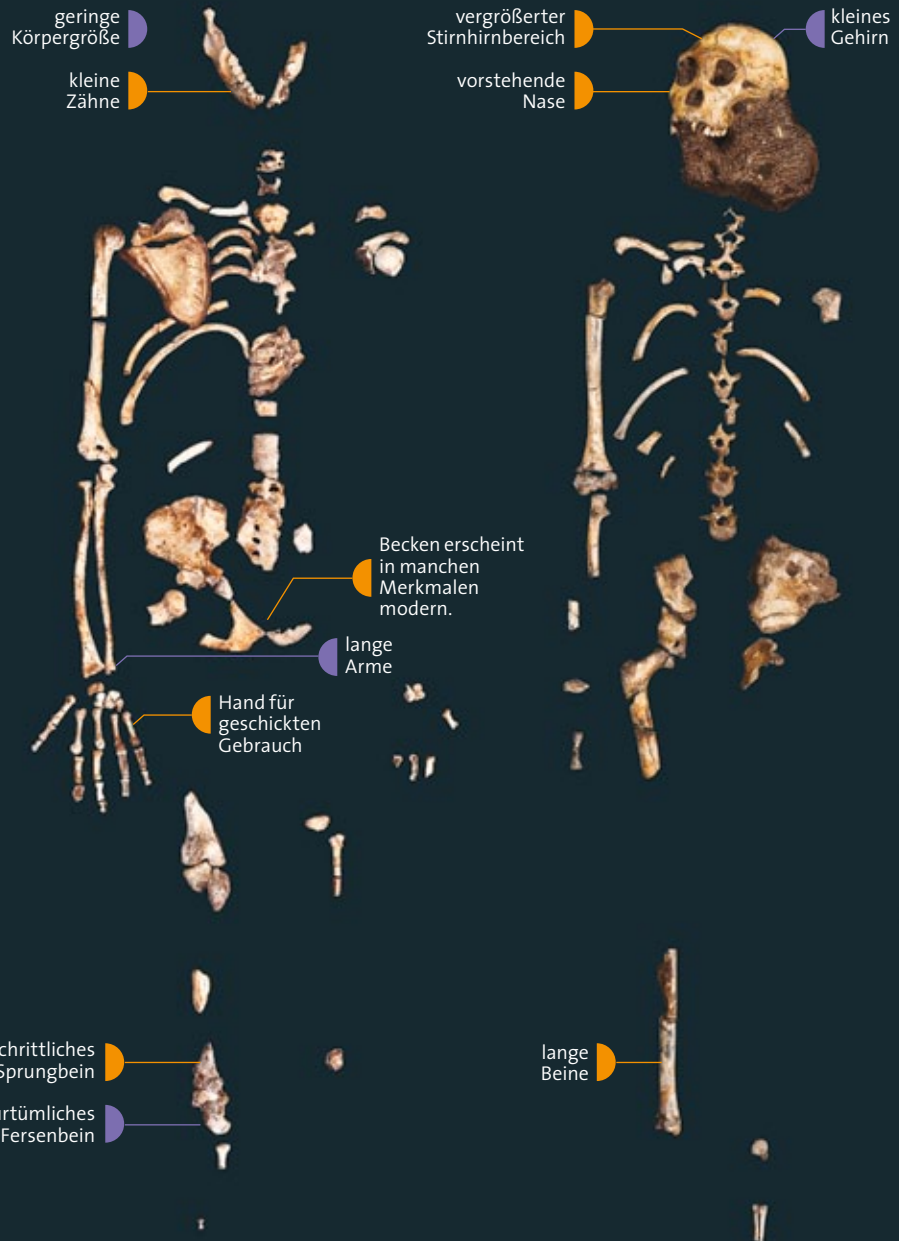
Solche Ideen weist William Kimbel von der Arizona State University in Tempe bei Phoenix vehement zurück. Unter seiner Leitung fanden Forscher in Äthiopien den erwähnten 2,3 Millionen Jahre alten Oberkiefer. Kimbel hält es für unsinnig, dass man ein Fundstück nur im Zusammenhang mit einem Skelett korrekt klassifizieren könne. Es genüge, wenn das Fossil selbst aussagekräftige Merkmale habe. Der Hadar-Kiefer stamme eindeutig von einem Vertreter der Menschen-

# Mosaikrätzel

Die beiden Skelette von *Australopithecus sediba* verblüffen wegen der Vermischung urtümlich und fortschrittlich erscheinender Merkmale. Manches passt zu einem Australopithecinen, anderes zur Gattung *Homo*. Nach Ansicht der Entdecker könnte das bedeuten, dass typisch menschliche Charakteristika nicht im Verbund entstanden sein müssen.

erwachsene Frau

fast ausgewachsener Junge oder Jugendlicher



*Homo erectus*

*Australopithecus africanus*

*Australopithecus sediba*



GETTY IMAGES / IRENE STIRTON

gattung, was unter anderem die Parabelform der Zahnreihen beweise. Kimbel hat die Malapa-Fossilien gesehen, allerdings nicht eingehend untersucht. Deren menschenähnliche Merkmale findet er zwar faszinierend, weiß sich aber noch keinen Reim darauf zu machen. Dass dies ein *Homo-erectus*-Vorfahr gewesen sein soll, lehnt er entschieden ab. Nur weil ein Taxon einige wenige, scheinbar passende anatomische Besonderheiten zeige, dürfe man es nicht gleich für die Menschenevolution bemühen – zumal einige Fossilien aus Ostafrika mehrere hunderttausend Jahre älter seien und schon eindeutig der Gattung *Homo* zugeordnet werden können.

### Doch zu primitiv für einen Kandidaten?

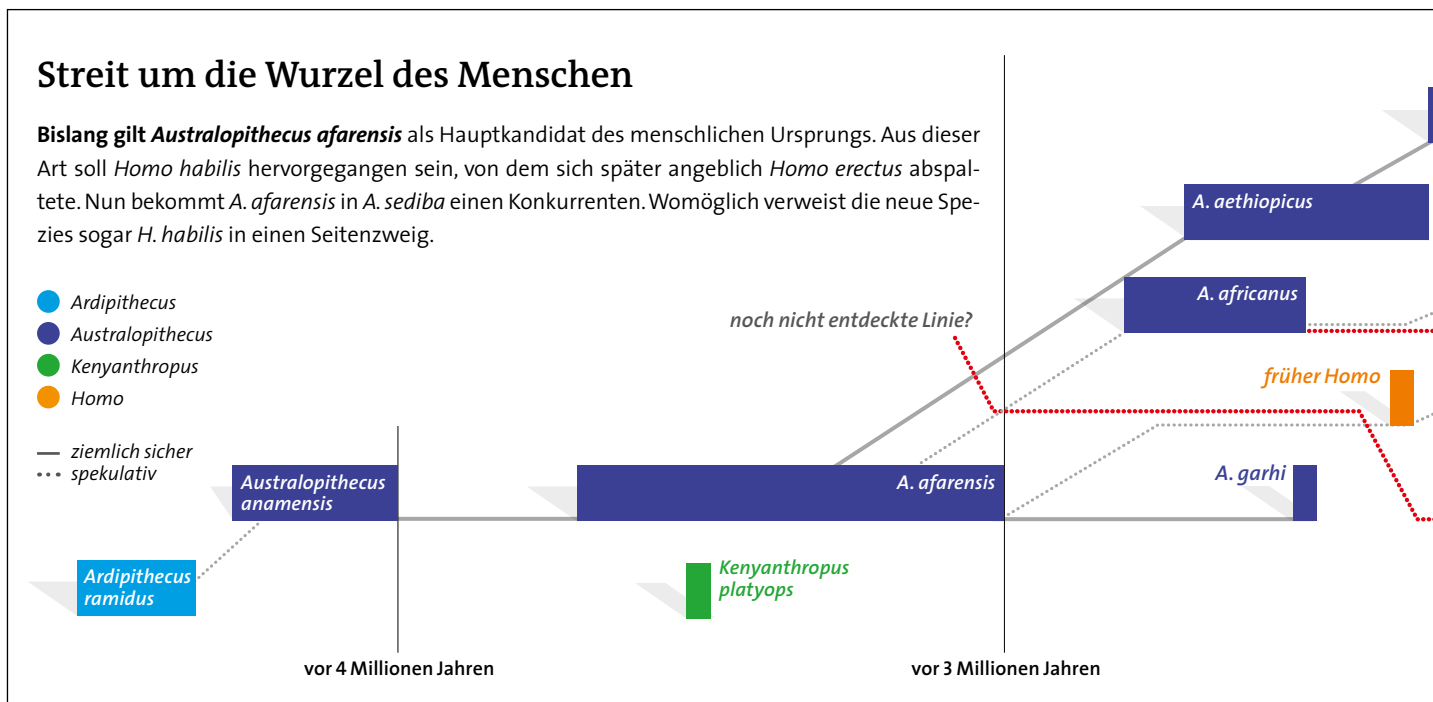
Mit dieser Kritik steht Kimbel nicht allein. »Zu vieles passt einfach nicht zusammen, vor allem nicht Zeit und Ort«, kommentiert etwa Meave Leakey vom Turkana Basin Institute in Kenia, die an ostafrikanischen Fossilien forscht und selbst schon bedeutende Funde gemacht hat. Viel wahrscheinlicher stellten die südafrikanischen Hominiden eine separate Formengruppe mit eigener lokaler Geschichte dar.

René Bobe von der George Washington University stört sich ebenfalls am zu jungen Alter der Malapa-Fossilien. Seines Erachtens wäre *A. sediba* als Menschenvorfahr in Betracht gekommen, hätte die Art eine halbe Million Jahre früher gelebt. Doch für die Zeit vor gerade einmal zwei Millionen Jahren seien diese Primaten im Ganzen einfach noch zu primitiv gewesen, als dass von ihnen jene kaum jüngeren Hominiden vom Turkanasee in Kenia hätten abstammen können, deren Fossilien viel mehr eindeutig menschliche Züge aufweisen. Auch Bobe kritisiert, dass die Forscher zu bereitwillig ihre eigenen Fossilien ins Zentrum stellen. Nur meint er damit seine Johannesburger Kollegen.

Bernard Wood stimmt Berger in einem Punkt zu: Von den *A. sediba*-Fossilien könne man lernen, dass sich anhand einer einzelnen Knochenpartie nicht auf das Aussehen des übrigen Körpers schließen lässt. Offenbar seien in der Hominidenevolution mehr Merkmalskombinationen vorgekommen als bisher bekannt. Allerdings hält auch Wood die neue Art nicht für einen Menschenvorfahren. Die paar Kennzeichen, die dafür sprechen könnten, mögen unabhängig in einer eigenen Evolutionslinie aufgetreten sein. Denn *A. sediba* hätte sich viel zu sehr anstrengen müssen, um einen *Homo erectus* hervorzu- bringen.

Die Einordnung der neuen Art in den Stammbaum wird dadurch erschwert, dass eine unanfechtbare Definition der Gattung *Homo* bisher nicht existiert: also eine Charakterisierung der entscheidenden anatomischen Kennzeichen, in denen frühe Menschen anders waren als Australopithecinen. Hierüber Klarheit zu gewinnen, ist deswegen so problematisch, weil es von der Übergangsphase allzu wenig Fossilien gibt, und die meisten davon sind zudem nur Bruchstücke. Gerade darum bestehen für die ziemlich vollständigen Skelette von Malapa nicht ausreichend Vergleichsmöglichkeiten. »Vielleicht zwingt uns nun *A. sediba* zu einer Definition«, meint Berger.

Wie auch immer – die neuen südafrikanischen Funde erscheinen geeignet, die bisher genauesten Vorstellungen von einem Hominiden aus der Frühzeit der Menschenevolution zu liefern, schon weil Forscher in Malapa gleich von einem halben Dutzend Individuen Fossilien geborgen haben und eine Reihe weiterer zu finden erwarten. Am vollständigsten sind derzeit die beiden erwähnten Skelette eines männlichen Jugendlichen und einer Frau, aber außerdem fanden sich wie gesagt Überreste von vier weiteren Individuen, darunter sogar welche von einem kleinen Kind.





Nur äußerst selten stoßen Paläoanthropologen gleich auf mehrere Vertreter derselben Population. Überdies sind die Fossilien ungewöhnlich gut erhalten, selbst manche besonders zarten Knochen, die sonst eigentlich nie überdauern: etwa ein hauchfeines Schulterblatt, eine spandünne erste Rippe, erbsenkleine Fingerknöchel, Wirbel mit intakten Dornfortsätzen.

Etliche Knochen gibt es nun erstmals als Ganzes und im Verbund mit anderen. Zum Beispiel stand den Forschern noch nie ein komplettes vormenschliches Armskelett zur Verfügung, nicht einmal von der berühmten »Lucy«. Die Rückschlüsse über ihre Fortbewegungsweise beruhen auf Schätzungen, denn wichtige Abschnitte ihrer Arm- und Bein-knochen fehlen. Von der Malapa-Frau existiert dagegen eine ganze Vorderextremität samt Schulterblatt und Hand, nur ein paar Knöchelchen vom Handgelenk und das letzte Glied von mehreren Fingern fehlen. Berger erwartet, dass viele der vermissten Stücke sowie die restlichen Skeletteile noch auftauchen werden, wenn die eigentlichen systematischen Grabungen beginnen und auch das Innere der eingesammelten Gesteinsbrocken untersucht wird.

Denn bisher hat das Team lediglich aus Gesteinsoberflächen herausragende Fossilien frei gelegt. Von dem Gesamtmaterial erhoffen sich die Forscher Aufschluss über vielerlei, vom Wachstum der Kinder und ihrer Reifung über die Fortbewegungsarten in ihrem Lebensraum bis hin zur individuellen Variabilität. Anscheinend sind die Erwartungen der Forscher nicht übertrieben: In diesem Juli verlautete, dass ein jetzt durchleuchteter Gesteinsbrocken Skeletteile zu enthalten scheint, die mutmaßlich ebenfalls zu dem Jungen gehören.

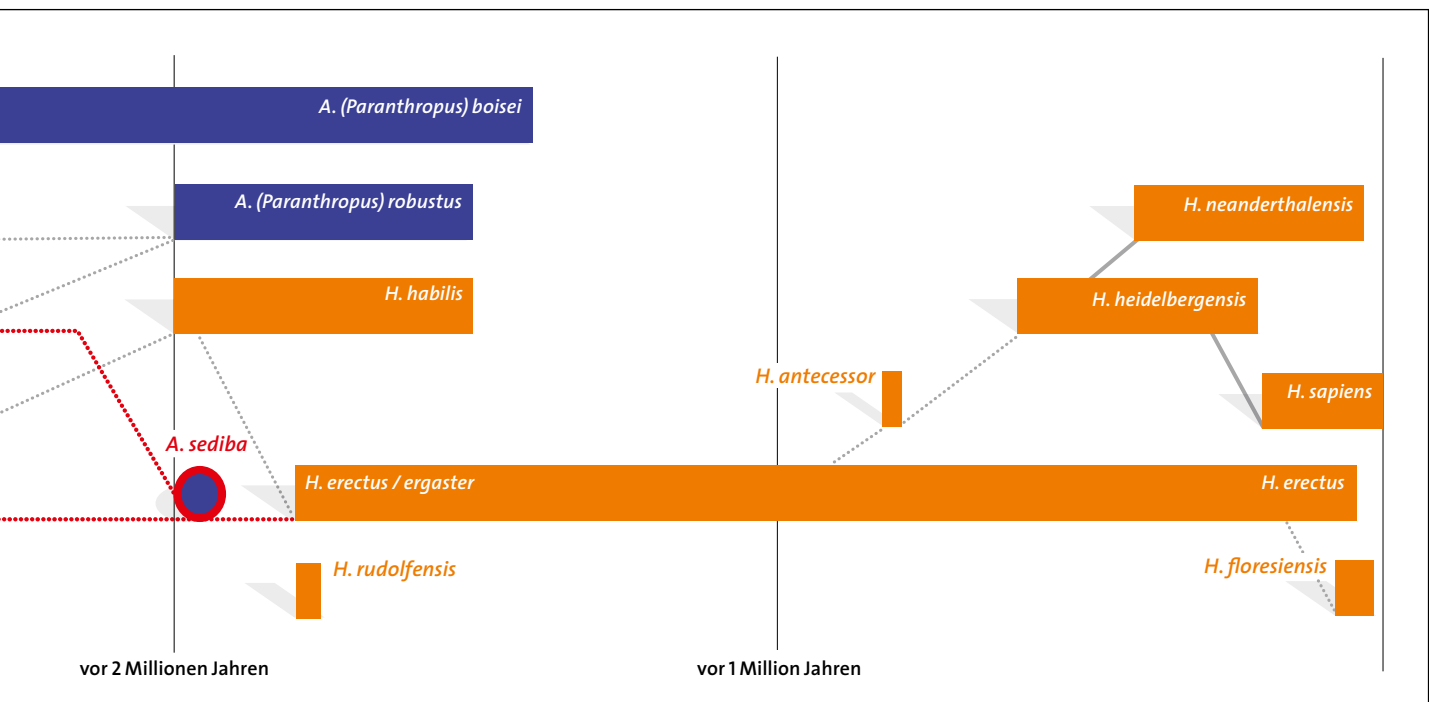
Womöglich halten die Funde sogar noch mehr bereit als versteinerte Knochen, nämlich Überreste von Fleisch und

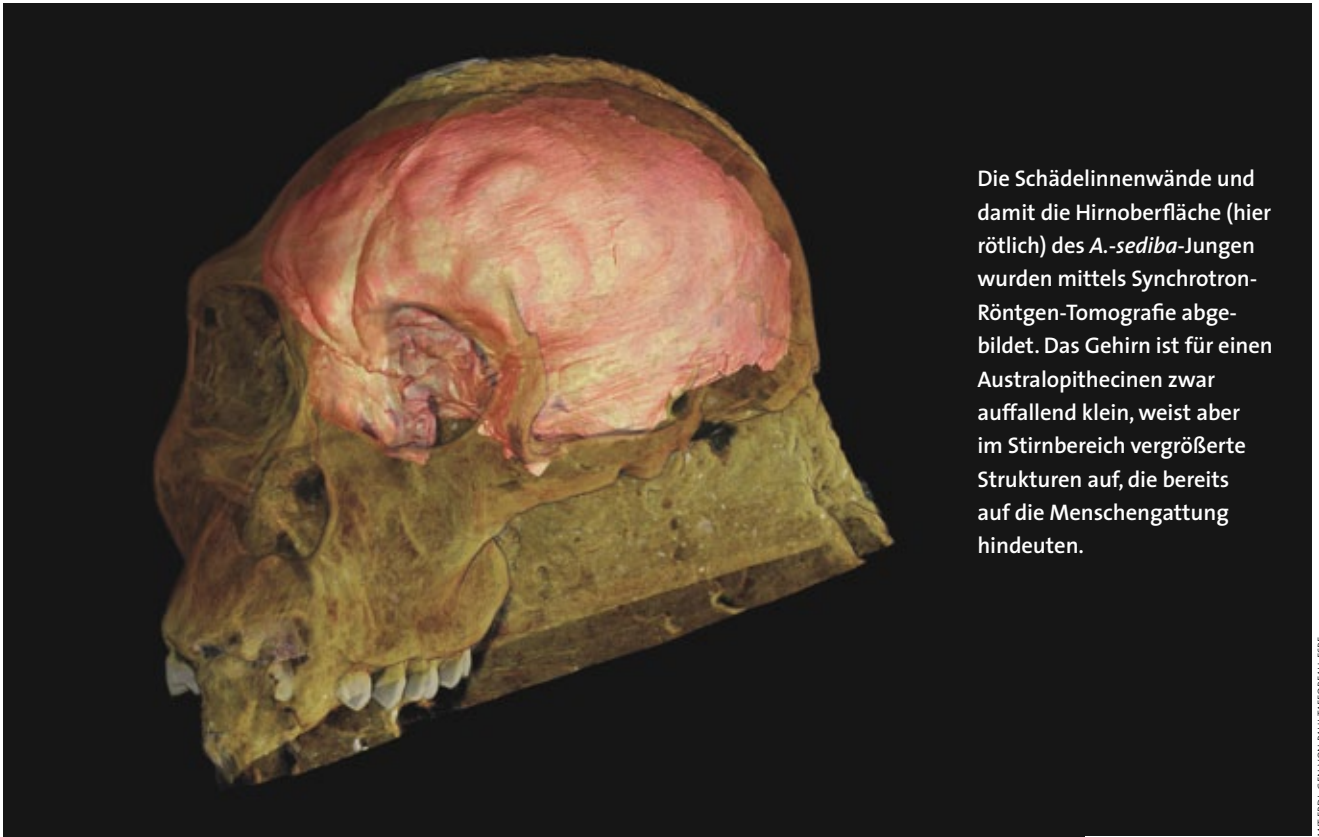
Blut. So etwas hielten Paläoanthropologen früher für unmöglich. Sie glaubten, dass außer den mineralisierten Knochen, die mit der Zeit fossilisieren, alles übrige organische Material – wie Haare, Haut und innere Organe – bald spurlos verschwindet. Doch auf einem Computertomogramm vom Schädel des Jungen fiel Berger oben am Kopf ein schmaler scheinbarer Hohlraum zwischen der Oberfläche des Fossils und der tatsächlichen Knochenkontur auf. Unter dem Mikroskop erinnert die Stelle an Strukturen von Haut. Eingehende Untersuchungen sollen das nun klären. Am Kinn der Frau gibt es etwas Ähnliches, ebenso an manchen Antilopenknochen vom Fundort.

### Auf der Suche nach Haut und Haar

Im Idealfall ließen sich Haut- und Haarfarbe dieser späten Vormenschen ermitteln und sogar Dichte und Verteilung ihrer Behaarung sowie der Schweißdrüsen. Daraus könnte man erschließen, ob diese Primaten stark genug schwitzen konnten, um längere Strecken oder bei Hitze zu rennen. Eine gute Herabregulierung der Körpertemperatur war in der Menschenevolution eine wichtige Voraussetzung für ein großes Gehirn, weil dieses Organ nicht zu warm werden darf.

Sollten sich tatsächlich noch Reste organischen Materials finden, lassen sich womöglich sogar DNA-Spuren entdecken. Die bisher ältesten sequenzierten Erbsequenzen von Homi-niden stammen aus 100 000 Jahre alten Neandertalerknochen. Die Malapa-Fossilien sind zwar wesentlich älter, aber wegen ihres guten Zustands hegt Berger einige Hoffnung, dass sich DNA-Fragmente erhalten haben. Die Forscher fragen sich, ob die beiden Skelette zu Mutter und Sohn gehören und ob auch die anderen Individuen in näheren Verwandtschaftsbezie-





Die Schädelinnenwände und damit die Hirnoberfläche (hier rötlich) des *A. sediba*-Jungen wurden mittels Synchrotron-Röntgen-Tomografie abgebildet. Das Gehirn ist für einen Australopithecinen zwar auffallend klein, weist aber im Stirnbereich vergrößerte Strukturen auf, die bereits auf die Menschengattung hindeuten.

MIT FRIEDRICH VON PAUL THORFAU, ESF

hungen standen. Ein Erfolg mit solchen Studien würde sicherlich die gesamte Wissenschaftlerszene anregen, Funde aus anderen Regionen daraufhin zu untersuchen. Das langfristige Ziel wäre, die stammesgeschichtlichen Beziehungen der einzelnen Hominidenarten genetisch abzuklären.

Ganz unsinnig sind solche Ideen nicht – auch wenn es sehr stichhaltiger Beweise bedürfen wird, um die Fachwelt davon zu überzeugen, dass mehrere Millionen Jahre alte Fossilien noch organische Reste aufweisen können. Für die *A. sediba*-Funde verlaufen die bisherigen Untersuchungen viel versprechend. Und schließlich glauben andere Forscher, bei mit 67 und 80 Millionen Jahren noch wesentlich älteren Dinosaurierknochen Hinweise auf organische Strukturen gefunden zu haben (siehe »Blutspuren aus der Kreidezeit«, Spektrum der Wissenschaft 6/2011, S. 32). Berger hält es sogar für möglich, dass bei vor- und frühmenschlichen Fossilien noch ziemlich oft organische Reste erhalten sind. Auf den Gedanken sei bislang nur noch niemand gekommen.

Ebenso wenig haben sich Paläoanthropologen bis vor Kurzem für Zahnstein interessiert. Auf den Backenzähnen des Jungen von Malapa sitzen dunkle bräunliche Flecken. Präparatoren pflegen solche Ablagerungen zu entfernen, wenn sie Fossilien für wissenschaftliche Analysen aufbereiten. Doch Berger fragte sich, ob dies die gleiche Substanz ist wie bei uns – und ob sie etwas über die Ernährung damals erzählen könnte. Denn im Zahnstein, der aus Zahnbelag und Kalziumeinlagerungen aus Speichel entsteht, stecken winzigste im Mund verbliebene Essensreste – wie die Anthropologin

Amanda Henry kürzlich an Neandertalerzähnen nachwies. Inzwischen hat sie sich am Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig Zähne von *A. sediba* vorgenommen.

Für molekulare Untersuchungen zur Ernährungsweise einer Art und zu ihren Veränderungen während der Menschenevolution musste bisher oft das Zahnmaterial selbst herhalten. So liefert das Verhältnis zweier stabiler Kohlenstoffisotope im Zahnschmelz Hinweise, welche von zwei Pflanzenkategorien jemand vorwiegend verzehrt hat, beziehungsweise wie sich gegessene Tiere ernährten. Die so genannten C3-Pflanzen betreiben in Anpassung an den Lebensraum eine andere Art der Fotosynthese als die C4-Pflanzen, was sich in den angereicherten Kohlenstoffisotopen niederschlägt.

Zur ersten Kategorie gehören grob gesagt viele Blatt- und Früchte tragende Arten der Wälder und feuchterer Standorte. C4-Pflanzen sind allgemein recht trocken- und hitzeresistent. Zu ihnen zählen in den Tropen insbesondere widerstandsfähige Gräser. Nach neueren Zusammenstellungen ernährten sich die einzelnen Vormenschenarten offenbar unterschiedlicher als bisher angenommen. Die sehr frühe Spezies *Ardipithecus ramidus* fraß demnach ähnliche, eher weiche Nahrung von C3-Pflanzen wie Savannenschimpansen. Andere Arten verzehrten anscheinend auch Gräser aus der Gruppe der C4-Pflanzen. Die spezialisierte Art *Paranthropus robustus* nahm sogar fast nur C4-Pflanzen zu sich.

Zahnstein kann, zusammen mit Abnutzungsspuren vom Kauen, noch einige direktere Anhaltspunkte zum Speiseplan

der letzten Zeit liefern. Pflanzen bilden winzige Siliziumkristalle, von Paläontologen Phytolithen genannt, mit oft charakteristischem Aussehen, die sich im Zahnstein erhalten können. Henry und ihre Kollegen stellten nun fest, dass die Hominiden von Malapa erstaunlicherweise fast nur C3-Pflanzen gegessen hatten, davon allerdings ein reiches Spektrum. Vermutlich verzehrten sie sowohl Blätter und Früchte als auch Holz oder Rinde. Es fragt sich, wie sich dieser eher »unmodern« erscheinende Speiseplan mit ihrem Körperbau, ihrem Fortbewegungstalent und den vermutlich recht geschickten Händen vereinbarte.

Die letzten Lebenstage der Malapa-Primaten waren möglicherweise dramatisch. Berger und seine Mitarbeiter spekulieren, dass sie auf der verzweifelten Suche nach Wasser den steilen Eingang der Höhle hinabzuklettern versuchten, deren Grund damals 30 bis 50 Meter tiefer gelegen haben dürfte als heute, und dabei abrutschten. Das gleiche Schicksal ereilte damals Antilopen, Zebras und diverse andere Tiere. Irgendwann wurden die vielen Kadaver dann unter Schlammmassen begraben, die durch die Höhle trieben.

### Evolutionsschübe durch Umkehr des Magnetfelds?

Vielleicht hat es etwas zu besagen, dass sie alle gerade zur selben Zeit ins Verderben stürzten, als sich das Erdmagnetfeld umpolte. Über die Hintergründe von solchen Umkehrereignissen wissen die Forscher wenig. Die Frage ist, ob und in welchem Ausmaß sie Umweltveränderungen bewirken – bis hin zu ökologischen Katastrophen. Zugleich könnten solche Zeiten Evolutionsschübe auslösen. Das Erdmagnetfeld schirmt unseren Planeten gegen den Sonnenwind ab, also einen Strom geladener Teilchen, sowie gegen kosmische Teilchenstrahlung. Solche Strahlungen sind für Organismen sehr schädlich und bringen oft Mutationen mit sich. Des Weiteren sollte eine Umpolung Tiere massiv irritieren, die bei ihren Wanderungen das Magnetfeld nutzen. Malapa gehört zu den wenigen Orten, wo eine magnetische Umkehr mit reichen Fossilfunden einhergeht. Deren weitere Untersuchung könnte sich somit schon aus diesem Grund lohnen.

Unter den Huftierkadavern von Malapa befand sich eine trüchtige Antilope. Gewöhnlich bekommen diese Tiere ihre Jungen innerhalb einer sehr kurzen Phase im Frühling. Aus dem Entwicklungsstand des Fetus möchten die Forscher nun schließen, in welcher Jahreszeit die Hominiden den Tod fanden. An deren Knochen finden sich auch Spuren von Mäden und Aaskäfern. Sie sollen zeigen, wie lange die Leichen der Vormenschen noch frei dalagen, bevor Schlamm sie zudeckte.

Eigentlich hat die Beschäftigung mit *Australopithecus sediba* gerade erst angefangen. »Sie trampeln hier alle auf Hominidenfossilien herum«, erklärt Berger der Besuchergruppe, die an einem Spätfrühlingstag Ende November nach Malapa gekommen ist und nun auf dem steinigem Gelände zwischen dem Grubenrand und dem Baum herumsteht, wo der Brocken mit dem ersten Fossil lag. Dann klettert der Forscher in das Loch hinein und zeigt auf Knochen, die überall aus

dem Gestein ragen und quasi auf ihre Bergung warten. Ehrfürchtig und fasziniert versuchen alle einen Blick zu erhaschen – auf den Armknochen eines Kleinkinds, den Unterkiefer einer Raubkatze, die Stelle im Fels, wo weitere Skelettteile des »Karabo« getauften Jugendlichen vermutet werden.

Es klingt unglaublich, aber bis dahin hat das Team nur gesammelt, was vor 100 Jahren Bergwerksarbeiten oder später Regengüsse zu Tage gebracht hatten. Systematische Ausgrabungen des etwa 500 Quadratmeter großen Terrains versprechen deswegen noch viel mehr Ausbeute. Eine Abdeckkonstruktion soll die Fläche schützen und zugleich als hochmoderne Feldstation dienen. Derweil stapeln sich in einem Raum der Universität in Johannesburg die einst von Bergarbeitern herausgesprengten Felsbrocken in Regalen bis zur Decke. Sie sollen mit Computertomografie nach Fossilien durchleuchtet werden. Zum Beispiel müsste in einem davon der Schädel des weiblichen Skeletts stecken.

Als hätte Berger mit Malapa nicht für den Rest seines Lebens mehr als genug zu tun, schmiedet er neue Pläne. *A. sediba* »hat gezeigt, dass wir wirklich einen besseren Fundus an Fossilien brauchen«, sinniert er. Mit der Google-Earth-Kartierung stieß er damals in der »Cradle of Humankind« allein auf über drei Dutzend neue Fossilstätten, die möglicherweise Hominidenspuren bergen. Die vielversprechendsten von ihnen sollen Paläontologen nun ergründen. Aber auch anderswo, etwa in Angola und im Kongo, gebe es ähnliche Höhlen – für Evolutionsanthropologen bisher Terra incognita. ~

#### DIE AUTORIN



**Kate Wong** ist langjährige Redakteurin bei »Scientific American«. Sie verfasste für die Zeitschrift schon mehrere Überblicksartikel zur Evolution des Menschen.

#### QUELLEN

- Berger, L.R. et al.:** *Australopithecus sediba*: A New Species of *Homo*-like Australopithecine from South Africa. In: *Science* 328, S.195–204, 2010
- Henry, A.G. et al.:** The Diet of *Australopithecus sediba*. In: *Nature* 487, S. 90–93, 2012
- Kivell, T.L. et al.:** *Australopithecus sediba* Hand Demonstrates Mosaic Evolution of Locomotor and Manipulative Abilities. In: *Science* 333, S. 1411–1417, 2011

#### LITERATURTIPP

**Schrenk, F.:** Die Frühzeit des Menschen. Der Weg zum Homo sapiens. C.H.Beck Wissen, München, 5., vollständig neubearbeitete und ergänzte Auflage 2008  
*Gut verständliche Darstellung der Menschenevolution eines Experten*

#### WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1157690](http://www.spektrum.de/artikel/1157690)



# Patient im Selbstversuch

Der kanadische Immunologe Ralph Marvin Steinman unternahm bahnbrechende Forschungen zur körpereigenen Abwehr. Als Ärzte bei ihm einen Bauchspeicheldrüsenkrebs diagnostiziert hatten, entschloss er sich 2007 zu einem radikalen Schritt: Er testete seine Thesen zur Tumorummuntherapie an sich selbst. Steinman überlebte deutlich länger als erwartet – und starb drei Tage, bevor er den Nobelpreis zuerkannt bekam.

Von Katherine Harmon

In den frühen 1970er Jahren arbeitete Steinman als Wissenschaftler an der Rockefeller University in Manhattan, New York City. Eines Tages sah er etwas durchs Mikroskop, das noch niemand zuvor beschrieben hatte: eigenartige Zellen mit verzweigten, spindelförmigen Fortsätzen. Man kannte damals schon wichtige Akteure des Immunsystems, etwa die B-Zellen, die körperfremde Eindringlinge erkennen helfen, sowie die T-Zellen, die solche Invasoren angreifen. Unklar war jedoch, was genau die B- und T-Zellen – beide gehören zu den weißen Blutkörperchen – in Aktion versetzt. Steinman vermutete, dass seine neu entdeckten Zellen diese Funktion ausüben könnten.

Er sollte Recht behalten. Die dendritischen Zellen, wie er sie nannte, spielen nach heutigem Kenntnisstand eine entscheidende Rolle beim Aufspüren körperfremder Strukturen und beim Auslösen von Immunreaktionen dagegen. Sie fangen fremde Zellen und Partikel mit ihren armähnlichen Fortsätzen ein, nehmen sie in sich auf, verarbeiten sie und präsentieren Teile davon auf ihrer Oberfläche den anderen Immunzellen. So bringen sie den »Kampftruppen« der Körperabwehr bei, welches Ziel angegriffen werden soll. Diese

Entdeckung war ein Meilenstein der Immunologie. Sie konnte erstmals detailliert erklären, wie Impfstoffe funktionieren, und machte Steinman zu einem führenden Forscher auf seinem Gebiet. Aber nicht nur für die Wissenschaft erwies sie sich als folgenreich, sondern auch für ihn persönlich.

Im Lauf der folgenden Jahre kam Steinman zu der Überzeugung, dass dendritische Zellen sich gegen Krankheiten wie Krebs und Aids einsetzen lassen – etwa, indem man sie mit Tumorbestandteilen belädt, so dass sie die Immunabwehr auf die Geschwulst lenken. Gemeinsam mit seinen internationalen Forscherkollegen war er auf dem besten Weg, diese These zu belegen, als sein Leben eine unerwartete Wende nahm. Im März 2007 stellten Ärzte bei ihm Bauchspeicheldrüsenkrebs fest. Dieser aggressiven Tumorerkrankung erliegen vier von fünf Patienten binnen eines Jahres nach der Diagnose. Steinman jedoch starb erst viereinhalb Jahre später daran, im September 2011 – und hatte somit deutlich länger überlebt, als zu erwarten gewesen war. Wahrscheinlich ist das darauf zurückzuführen, dass er seine Forschungen zur Krebsimmuntherapie an sich selbst angewendet hatte, wobei ihm Freunde und Kollegen halfen. Es mutet wie höhere Fügung an, dass er gerade lange genug lebte, um noch für den Nobelpreis für Physiologie oder Medizin nominiert zu werden. Weil er nur drei Tage vor der Preisverleihung starb, erhielt die Nobelversammlung nicht rechtzeitig Kenntnis davon, so dass sie ihm – eigentlich entgegen den Statuten – die Auszeichnung posthum zuerkannte.

Als Steinman in jungen Jahren sein Biologie- und Chemiestudium an der McGill University in Montreal antrat, hatte er sich noch kaum mit Biologie beschäftigt. Doch bald ließ ihn das Fach nicht mehr los. Besonders fasziniert war er von der Welt der Immunzellen, weshalb er schließlich eine Stelle im Labor von Zanvil A. Cohn an der Rockefeller University (New York City) annahm. In seinem Büro hing er ein Zitat von Louis Pasteur auf, jenem berühmten Mikrobiologen und Impfstoffforscher aus dem 19. Jahrhundert: »Le hazard ne favorise que les esprits préparés«, auf Deutsch etwa »Der Zufall

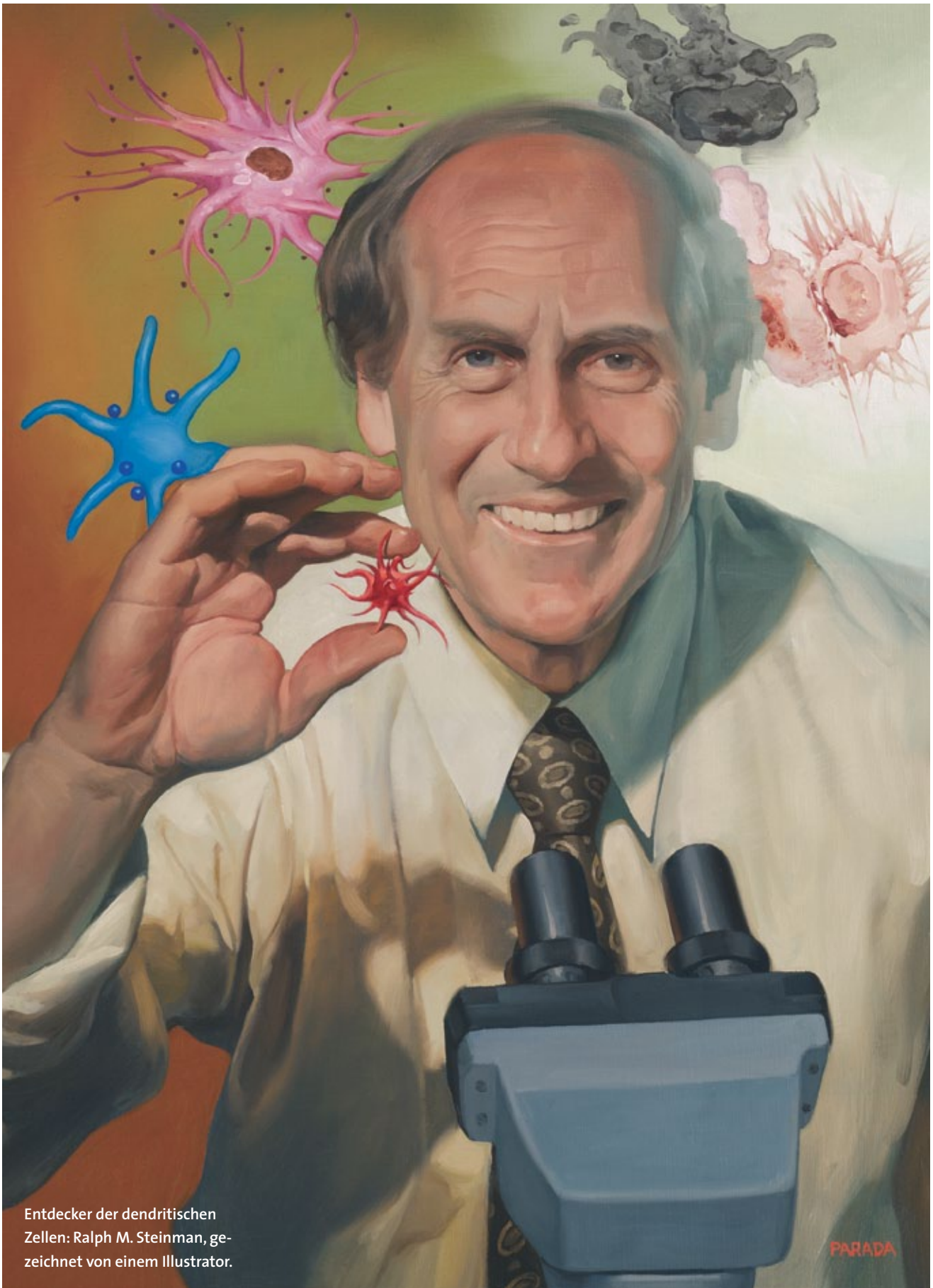
## AUF EINEN BLICK

### MIT DEN WAFFEN DES IMMUNSYSTEMS

**1** Ralph Marvin Steinman beschrieb als Erster die **dendritischen Zellen**, die maßgeblich daran beteiligt sind, Immunreaktionen auszulösen. Sie signalisieren anderen Immunzellen, welche Ziele diese angreifen sollen.

**2** Nachdem 2007 bei ihm Bauchspeicheldrüsenkrebs diagnostiziert worden war, unterzog Steinman sich der Behandlung mit mehreren **experimentellen Impfstoffen**, die auf dendritischen Zellen basierten.

**3** Wahrscheinlich trugen diese Vakzinen dazu bei, dass er weit länger überlebte, als bei seiner Krankheit zu erwarten war. Er starb drei Tage, bevor ihm – ausnahmsweise posthum – der **Nobelpreis für Physiologie oder Medizin** zugesprochen wurde.



Entdecker der dendritischen Zellen: Ralph M. Steinman, gezeichnet von einem Illustrator.

ILLUSTRATION: ROBERTO PARADA

begünstigt nur den vorbereiteten Geist.« Sarah Schlesinger, eine langjährige Freundin und Kollegin Steinmans, erinnert sich: »Ralph war immer außerordentlich gut vorbereitet, und so lag es quasi in der Luft, dass er eine wichtige Entdeckung machen würde. Doch letztlich war es sein untrügliches Gespür, das ihn die wichtige Rolle der dendritischen Zellen erkennen ließ.«

Steinman verbrachte zwei Jahrzehnte damit, die Funktion der dendritischen Zellen aufzuklären und herauszufinden, wie sie sich für medizinische Zwecke nutzen lassen. »Er kämpfte mit großer Hingabe dafür, seine Kollegen zu überzeugen, dass es sich um einen speziellen Zelltyp handelt«, sagt Schlesinger, die 1977 in Steinmans Labor kam. Zu diesem Zeitpunkt waren selbst einige seiner Mitarbeiter nicht überzeugt davon, dass die dendritischen Zellen tatsächlich existieren, denn sie ließen sich nur unter großen Schwierigkeiten isolieren.

### Bessere Zielkoordinaten für die Körperabwehr

In den 1980er Jahren begann Steinman damit, über Impfstoffe auf Basis dendritischer Zellen zu forschen, die sich gegen HIV und Tuberkulose richten sollten, und setzte sich auch mit Krebstherapien auseinander. Bei Krankheiten wie Influenza und Pocken, die man damals bereits mit Impfstoffen verhüten konnte, hinterlässt die Infektion bei den Überlebenden häufig einen lang anhaltenden Schutz – bei Influenza freilich nur gegen den jeweiligen Virussubtyp. HIV, Tuberkulose und Krebs erwiesen sich als weit problematischer, weil sie die Abwehrmechanismen des Immunsystems geschickt überwinden. HIV ist sogar in der Lage, dendritische Zellen für die eigenen Zwecke zu missbrauchen. Steinman wollte solche gefährlichen Erreger bekämpfen, indem er den dendritischen Zellen genauere Informationen über den Schädling mitgab, den das Immunsystem angreifen sollte.

Zusammen mit Madhav Dhodapkar, der heute an der Yale University in New Haven arbeitet, und Nina Bhardwaj, die mittlerweile an der New York University forscht, entwickelte Steinman in den 1990er Jahren ein Verfahren, um die Immunabwehr zu verstärken. Es besteht darin, dendritische Zellen aus dem Blut zu extrahieren, sie mit Antigenen zu beladen – fremden Proteinbruchstücken, etwa von Viren oder Bakterien – und anschließend in den Organismus zurückzubringen, um eine intensive Immunreaktion gegen die Antigene auszulösen. Diese Methode liegt dem weltweit ersten therapeutischen Krebsimpfstoff zu Grunde, der 2010 zugelassen wurde. Das Mittel mit dem Handelsnamen »Provenge« kann das Leben von Patienten mit fortgeschrittenem Prostatakrebs verlängern, wenn auch nur um wenige Monate (siehe SdW 3/2012, S. 24).

Anfang 2007 war Steinman auf einer wissenschaftlichen Konferenz in Colorado. Hinterher machte er dort noch ein



paar Tage Schiurlaub mit der Familie. Während des Aufenthalts erkrankten er und seine beiden Töchter an einem Magen-Darm-Infekt. Die Mädchen waren schnell wieder gesund, doch Steinman erholte sich nur schleppend. Bald nach seiner Heimkehr bekam er zudem noch Gelbsucht. Er ließ sich untersuchen, unter anderem mittels Computertomografie. Auf den Schnittbildern fanden die Radiologen Ende März einen Tumor der Bauchspeicheldrüse (Pankreas), der bereits in die Lymphknoten gestreut hatte. Steinman wusste, dass er nur eine geringe Überlebenschance hatte.

»Als er uns davon berichtete, sagte er: »Schaut nicht in Google nach – hört mir einfach zu««, erinnert sich seine Tochter Alexis. Sie fühlte sich, als habe ihr jemand einen heftigen Schlag versetzt. Steinman erklärte seiner Familie, es handle sich zwar um eine aggressive Tumorart, doch habe er außergewöhnlich gute Karten. Anders als die meisten Betroffenen habe er Zugang zu den weltbesten Immunologen und Krebs-

medizinern sowie zu deren meistversprechenden Therapien.

Gemeinsam mit Sarah Schlesinger und ihrem Mitarbeiter Michel Nussenzweig von der Rockefeller University berichtete Steinman zahl-

reichen Kollegen auf der ganzen Welt von seiner Erkrankung. Er war überzeugt davon, dass seine größten Heilungschancen darin lägen, mit Hilfe eigener dendritischer Zellen eine Immunreaktion gegen den Tumor auszulösen. Es blieb ihm jedoch nur wenig Zeit.

Schlesinger kontaktierte Charles Nicolette, einen Freund und langjährigen Kooperationspartner, der die Forschungsabteilung von Argos Therapeutics leitet. Das Unternehmen hat seinen Sitz in Durham, North Carolina, entwickelt Medikamente auf RNA-Basis und wurde von Steinman mitgegründet. Nicolette und seine Mitarbeiter hatten eine therapeutische Impfung auf Basis dendritischer Zellen konzipiert, die

**»Steinman sah seine größten Heilungschancen darin, mit eigenen dendritischen Zellen eine Immunreaktion gegen den Tumor auszulösen«**



sich gegen fortgeschrittenen Nierenkrebs richtete und gerade in der zweiten klinischen Studienphase geprüft wurde. Das Verfahren sah vor, Ribonukleinsäure (RNA) aus dem Tumor in dendritische Zellen des Patienten einzubringen, was diese dazu veranlassen sollte, die T-Zellen des Immunsystems zu einem gezielten Angriff auf den Krebs anzustacheln.

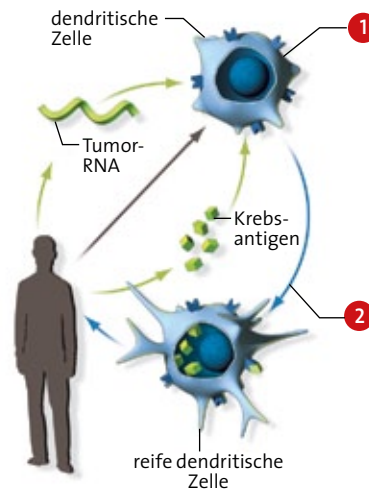
Nach Absprache aller Beteiligten ließ Steinman im April 2007 einen Teil seiner Bauchspeicheldrüse chirurgisch entfernen. Dieser als Whipple-Operation bezeichnete Eingriff gehört zu den konventionellen Maßnahmen bei der Behandlung des Pankreaskarzinoms. Das dabei entnommene Tumorgewebe verwendete Nicolettes Gruppe, um einen Impfstoff gegen Steinmans Krebs herzustellen. Es gelang gerade noch rechtzeitig, bei der US-Arzneimittelzulassungsbehörde FDA die Erlaubnis einzuholen, Steinman in die laufende klinische Studie bei Argos Therapeutics aufzunehmen.

Zudem besprach sich Steinman mit seinem langjährigen Vertrauten Jacques Banchereau, der heute das Baylor Institute for Immunology Research in Dallas leitet. Dieser wiederum rief sogleich seine Institutskollegin Anna Karolina Palucka an, die Steinman in den 1990er Jahren kennen gelernt hatte. Palucka arbeitete an einem experimentellen Impfvorfahren gegen Hautkrebs, das ebenfalls auf dendritischen Zellen gründete. Sie war sofort bereit, auf Grundlage dieses Verfahrens eine Vakzine für Steinman anzufertigen. Allerdings fand sie es schwierig, den berühmten Immunologen »gleichzeitig in der Rolle des Freundes, des Patienten und des Wissenschaftlers zu sehen«.

Während die experimentellen Impfstoffe hergestellt wurden, was Monate dauerte, unterzog sich Steinman mehreren anderen Behandlungen. So absolvierte er eine Standardchemotherapie mit dem Arzneistoff Gemcitabin und mel-

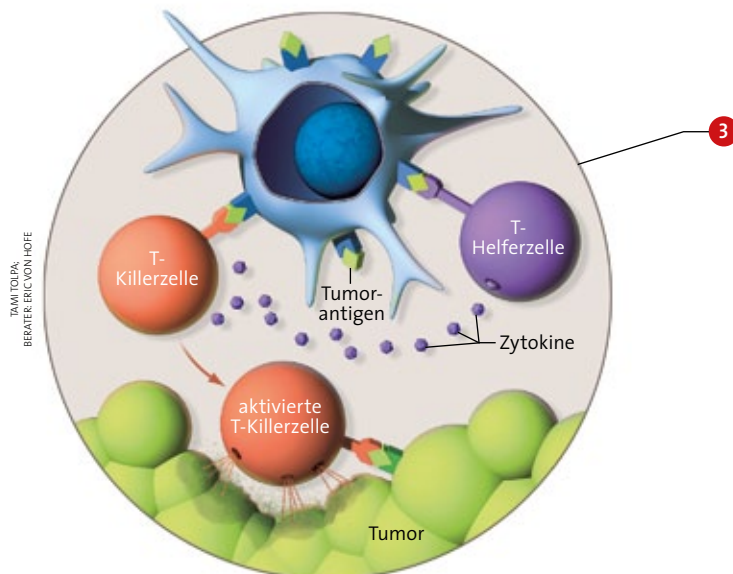
## Medizin aus dem eigenen Körper

**Mehrere experimentelle Krebstherapien,** denen sich Steinman unterzog, nutzten genau die Zellen, die er als Erster beschrieben hatte und für deren Entdeckung er später den Nobelpreis erhielt. Das Immunsystem tötet laufend potenzielle Krebszellen ab. Doch manchmal gelingt es diesen, die Immunzellen zu überlisten und der Körperabwehr zu entgehen. Dendritische Zellen tragen dazu bei, die Immunantwort auszulösen. Indem Mediziner sie mit Bestandteilen des Tumors beladen, wollen sie die Körperabwehr auf die Krebszellen hetzen.



**1** Dendritische Zellen werden aus dem Blut des Patienten entnommen und mit Antigenen des entsprechenden Tumortyps oder mit RNA aus dem Tumor des Patienten beladen. Die Zellen nehmen das Material auf und verarbeiten es – so setzen sie etwa die Tumor-RNA in entsprechende Antigene um.

**2** Damit die so behandelten Zellen eine wirksame Immunreaktion gegen den Tumor auslösen, werden sie dazu angeregt, sich zu vermehren. Spezielle Wirkstoffe lassen die Zellen ausreifen, so dass sie die Tumorantigene – oder Teile davon – auf ihrer Oberfläche präsentieren. Anschließend erhält der Patient sie über eine Infusion zurück.



**3** Im Körper zeigen die dendritischen Zellen die fremden Proteinstücke den anderen Akteuren des Immunsystems, etwa den T-Helferzellen und den T-Killerzellen. Dies führt im Idealfall dazu, dass die T-Zellen sich mittels Zytokinen (bestimmten Signalproteinen) untereinander koordinieren, um Tumorzellen aufzuspiiren und zu zerstören.

dete sich im Spätsommer für eine Studie mit GVAX an, einer immunstimulierenden Vakzine. In einer vorangegangenen Phase-II-Studie hatten Patienten mit Bauchspeicheldrüsenkrebs, die das Mittel erhalten hatten, durchschnittlich vier Monate länger überlebt als die Kontrollgruppe. Zwei Monate lang fuhr Sarah Schlesinger fast jede Woche mit Steinman nach Boston, wo er den Impfstoff verabreicht bekam.

Steinmans Gesundheitszustand blieb relativ stabil. Im September 2007 erhielt er den Albert-Lasker-Preis für medizinische Grundlagenforschung, den viele als Vorboten des Nobelpreises ansehen. Auch gab er eine Reihe von Interviews. Darin ging er auf das Potenzial dendritischer Zellen im Kampf gegen Krebs ein. Er betonte, die Immuntherapie wirke zielgerichtet, hochspezifisch und habe sehr viel weniger Nebenwirkungen als die Chemotherapie. »Ich meine, dass sich uns hier die Möglichkeit eröffnet, eine völlig neue Art der Krebstherapie zu entwickeln«, sagte er. »Aber wir brauchen mehr Forschung und viel Geduld, um die zu Grunde liegenden Mechanismen zu verstehen.«

## Groß angelegter Selbstversuch

**Nach der Diagnose seiner Krebserkrankung** erhielt Steinman zahlreiche Angebote von Freunden und Kollegen, an experimentellen Behandlungen teilzunehmen. Nach reiflicher Überlegung entschied er sich für eine Reihe innovativer Immuntherapien. Diese wurden gerade in klinischen Studien getestet, an denen er als Einzelpatient teilnehmen konnte, wobei für ihn ein besonderes Protokoll galt. Steinman unterzog sich dort der Behandlung mit experimentellen Impfstoffen, von denen einige speziell an seine Krebserkrankung angepasst waren. Zusätzlich ließ er sich mit verschiedenen Chemotherapien behandeln.

### SOMMER UND HERBST 2007

Behandlung mit GVAX, einem immunstimulierenden Impfstoff, der an der Johns Hopkins University entwickelt wurde

### ENDE 2007

Therapie mit einem Hemmstoff bestimmter Zellsignalmoleküle in einer Studie der Firma Genentech. Die Behandlung zielt darauf ab, eine abnormale zelluläre Kommunikation zu unterbinden, die das Tumorwachstum fördern kann.

### WINTER 2007 UND FRÜHJAHR 2008

Steinman erhält eine Vakzine auf Basis dendritischer Zellen, die klinisch auf Wirksamkeit gegen Nierenkrebs getestet wird.

### 2008 BIS 2010

Erneute Therapie mit einem Impfstoff auf Basis dendritischer Zellen. Entwickelt wurde die Vakzine eigentlich gegen Hautkrebs.

### MITTE 2010

Kombination der Immuntherapie mit der experimentellen immunstimulierenden Substanz Hiltonol. Damit soll das Immunsystem aktiviert werden, unter anderem durch eine forcierte Ausschüttung des Signalmoleküls Interferon.

### WINTER UND SOMMER 2010

Behandlung mit dem Wirkstoff Ipilimumab, einem monoklonalen Antikörper, der für die Therapie von schwarzem Hautkrebs zugelassen wurde

Manchmal zeigte er mehr Geduld, als den Kollegen lieb war. Im Kampf gegen seinen Krebs sprach er sich anfangs für ein langsames, schrittweises Vorgehen aus, so dass nach jeder Behandlung erst seine Immunreaktionen untersucht werden könnten, bevor die nächste Behandlung begänne. Doch Schlesinger und Nussenzweig machten ihm klar, dass dazu schlicht keine Zeit sei – falls er stürbe, seien das Experiment und damit auch die Datengewinnung beendet.

## Ein Feuerwerk von experimentellen Therapieverfahren

Im November 2007 war Nicolettes Impfstoff fertig. Er bestand aus dendritischen Zellen aus Steinmans Blut, die mit RNA aus seinem Tumor behandelt worden waren. Steinman hatte gerade eine Chemotherapie hinter sich und trat nun der klinischen Studie von Argos Therapeutics bei – als Einzelpatient, für den ein spezielles Protokoll galt.

Anfang 2008 folgte der Impfstoff von Anna Karolina Palucka, der zwar eigentlich gegen Hautkrebs entwickelt worden war, in diesem Fall aber Proteinbruchstücke aus Steinmans Tumorzellen enthielt. Palucka erwartete deshalb, dass er die Körperabwehr auf den Krebs lenken würde.

Auch andere Mediziner schlugen experimentelle Therapien vor. »Jeder bot das Beste an, was er zur Verfügung hatte«, berichtet Palucka. Steinman hatte über Jahrzehnte hinweg mit zahlreichen Kollegen zusammengearbeitet, die nun versuchten, ihm zu helfen. Außer an medizinischen Standardbehandlungen nahm er – als spezieller Einzelpatient – an vier laufenden klinischen Studien teil, in denen verschiedene innovative Impfstoffe getestet wurden. Die meisten davon waren noch nie auf Wirksamkeit gegen Bauchspeicheldrüsenkrebs geprüft worden. Darüber hinaus unterzog er sich noch anderen experimentellen Immun- und Chemotherapien.

Diesen Selbstversuch führte Steinman durch wie ein Laborexperiment: Er sammelte Daten, prüfte Befunde und entwarf Strategien. Besonders aufmerksam beobachtete er, wie sein Körper auf die Behandlungen reagierte. Detailliert protokollierte er die Reaktionen seiner Haut nach dem Spritzen der Impfstoffe. Schlesinger erinnert sich an eine Episode im Jahr 2008: Steinman unterzog sich gerade der Behandlung mit Paluckas Vakzine, als die Forscherin ihn in New York besuchte. Nach einer Injektion zeigte er ihr begeistert die geschwollene Einstichstelle. »Das sind T-Zellen!«, freute er sich darüber, dass sein Immunsystem offenkundig auf den Eingriff reagiert hatte, »das ist fantastisch!« Ein anderes Mal, nachdem bei ihm der Blutspiegel eines Tumormarkers (eines Proteins, das den Fortschritt der Krebserkrankung anzeigt) wiederholt zurückgegangen war, schrieb er eine E-Mail mit der Betreffzeile »Das Ergebnis ist reproduzierbar!«, als habe er einen wissenschaftlichen Durchbruch erzielt.

Doch gerade als Forscher konnte er eine gewisse Unzufriedenheit nicht verhehlen. Dass sein Ein-Mann-Selbstversuch keinen wissenschaftlichen Standards genügen konnte, frustrierte ihn anhaltend. Da die verschiedenen Therapien so dicht aufeinander folgten, war es unmöglich zu ermitteln,



welche Intervention was bewirkt hatte. Dennoch gelang es ihm, interessante Daten zu sammeln. Bei einem Immunfunktionstest, den Palucka während der Behandlung durchführte, beobachtete sie, dass etwa acht Prozent von Steinmans T-Killerzellen auf Tumorantigene reagierten. Das erscheint im ersten Moment nicht sehr beeindruckend, doch wenn man bedenkt, wie vielen Krankheitserregern der Körper ausgesetzt ist, stellt dies einen beachtlich hohen Prozentsatz dar. »Eine der Behandlungen oder eine Kombination aus mehreren Interventionen hatte ihn gegen den Tumor immunisiert«, sagt Schlesinger.

Im Juni 2011 reiste Steinman mit seiner Frau Claudia alljährlich ihres vierzigsten Hochzeitstags nach Italien. Da hatte er die mittlere Überlebenszeit eines Pankreaskarzinom-Patienten bereits weit überschritten. Im September 2011 arbeitete er noch immer im Labor und bereitete sich auf eine neue Therapie mit dem Argos-Impfstoff vor. Doch Ende des Monats erkrankte er an einer Lungenentzündung. »Als er ins Krankenhaus eingeliefert wurde, sagte er, ›Ich bin nicht sicher, ob ich hier wieder herauskomme«, erinnert sich seine Tochter Alexis. Am Freitag, dem 30. September, starb er schließlich im Alter von 68 Jahren. Sein krebbschwacher Körper hatte die Lungenentzündung nicht mehr unter Kontrolle bringen können.

### Ehrung eines Toten

Die Angehörigen waren zunächst unsicher, wie sie die Nachricht den zahlreichen Freunden und Kollegen Steinmans in aller Welt mitteilen sollten. Sie entschieden sich dafür, am Montag sein Labor aufzusuchen, um dort persönlich mit den ehemaligen Kollegen zu sprechen. Doch zeitig am Morgen, als alle noch schliefen, kam ein Anruf aus Stockholm. Steinmans Blackberry war stummgeschaltet und lag auf dem Nachttisch. Seine Frau sah verschlafen ein Licht blinken, das eine neue Nachricht anzeigte. Kurz darauf öffnete sich eine E-Mail, die Steinman höflich darüber informierte, dass er den Nobelpreis 2011 für Physiologie oder Medizin erhalten solle.

Nachdem das Nobelkomitee die Entscheidung bekannt gegeben hatte, setzte der übliche Presserummel ein. Artikel wurden geschrieben, und es gab Verlautbarungen über Steinman und die beiden anderen Preisträger, Bruce Beutler vom Scripps Research Institute (Kalifornien) und Jules Hoffmann von der Universität Straßburg – bis einige Stunden später die Nachricht von Steinmans Tod die Runde machte. Den Statu-

ten der Nobelstiftung nach kann der Preis nur dann posthum vergeben werden, wenn der Preisträger zwischen der Bekanntgabe im Oktober und der Verleihung im Dezember stirbt. In Steinmans Fall zwang die ungewöhnliche Überschneidung der Ereignisse die Nobelversammlung zu eingehenden Beratungen, deren Ergebnis die Öffentlichkeit gespannt erwartete. Gegen Abend entschied das Komitee, dass Steinman Preisträger bleiben würde.

Wenige Tage darauf starb auch Steve Jobs, Mitbegründer und Geschäftsführer der Firma Apple, an Bauchspeicheldrüsenkrebs. Er hatte an einer seltenen, langsam wachsenden Krebsart gelitten – einem neuroendokrinen Tumor. Jobs erlag ihr acht Jahre nach der Diagnose, was etwa dem Mittelwert bei dieser Erkrankung entspricht. Steinmans Überlebenszeit hingegen war überdurchschnittlich lang. »Es gibt keinen Zweifel, dass eine der Therapiemaßnahmen dafür verantwortlich war«, meint Schlesinger.

Die Forscher versuchen nun herauszufinden, welche von den verschiedenen Behandlungen es gewesen sein könnte. Anfang dieses Jahres eröffnete die Baylor University das Ralph Steinman Center for Cancer Vaccines (Ralph-Steinman-Zentrum für Krebsimpfstoffe), und Palucka plant eine klinische Studie, in der sie Patienten mit Bauchspeicheldrüsenkrebs mit demselben Impfstoff behandeln will, das sie – gemeinsam mit Kollegen – für Steinman entwickelt hatte. Bei Argos Therapeutics wiederum treibt Nicolette die Entwicklung der Nierenkrebs-Vakzine voran: »Wir sind es Ralph schuldig, dieses Projekt zum Erfolg zu führen.« Demnächst soll eine Phase-III-Studie mit dem Nierenkrebs-Impfstoff starten, den Steinman an sich selbst getestet hatte. ~

### DIE AUTORIN



**Katherine Harmon** ist Redakteurin bei »Scientific American«.

### QUELLEN

- Bauer, C. et al.:** Dendritic Cell-Based Vaccination of Patients with Advanced Pancreatic Carcinoma: Results of a Pilot Study. In: Cancer Immunology, Immunotherapy 60, S. 1097–1107, 2011
- Palucka, A.K. et al.:** Taming Cancer by Inducing Immunity via Dendritic Cells. In: Immunological Reviews 220, S. 129–150, 2007
- Steinman, R.M., Cohn, Z.A.:** Identification of a Novel Cell Type in Peripheral Lymphoid Organs of Mice. I. Morphology, Quantitation, Tissue Distribution. In: Journal of Experimental Medicine 137, S. 1142–1162, 1973

### WEBLINKS

- Video über verschiedene Ansätze von Krebsimmuntherapien:  
[www.spektrum.de/artikel/1158421](http://www.spektrum.de/artikel/1158421)  
Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1157697](http://www.spektrum.de/artikel/1157697)



# Mit einem Rechenrick zur umfassenden Theorie der Naturkräfte

Bei den heftigsten Kollisionen in Teilchenbeschleunigern versagen alle gängigen mathematischen Beschreibungen. Doch ein neuer Ansatz verspricht Abhilfe. Was Physiker besonders begeistert: Damit dürfte sich auch die Schwerkraft zwanglos in das theoretische Modell der Welt einfügen – ein lang gehegter Traum könnte wahr werden.

Von Zvi Bern, Lance J. Dixon und David A. Kosower

**A**n einem sonnigen Frühlingstag stieg unser Koautor Dixon an der Station Mile End in die Londoner U-Bahn, um zum Flughafen Heathrow zu fahren. Er musterte den Fahrgast gegenüber – einen von mehr als drei Millionen, die tagtäglich die U-Bahn nutzen – und fragte sich zum Zeitvertreib: Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit, dass der Fremde in Wimbledon aussteigt? Wie lässt sich das berechnen, wenn er alle möglichen Wege nehmen könnte? Plötzlich erkannte Dixon, dass die Frage den vertrackten Problemen gleicht, vor denen Teilchenphysiker stehen, wenn sie die Vorgänge in modernen Beschleunigern vorhersagen möchten.

So jagen Forscher mit dem Large Hadron Collider (LHC) am europäischen Kernforschungszentrum CERN bei Genf Protonen mit nahezu Lichtgeschwindigkeit gegeneinander, um die Kollisionstrümmer zu analysieren. Der Bau des Be-

schleunigers und seiner Detektoren war eine Herkulesaufgabe. Ebenso mühsam, wenn auch weniger augenfällig, ist die Deutung der Detektordaten. Das mag auf den ersten Blick seltsam erscheinen. Das so genannte Standardmodell der Teilchenphysik (siehe Spektrum der Wissenschaft 9/2003, S. 26) hat sich vielfach bewährt, und Theoretiker verwenden es routinemäßig, um experimentelle Resultate vorherzusagen. Dabei nutzen sie ein Rechenverfahren, das der berühmte amerikanische Physiker Richard Feynman (1918–1988, Nobelpreis 1965) schon vor gut 60 Jahren entwickelt hat.

Doch bei modernen Problemen versagt die Methode. Sie liefert zwar einen anschaulichen, ungefähren Zugang zu den einfachsten Abläufen, ist aber hoffnungslos umständlich bei komplizierten Prozessen und für hochpräzise Berechnungen. Die Folgen einer Teilchenkollision sind noch schwieriger vorherzusagen als die Wege eines U-Bahn-Passagiers. Selbst alle Computer der Welt gemeinsam wären nicht im Stande, das Ergebnis einer gewöhnlichen Kollision im LHC zu bestimmen. Wenn aber die Theoretiker nicht einmal für bekannte physikalische Gesetze und Materieformen präzise Vorhersagen treffen können, wie können wir dann beispielsweise feststellen, ob im Beschleuniger etwas wirklich Neues stattgefunden hat? Vielleicht hat der LHC schon die Antwort auf einige unserer größten Fragen an die Natur geliefert, und wir tapen weiter im Dunkeln, weil wir die Gleichungen des Standardmodells nicht exakt genug zu lösen vermögen.

Daher haben wir kürzlich ein neues Verfahren zur Analyse von Teilchenprozessen entwickelt, das die Komplikationen der Feynman-Technik umschiffet. Die so genannte Unitaritätsmethode sagt ohne unnötigen Aufwand voraus, was ein U-Bahn-Fahrer tun wird, indem sie einkalkuliert, dass die Möglichkeiten des Passagiers an jedem Entscheidungspunkt

## AUF EINEN BLICK

### NEUE HOFFNUNG AUF DIE ALLUMFASSENDE THEORIE

**1** Berechnungen von Teilchenkollisionen beruhen auf einem Verfahren, das der Physiker Richard Feynman entwickelt hat. Doch bei starken Wechselwirkungen stößt die Methode der **Feynman-Diagramme** an ihre Grenzen.

**2** Die Autoren haben ein neues Verfahren entwickelt, das auch unter den extremen Bedingungen funktioniert, die im Large Hadron Collider (LHC) herrschen. Die **Unitaritätsmethode** hilft bei der Suche nach exotischen Teilchen und Kräften.

**3** Das neue Verfahren weckt Hoffnungen auf eine **einheitliche Theorie** aller Wechselwirkungen. Die Gravitation erscheint darin als eine doppelte Kopie der starken Kraft.



KENNY BROWN UND CHARE WREN, MONOLITHIC STUDIOS



recht beschränkt sind und sich durch die Wahrscheinlichkeiten unterschiedlicher Handlungssequenzen darstellen lassen. Viele vordem unlösbare theoretische Probleme der Teilchenphysik werden durch die neue Idee enorm vereinfacht. Die Lösungen liefern so detaillierte Vorhersagen, dass wir eine den Rahmen der gängigen Theorie sprengende Entdeckung leicht erkennen würden. Außerdem stellt sie eine Alternative zum Standardmodell zur Verfügung, die unter Physikern als Vorstufe einer vereinheitlichten Theorie aller Naturkräfte gilt.

### Die Unitaritätsmethode

Der Unitaritätsansatz ist nicht bloß ein hilfreicher Rechen-trick. Er eröffnet einen völlig neuartigen Zugang zu Wechselwirkungstheorien, in denen überraschende Symmetrien auftauchen und eine bislang unterschätzte Eleganz des Standardmodells zum Ausdruck bringen. Vor allem nimmt dadurch der jahrzehntealte Versuch, Quantenmechanik und allgemeine Relativitätstheorie zu einer Quantentheorie der Gravitation (siehe Spektrum der Wissenschaft, Titelthema 4/2012, S. 34) zu vereinen, eine unerwartete Wendung. Bis in die 1970er Jahre nahmen Physiker an, die Gravitation verhalte sich wie die anderen Naturkräfte, und suchten die vorhandenen Theorien entsprechend zu erweitern. Doch bei Anwendung der Feynman-Methode ergaben sich entweder unsinnige Resultate, oder der mathematische Aufwand stieg ins Unermessliche. Anscheinend war die Gravitation eben doch keine Kraft wie die anderen. Entmutigt wandten sich die Physiker exotischen Ideen wie Supersymmetrie und Stringtheorie zu.

Doch mit Hilfe der Unitaritätsmethode können wir tatsächlich Berechnungen durchführen, die in den 1980er Jahren versucht wurden, aber damals als hoffnungslos schwierig galten. Wie wir herausgefunden haben, sind die Probleme nicht unüberwindlich. Die Gravitation ähnelt in der Tat den anderen Kräften, allerdings auf unerwartete Weise: Sie verhält sich wie eine »Doppelkopie« der starken Kernkraft, welche die Bausteine des Atomkerns zusammenhält. Die starke Kraft wird durch so genannte Gluonen übertragen; die Quantenteilchen der Gravitation sind die Gravitonen. In dem neuen Modell verhält sich jedes Graviton wie zwei zusammengeheftete Gluonen. Dieses Bild mutet seltsam an, und sogar Experten wissen nicht genau, was es bedeutet. Dennoch liefert das Doppelkopie-Modell einen Zugang zur Vereinigung der Gravitation mit den anderen Kräften.

Feynmans Methode ist so überzeugend und nützlich, weil sie extrem komplizierte Rechnungen grafisch darstellt: mit Hilfe von Diagrammen, die das Zusammentreffen zweier oder mehrerer Teilchen anschaulich darstellen. Um quantitative Vorhersagen zu treffen, zeichnet der Forscher mehrere Diagramme, die jeweils einen möglichen Verlauf einer bestimm-

ten Teilchenkollision symbolisieren – analog zu den Routen, die ein U-Bahn-Fahrer wählen kann. Gemäß detaillierten Regeln, die Feynman und seine Kollegen, insbesondere der englische Physiker Freeman Dyson, aufgestellt haben, weist der Theoretiker nun jedem Diagramm eine Zahl zu, welche die Wahrscheinlichkeit des entsprechenden Ereignisses angibt.

Leider ist die Anzahl der möglichen Diagramme enorm – im Prinzip unendlich groß. Für den von Feynman ursprünglich anvisierten Zweck machte dieser Nachteil nichts aus. Er untersuchte die Quantenelektrodynamik (QED), die beschreibt, wie Elektronen mit Photonen wechselwirken. Die charakteristische Größe der Wechselwirkung, die so genannte Kopplungskonstante, beträgt in diesem Fall rund  $1/137$ . Der kleine Wert sorgt dafür, dass komplizierte Diagramme in der Berechnung eine geringe Rolle spielen und oft ganz ignoriert werden können. Um im Vergleich zu bleiben: Der U-Bahn-Fahrer nimmt wahrscheinlich eine einfache Strecke.

Zwei Jahrzehnte später erweiterten die Physiker Feynmans Methode auf die starke Kraft, welche die Quantenchromodynamik (QCD) theoretisch beschreibt. Auch hier gibt es eine Kopplungskonstante, doch deren Wert ist, wie schon das Wort »stark« nahelegt, größer als bei der elektromagnetischen Wechselwirkung. Das erhöht zunächst die Anzahl komplizierter Diagramme, die in den Rechnungen berücksichtigt werden müssen – als würde ein U-Bahn-Fahrer bereitwillig große Umwege nehmen und damit ein schlecht vorhersagbares Verhalten zeigen. Zum Glück verschwindet die Kopplungskonstante für sehr kurze Abstände, wie sie bei den extrem energiereichen Prozessen im LHC entscheidend sind. Darum reicht es für die einfachsten Kollisionen wiederum aus, nur unkomplizierte Feynman-Diagramme zu berücksichtigen.

### Grenzen des Feynman-Diagramms

Doch bei unübersichtlichen Teilchenprozessen wird die Methode äußerst unhandlich. Man klassifiziert Feynman-Diagramme nach der Anzahl der externen Linien sowie der darin enthaltenen geschlossenen Schleifen (siehe Kasten gegenüber). Die Schleifen spiegeln eine grundlegende Eigenheit der Quantentheorie wider: Es gibt darin virtuelle Teilchen. Diese sind nicht direkt beobachtbar, üben aber einen messbaren Einfluss auf die Stärke der Naturkräfte aus. Virtuelle Teilchen gehorchen den üblichen Naturgesetzen, insbesondere der Energie- und Impulserhaltung, mit einer Einschränkung: Ihre Masse kann von derjenigen der »realen« – direkt beobachtbaren – Partikel abweichen. Die Schleifen symbolisieren ihr flüchtiges Dasein. Sie entstehen, bewegen sich ein winziges Stück weit und verschwinden wieder. Ihre Masse bestimmt ihre Lebenserwartung: je schwerer, desto kurzlebiger.

Die einfachsten Feynman-Diagramme – so genannte Baumdiagramme – vernachlässigen die virtuellen Teilchen;

»Mit Hilfe der Unitaritätsmethode können wir tatsächlich Berechnungen durchführen, die früher als hoffnungslos schwierig galten«



sie enthalten keine geschlossenen Schleifen. Für die Quantenelektrodynamik zeigen sie zwei Elektronen, die einander durch Austausch eines Photons abstoßen. In komplizierteren Diagrammen kommen dann sukzessive Schleifen hinzu, die Physiker als Störungsterme bezeichnen. Dabei beginnt man mit einer groben Schätzung in Form eines Baumdiagramms und verbessert sie schrittweise durch Hinzufügen von »Störungen« in Form von Schleifen. Beispielsweise kann sich das Photon auf seinem Weg zwischen den beiden Elektronen spontan in ein virtuelles Elektron und ein virtuelles Antielektron aufspalten, die einander sofort vernichten und wieder ein Photon erzeugen. Dieses setzt den Weg des ursprünglichen Photons fort. Auf der nächsten Komplexitätsebene können sich Elektron und Antielektron ihrerseits vorübergehend aufspalten. Mit zunehmender Anzahl virtueller Teilchen beschreiben die Diagramme die Quanteneffekte immer genauer.

Selbst Baumdiagramme können sich als schwierig erweisen. Würde man im Fall der QCD einen Zusammenstoß zwischen zwei Gluonen betrachten, aus dem acht Gluonen hervorgehen, so müsste man zehn Millionen Baumdiagramme zeichnen und für jedes die Wahrscheinlichkeit berechnen. Ein Ansatz namens Rekursion, den Frits Berends an der Universität Leiden (Niederlande) und Walter Giele vom Fermi National Acceleration Laboratory in Batavia (US-Bundesstaat Illinois) in den 1980er Jahren entwickelten, vereinfacht zwar das Problem bei Baumdiagrammen, lässt sich aber nicht ohne Weiteres auf Schleifen erweitern. Geschlossene Schleifen erschweren die Rechenaufgabe enorm. Schon eine einzige erhöht Anzahl und Komplexität der Diagramme fast ins Unermessliche. Die mathematischen Formeln könnten eine ganze Enzyklopädie füllen. Auch die Rechenkraft leistungsfähigster Computer vermag mit dem Anstieg der Komplexität nur ein Stück weit Schritt zu halten; bald unterliegen sie der wachsenden Anzahl externer Teilchen oder interner Schleifen.

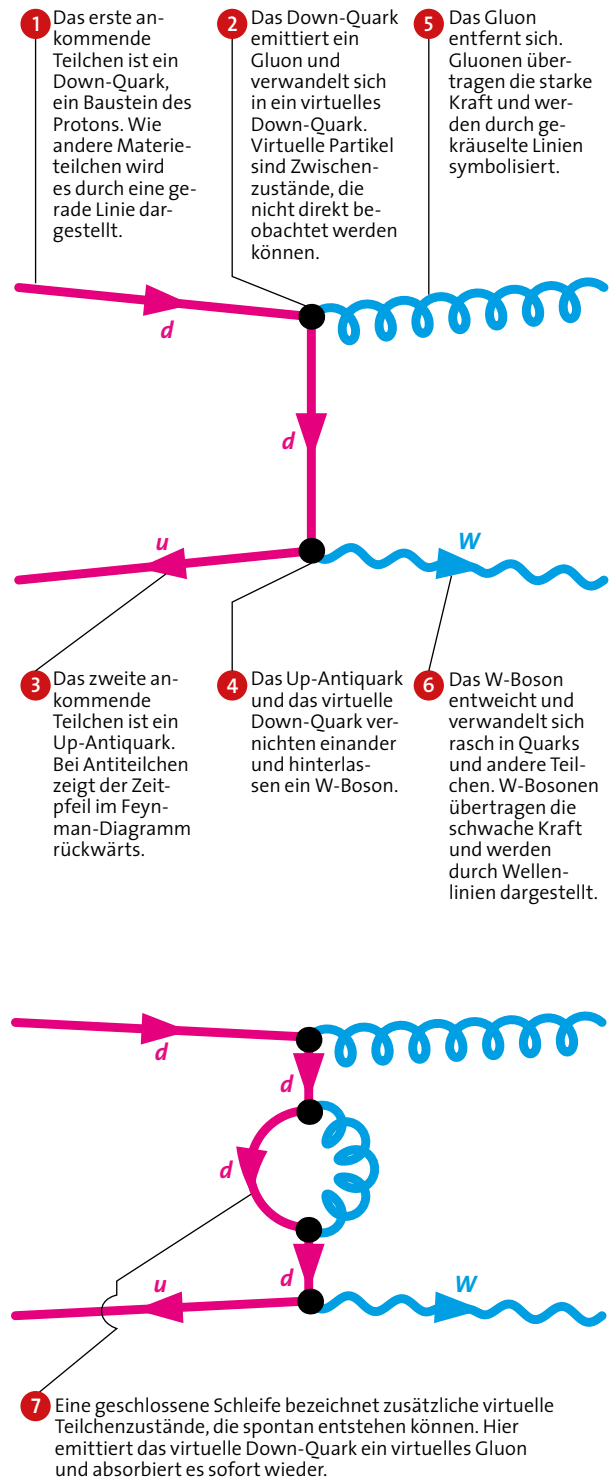
### Über die übliche Methode hinaus

Zudem werden die zunächst anschaulichen Diagramme rasch völlig unübersichtlich. Schon einzelne Feynman-Graphen sind oft undurchdringlich verschnörkelt, und wenn wir mit vielen jonglieren müssen, verlieren wir jeden Kontakt mit der eigentlichen Physik. Erstaunlicherweise kann sich das Endresultat, das aus dem Aufsummieren sämtlicher Diagramme hervorgeht, als ganz einfach herausstellen. Unterschiedliche Diagramme heben einander teilweise auf, und manchmal reduzieren sich Formeln mit Millionen Termen auf einen einzigen Ausdruck. Solche Aufhebungen deuten an, dass die Diagramme das falsche Werkzeug sind. Es muss eine bessere Methode geben.

Jahrelang probierten die Physiker viele neue Rechenmethoden aus, bis sich allmählich eine Alternative zu den Feynman-Diagrammen abzeichnete. Wie die Koautoren Bern und Kosower in den frühen 1990er Jahren zeigten, vermag die Stringtheorie die QCD-Rechnungen so zu vereinfachen, dass

## Feynman-Diagramme

**Unentwegt und überall** ziehen Elementarteilchen einander an oder stoßen sich ab, kollidieren, verändern sich oder vernichten einander. Um das quantenmechanische Wirrwarr zu ordnen, erfand Nobelpreisträger Richard Feynman die nach ihm benannten Diagramme. Im Beispiel unten wechselwirken zwei Quarks und erzeugen ein Gluon und ein W-Boson.



ZW. BERN, LANCE J. DIKON, DAVID A. KOSOWER UND HARALDITA

alle relevanten Feynman-Diagramme zu einer einzigen Formel zusammengefasst werden. Mit dieser Formel analysierten wir drei eine Teilchenreaktion, die zuvor niemand genau verstanden hatte: die Streuung von zwei Gluonen, aus der drei Gluonen entstehen, mit einer Schleife aus virtuellen Teilchen. Dieser Vorgang war für damalige Verhältnisse sehr kompliziert, ließ sich aber nun durch eine erstaunlich simple Formel, die auf eine DIN-A4-Seite passte, vollständig beschreiben.

Die Formel war so einfach, dass wir gemeinsam mit David Dunbar, der damals an der University of California in Los Angeles forschte, den Streuvorgang fast vollständig mit Hilfe eines Prinzips namens Unitarität interpretieren konnten. Es beschreibt die Forderung, dass die Wahrscheinlichkeiten aller möglichen Ergebnisse sich auf 100 Prozent summieren müssen. Genau genommen geht es um die Quadratwurzel der Wahrscheinlichkeiten, aber das spielt hier keine besondere Rolle. Die Unitarität gehört auch schon zu Feynmans Methode, wird dort aber durch die komplizierten Berechnungen verdeckt. Unser Verfahren stellt das Prinzip in den Vordergrund.

Die Unitaritätsmethode ist so erfolgreich, weil sie den direkten Gebrauch virtueller Teilchen vermeidet; die sind ja der Hauptgrund für die Unhandlichkeit der Feynman-Diagramme. Solche Teilchen haben sowohl reale als auch unechte Effekte. Letztere müssen sich per definitionem aus dem Endergebnis herauskürzen; sie sind mathematischer Ballast, den Physiker nur zu gern abwerfen.

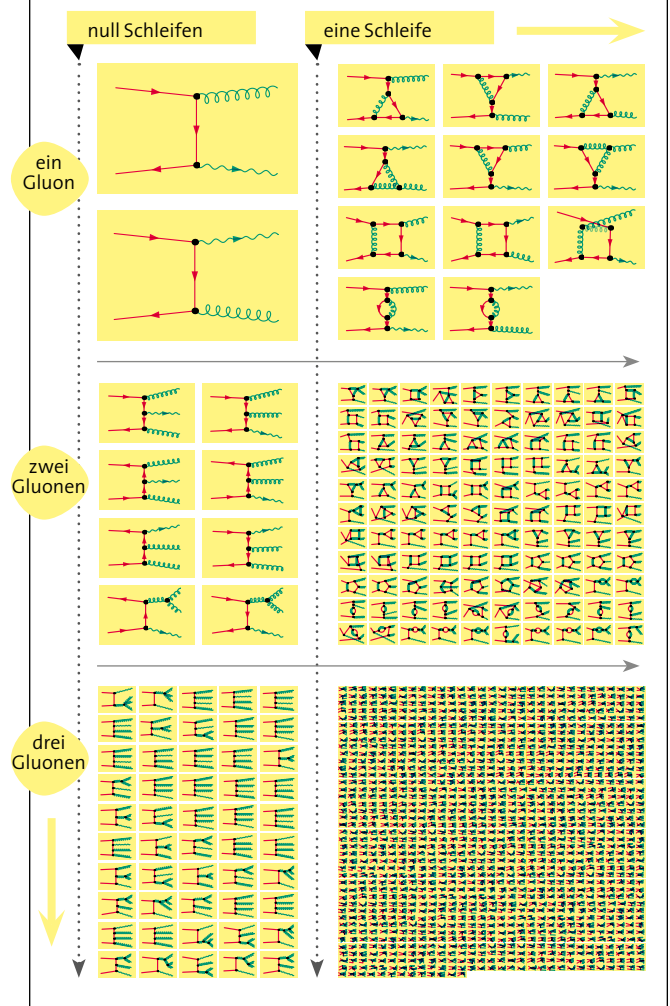
Um die Methode zu verstehen, vergleichen wir sie wie oben mit einem komplizierten Verkehrssystem wie der Londoner U-Bahn, mit jeweils mehreren möglichen Verbindungen zwischen den Stationen. Angenommen, wir suchen die Wahrscheinlichkeit dafür, dass eine Person, die bei Mile End eingestiegen ist, die U-Bahn bei Wimbledon verlässt. Das Feynman-Verfahren summiert die Wahrscheinlichkeiten aller möglichen Wege: nicht nur der Schienenstrecken, sondern auch jener durch natürliches Felsgestein ohne U-Bahn-Linien oder Tunnel. Diese unrealistischen Wege entsprechen den Beiträgen, die von den Schleifen der virtuellen Teilchen stammen. Sie heben sich zwar am Ende auf, aber bei den Zwischenstufen der Berechnung müssen wir sie alle berücksichtigen. Beim Unitaritätsansatz betrachten wir nur sinnvolle Pfade. Wir berechnen die Wahrscheinlichkeit, dass eine Person einen bestimmten Weg wählt, indem wir das Problem unterteilen: Mit welcher Wahrscheinlichkeit geht die Person an jedem Punkt der Fahrt durch dieses Drehkreuz, nimmt diesen oder jenen Fußweg? Diese Vorgehensweise schränkt das Ausmaß der Berechnungen drastisch ein.

Die Entscheidung zwischen Feynman-Verfahren und Unitaritätsmethode ist keine Frage von richtig oder falsch. Beide drücken dieselben physikalischen Grundprinzipien aus. Beide führen letztlich zu denselben Wahrscheinlichkeitswerten. Doch sie stellen unterschiedliche Beschreibungsebenen dar. Ein einzelnes Feynman-Diagramm unter den zehntausenden, die für eine unübersichtliche Kollision erforderlich sind,

gleichet einem Wassermolekül in einem Tropfen. Im Prinzip könnte man das Verhalten einer Flüssigkeit bestimmen, indem man sämtliche Moleküle einzeln verfolgt, aber das wäre höchstens für ein mikroskopisch kleines Tröpfchen sinnvoll. Normalerweise ist das nicht nur mühsam, sondern vielleicht auch gar nicht aufschlussreich. Wenn Wasser etwa einen Hügel hinabfließt, geht das aus der molekularen Beschreibung kaum hervor. Besser betrachtet man Eigenschaften einer höheren Beschreibungsebene wie Strömungsgeschwindigkeit, Dichte und Druck (siehe »Komplexität und Emergenz« von Michael Springer in diesem Heft ab S. 48). Ebenso können Physiker nun eine Teilchenkollision ganzheitlich betrachten, statt sie Stück für Stück aus separaten Feynman-Diagramm-

## Wo Feynman versagt

**Jedes Feynman-Diagramm** stellt auf anschauliche Weise eine mögliche Wechselwirkung zwischen Teilchen dar. Doch es gibt unzählig viele andere Möglichkeiten. Eine Wechselwirkung zwischen zwei Quarks kann mehr als ein Gluon erzeugen oder mehr als eine virtuelle Teilchenschleife enthalten – oder beides. Die Berechnungen werden rasch undurchführbar.



ZU BERN, LANCE E. DIXON, DAVID A. BOSCHER UND HARALD TA

men zu rekonstruieren. Wir konzentrieren uns auf die Eigenschaften, die den gesamten Prozess charakterisieren: die Unitarität sowie spezielle mit ihr zusammenhängende Symmetrien. In Sonderfällen vermögen wir sogar absolut präzise theoretische Vorhersagen zu treffen – was mit der Feynman-Methode unendlich viele Diagramme und unendlich lange Zeit erfordern würde.

Es gibt noch weitere Vorteile. Nachdem wir die Unitaritätsmethode für virtuelle Teilchenschleifen entwickelt hatten, fügten Ruth Britto, Freddy Cachazo, Bo Feng und Edward Witten am Institute for Advanced Study in Princeton (New Jersey) eine wichtige Ergänzung hinzu. Sie nahmen sich erneut die Baumdiagramme vor und berechneten die Wahrscheinlichkeit einer Kollision, an der beispielsweise fünf Teilchen beteiligt sind, mit Hilfe der Wahrscheinlichkeit einer Vierteilchenkollision mit anschließender Aufspaltung eines Teilchens in zwei Partikel. Das ist ein verblüffender Trick, denn eine Fünfteilchenkollision sieht normalerweise ganz anders aus als diese zwei aufeinander folgenden Vorgänge. Doch er zeigt: Komplizierte Teilchenprozesse lassen sich vielfach in einfachere Stücke unterteilen.

### Schmutzige Explosionen

Die Protonenzusammenstöße am LHC verlaufen besonders komplex. Feynman selbst verglich solche Experimente mit dem Versuch, das Innenleben von Schweizer Uhren zu ergründen, indem man sie paarweise zertrümmert. Protonen bestehen aus Quarks und Gluonen, die durch die starke Kraft zusammengehalten werden. Beim Zusammenstoß können Quarks von Quarks abprallen, Quarks von Gluonen, Gluonen von Gluonen. Quarks und Gluonen können sich in weitere Quarks und Gluonen aufspalten. Schließlich bilden sie zusammengesetzte Teilchen, die in schmalen Spritzern – so genannten Jets – aus dem Beschleuniger schießen.

Irgendwo in diesem Durcheinander könnte sich etwas völlig Unbekanntes verbergen – neue Partikel, neue Symmetrien, vielleicht sogar neue Dimensionen der Raumzeit. Doch wie will man das herausfinden? In unseren Detektoren sehen exotische Teilchen zunächst ziemlich normal aus. Die Unterschiede sind klein und unauffällig. Erst mit der Unitaritätsmethode können wir die herkömmliche Physik so präzise beschreiben, dass das Ungewöhnliche heraussticht.

Zum Beispiel kam Joe Incandela von der University of California in Santa Barbara, der gegenwärtig als Sprecher des CMS-Experiments mehr als 2000 CERN-Physiker vertritt, mit folgendem Problem zu uns. Sein Team sucht nach den exotischen Teilchen, aus denen die rätselhafte Dunkle Materie im Universum besteht. Falls der LHC solche Partikel erzeugt, könnte der CMS-Detektor sie nicht direkt identifizieren, sondern bloß einen gewissen Energieschwund fest-



stellen – doch der kann auch andere Gründe haben. Beispielsweise produziert der LHC häufig ein gewöhnliches Teilchen namens Z-Boson, das in einem Fünftel aller Fälle in zwei Neutrinos zerfällt. Auch diese verlassen wegen ihrer sehr schwachen Wechselwirkung den Detektor, ohne sich anders bemerkbar zu machen als durch einen scheinbaren Energieschwund. Die Frage ist: Wie lässt sich die Anzahl von Teilchen des Standardmodells vorhersagen, die sich im Detektor verhalten, als wären sie Partikel der Dunklen Materie?

Incandelas Gruppe machte einen Lösungsvorschlag: Man nehme die Anzahl der vom CMS-Detektor erfassten Photonen, schließe daraus auf die Anzahl der Ereignisse, bei denen Neutrinos entstehen, und prüfe, ob sie den Energieschwund restlos erklären. Andernfalls darf man schließen, dass der LHC Dunkle Materie erzeugt. Diese Idee ist typisch für die indirekten Schätzungen, auf welche die Experimentalphysiker immer dann angewiesen sind, wenn sie bestimmte Partikeltypen nicht direkt beobachten können. Doch dafür musste Incandelas Team präzise wissen, wie die Anzahl der Photonen mit jener der Neutrinos zusammenhängt; sonst versagt der Zugang durch die Hintertür.

Wir untersuchten das Problem mit Hilfe unseres neuen theoretischen Werkzeugs und stellten damit fest, dass die Genauigkeit ausreichte. Nun konnte das CMS-Team auf seine Technik vertrauen und zuverlässige Bedingungen für Dunkle-Materie-Teilchen definieren – unsere Methode hatte sich bewährt.

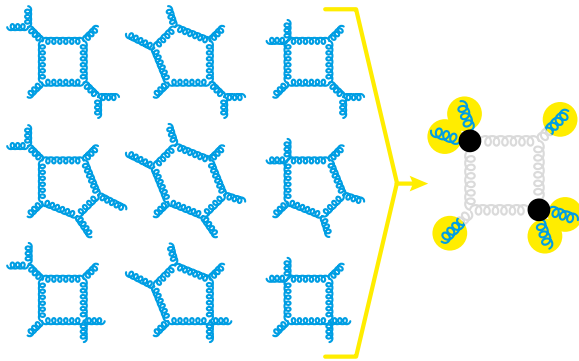
Dieser Erfolg ermutigte uns zu ehrgeizigeren Berechnungen. Wir arbeiten mit einer weltweiten Kollaboration von Teilchenphysikern zusammen, zu der Fernando Febres Cordero von der Simón-Bolívar-Universität in Caracas (Venezuela), Harald Ita von der Universität Tel Aviv (Israel), Daniel

**»Mit unserer Methode können wir die herkömmliche Teilchenphysik so präzise beschreiben, dass das Ungewöhnliche heraussticht«**

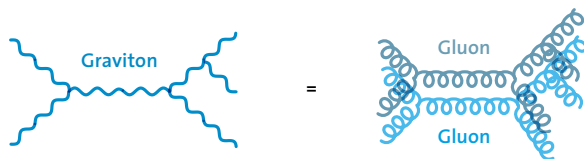


## Es geht auch einfacher

Die Autoren haben eine Alternative zu den Feynman-Diagrammen entwickelt – die Unitaritätsmethode. Sie nutzt Grundprinzipien der Quantentheorie, um mehrfache Feynman-Diagramme zusammenzufassen. Damit werden früher unmögliche Berechnungen durchführbar.



Die Methode hat physikalische Zusammenhänge aufgedeckt, die im Wust der Feynman-Diagramme versteckt lagen. Besonders überraschend: Es wird damit möglich, die Gravitation in die Beschreibung einzubeziehen. Die Partikel, welche die Gravitation übertragen – die Gravitonen –, zeigen auf einmal große Ähnlichkeit mit Gluonen. Mathematisch betrachtet verhält sich jedes Graviton wie zwei zusammengeschweißte Kopien eines Gluons.



ZVI BERN, LANCE J. DIXON, DAVID A. KOSOWER UND HARALD ITA

Maitre von der Durham University (England), Stefan HÖCHE vom Stanford Linear Accelerator Center in Menlo Park (Kalifornien) und Kemal Ozeren von der University of California in Los Angeles gehören. Gemeinsam machten wir exakte Vorhersagen für die Wahrscheinlichkeit, dass bei Kollisionen im LHC ein Neutrino paar und vier Jets entstehen. Mit Feynman-Diagrammen würde diese Rechnung sogar ein großes Physikerteam überfordern, das zehn Jahre lang modernste Computer einsetzt. Mit der Unitaritätsmethode brauchten wir dafür weniger als ein Jahr. Unterdessen hat die ATLAS-Kollaboration am LHC unsere Vorhersagen mit ihren Daten verglichen und beste Übereinstimmung festgestellt. Diese Resultate helfen den Forschern bei ihrer künftigen Suche nach neuen Teilchen.

Auch beim kürzlich erfolgten Nachweis des Higgs-Bosons spielte die Unitaritätsmethode eine wichtige Rolle. Ein Anzeichen für das Higgs ist die Erzeugung eines einzelnen Elektrons, zweier Jets und eines Neutrinos, wobei das Neutrino wiederum den Eindruck erweckt, Energie sei verloren gegan-

gen. Das Gleiche kann aber auch bei Teilchenreaktionen entstehen, an denen kein Higgs beteiligt ist. Mit der Unitaritätsmethode berechneten wir die exakte Wahrscheinlichkeit dieser täuschenden Reaktionen.

## Die störrische Schwerkraft

Sogar für ein Grundproblem der Physik verspricht die neue Vorgehensweise eine Lösung. Um eine völlig widerspruchsfreie Theorie aller Naturkräfte zu entwickeln, muss die Gravitation in einen quantenmechanischen Rahmen eingebaut werden. Die Quantenteilchen der Gravitation, die Gravitonen, sollten wie andere Partikel zusammenstoßen und gestreut werden. Dafür kann man im Prinzip Feynman-Diagramme zeichnen. Doch in den 1980er Jahren führten alle Versuche, die Gravitonenstreuung durch eine möglichst einfache Quantisierung der einsteinschen Theorie zu beschreiben, zu unsinnigen Resultaten – insbesondere zu unendlich großen Werten für endliche physikalische Größen. Das wäre an sich kein Problem: Auch im Standardmodell treten in den Rechnungen unterwegs Unendlichkeiten auf, doch am Ende heben sie sich auf. Bei der Gravitation schien das nicht zu funktionieren. Die Quantenfluktuationen der Raumzeit, vom amerikanischen Theoretiker John Wheeler (1911–2008) »Raumzeitschaum« getauft, geraten scheinbar völlig außer Rand und Band.

Eine mögliche Erklärung wäre, dass in der Natur unbekannte Teilchen vorkommen, welche die Quanteneffekte in Schranken halten. Diese Idee, die so genannte Supergravitation, wurde in den 1970er und 1980er Jahren intensiv erforscht. Das Interesse erlahmte, weil auch in dem Fall bei drei oder mehr virtuellen Teilchenschleifen unsinnige Unendlichkeiten auftauchten. Damit galt die Supergravitation als Fehlschlag.

Daraufhin wandten sich viele Theoretiker der Stringtheorie zu. Sie unterscheidet sich grundlegend vom Standardmodell. Partikel wie Quarks, Gluonen und Gravitonen sind nun nicht mehr winzige Punkte, sondern Schwingungen von eindimensionalen Saiten oder Strings. Die Wechselwirkungen zwischen den Teilchen konzentrieren sich nicht auf einen unendlich kleinen Punkt, sondern erstrecken sich über die Strings; das schließt Unendlichkeiten automatisch aus. Allerdings hat auch die Stringtheorie ihre Probleme; insbesondere macht sie keine eindeutigen Vorhersagen für beobachtbare Phänomene.

## Heilsame Verdoppelung

Mitte der 1990er Jahre versuchte Stephen Hawking von der University of Cambridge die Supergravitation zu rehabilitieren. Er argumentierte, die früheren Berechnungen hätten unzulässige Abkürzungen genommen. Doch Hawking konnte niemanden überzeugen, denn für die Abkürzungen gab es gute Gründe: Die vollständigen Rechnungen waren hoffnungslos umständlich. Um wirklich zu wissen, ob ein Feynman-Diagramm mit drei virtuellen Gravitonschleifen unendliche Werte erzeugt, müsste man  $10^{20}$  mathematische

Ausdrücke ausrechnen. Ein Diagramm mit fünf Schleifen liefert  $10^{30}$  Terme – ungefähr einen Ausdruck für jedes Atom eines LHC-Detektors. Das Thema schien in den Papierkorb für unlösbare Probleme zu gehören.

Die Unitaritätsmethode hat die Situation völlig verändert und die Supergravitation praktisch rehabilitiert. Eine Rechnung, die nach der Feynman-Methode  $10^{20}$  Terme lösen müsste, schaffen wir mit ein paar Dutzend Rechenschritten. Zusammen mit Radu Roiban von der Pennsylvania State University sowie mit John Joseph Carrasco und Henrik Johansson von der University of California in Los Angeles entdeckten wir, dass die Überlegungen aus den 1980er Jahren falsch waren. Vermeintlich unendliche Größen sind in Wirklichkeit endlich. Die Supergravitation erwies sich damit als nicht so unsinnig, wie die Physiker dachten. Das bedeutet konkret: Die Quantenfluktuationen der Raumzeit sind in der Supergravitation viel harmloser als früher angenommen. Wir möchten die kühne Spekulation wagen, dass eine Version dieser Theorie die lange gesuchte Quantengravitation darstellt.


Besonders bemerkenswert: Drei Gravitonen wechselwirken miteinander genau wie je zwei Kopien von drei miteinander wechselwirkenden Gluonen. Diese Doppelkopie-Regel gilt anscheinend unabhängig davon, wie viele Teilchen gestreut werden oder wie viele virtuelle Teilchenschleifen beteiligt sind. Das bedeutet, dass die Gravitation gleichsam das Quadrat der starken Kraft darstellt. Wir sind noch dabei, die abstrakte Mathematik in konkrete Physik zu übersetzen und zu prüfen, ob das unter allen Bedingungen gilt. Auf jeden Fall scheint sich die Gravitation wohl gar nicht so sehr von den anderen Naturkräften zu unterscheiden.

Ist die Supergravitation völlig frei von Unendlichkeiten? Oder zähmt ihre hochgradige Symmetrie nur einige ihrer Exzesse, solange wenige Schleifen im Spiel sind? Im letzteren Fall sollten bei fünf Schleifen Probleme auftauchen; von sieben Schleifen an würden die Quanteneffekte so stark, dass Unendlichkeiten entstünden. Bislang haben wir immerhin eine Wette unter Kollegen gewonnen, dass die Methode nicht nur für drei, sondern auch für vier Schleifen funktioniert. Der Teilchenphysiker und Stringtheoretiker David Gross (Nobelpreis 2004) von der University of California in Santa Barbara setzte nun eine Flasche kalifornischen Zinfandel darauf, dass bei sieben Schleifen Unendlichkeiten auftreten. Um diese zweite Wette zu entscheiden, haben einige von uns neue Rechnungen begonnen. Ein Sieg würde die Skeptiker vielleicht endgültig überzeugen, dass die Supergravitation widerspruchsfrei ist. Doch selbst dann erfasst die Theorie andere Effekte nicht; diese so genannten nichtstörungstheoretischen Beiträge sind so winzig, dass sie in unserem Ansatz nicht vorkommen. Für sie mag eine noch tiefergründigere Theorie zuständig sein – vielleicht die Stringtheorie.

## »Die Quantenfluktuationen von Raum und Zeit sind in der Supergravitation viel harmloser als früher angenommen«

Physiker stellen sich gern vor, dass neue Theorien aus den kühnen Pinselstrichen neuer Grundprinzipien hervorgehen – Relativitätstheorie, Quantenmechanik, Symmetrie. Doch manchmal entstehen solche Theorien auch durch sorgfältiges Überprüfen schon bekannter Prinzipien. Auf Grund einer stillen Umwälzung der Ansichten über

Teilchenkollisionen können wir jetzt feine Details des Standardmodells herausarbeiten und vermögen in neues physikalisches Terrain vorzudringen. Zusätzlich entdecken wir dabei einen vernachlässigten Aspekt

der alten Physik, der uns einen überraschenden Weg zur Vereinigung der Gravitation mit den anderen Kräften weist. In dieser Hinsicht gleicht der Versuch, die Geheimnisse der Teilchenstreuung zu lösen, nicht einer U-Bahnfahrt mit bereits vorgegebenem Ziel, sondern dem Aufbruch zu einer Reise voll unvorhergesehener Wendungen. 

### DIE AUTOREN



**Zvi Bern** (links) ist Physikprofessor an der University of California in Los Angeles. **Lance J. Dixon**, (Mitte) Pro-

fessor am Stanford Linear Accelerator Center in Menlo Park (Kalifornien), verbrachte 2011 ein akademisches Jahr am europäischen Forschungszentrum CERN bei Genf und beriet die Experimentalphysiker in der Anwendung der in diesem Artikel beschriebenen Theorien. **David A. Kosower** ist leitender Wissenschaftler am Forschungszentrum Saclay des französischen Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives.

### QUELLEN

- Berger, C. F. et al.:** Precise Predictions for W+4 Jet Production at the Large Hadron Collider. In: Physical Review Letters 106, Nr. 9, 2011
- Blau, S. K.:** Lovely as a Tree Amplitude: Hidden Structures Underlie Feynman Diagrams. In: Physics Today 57, S. 19–21, 2004
- Kaiser, D.:** Physics and Feynman's Diagrams. In: American Scientist 93, S. 156–165, 2005
- Stelle, K.:** Supergravity: Finite after All? In: Nature Physics 3, S. 448–450, 2007

### LITERATURTIPP

**Feynman, R. P.:** QED: Die seltsame Theorie des Lichts und der Materie. Piper, München 1992  
*Der Schöpfer der Feynman-Diagramme erläutert, wie sie in der Quantenelektrodynamik funktionieren.*

### WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1157698](http://www.spektrum.de/artikel/1157698)

# Farbenschillernder Nebel

Die Natur muss erst einmal Wassertröpfchen nach Größe sortieren, damit wir Farbeffekte in Nebelfahnen beobachten können.

VON H. JOACHIM SCHLICHTING



ALLE FOTOS DER DOPPELSEITE (SO FERN NICHT ANDERS ANGEZEIGT): H. J. SCHLICHTING

Stellen Sie sich vor, Nebel liegt über dem Land. Myriaden winziger Wassertröpfchen, 10, 20 oder 50 Millionstel Meter groß, schweben in der Luft und streuen Sonnenlicht verschiedenster Wellenlängen in alle Richtungen. Das Ergebnis ist eine triste, grauweiße Lichtmischung; jegliche Farbe der Landschaft scheint verschluckt.

Anders ist es, wenn sich Nebel in größeren Höhen unter weitgehend einheitlichen Bedingungen bildet. Dann besteht er aus etwa gleich großen Tröpfchen. Werden solche dünnen Wolken schließlich von Sonnen- oder Mondlicht durchquert, kann es zu eindrucksvollen Koronen kommen, also zu farbigen Ringsystemen, welche die leuchtenden Himmelskörper umgeben (siehe »Weihnachtliche Krönung«, SdW 12/2009, S. 35).

Um solche Phänomene zu sehen, müssen Sie gar nicht warten, bis sich am Himmel etwas tut. Wenn Sie bei tief ste-

**Die zumeist weißen Nebelschwaden über einer Tasse heißem Tee werden unter bestimmten Umständen zeitweise von feinen Farbstrahlen durchwirkt.**

hender Sonne, etwa am frühen Morgen, auf Ihrer Terrasse heißen Tee oder Kaffee trinken und in die von der Tasse aufsteigende, lichtdurchflutete Nebelfahne blicken, können Sie auch darin Fetzen farbigen Lichts entdecken (Foto links). Noch bunter geht es auf der Oberfläche des Getränks zu (rechts unten).

Diese farbigen Erscheinungen sind keineswegs selbstverständlich, schließlich setzen sie gleiche Tröpfchengrößen voraus. Schauen wir uns also genauer an, was passiert. Dass sonnenbeschienene Wassertröpfchen weißes Licht in Farbringe zerlegen, wird Sie nicht verwundern. Denn die winzigen Tröpfchen beugen das auftreffende Licht. Man kann sich das so vorstellen, dass eine Lichtwellenfront einer bestimmten Frequenz am Rand eines Tropfens neue Lichtwellen auslöst – so genannte Elementarwellen –, die sich dann in unterschiedliche Richtungen ausbreiten.

Überlagern sich zwei von unterschiedlichen Punkten eines Tropfens kommende Lichtwellen auf der Netzhaut des Auges oder auf dem Sensor der Kamera, haben sie im Allgemeinen einen geringfügig unterschiedlichen Weg zurückgelegt. Die Folge ist eine so genannte Phasendifferenz: Wellenberge und Wellentäler sind gegeneinander verschoben. Je nach Größe der Phasendifferenz können sich die Wellen

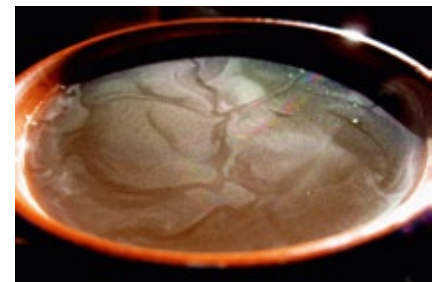
Aber als ich den Tee aufgoss,  
waren schon die Möglichkeiten,  
ungeheuer, wieder vergessen;  
im quirlenden Dampf verfieng  
sich mein Blick, bis er verschwand, ...

*Henning Ziebritzki (\*1961)*

verstärken oder auch auslöschen. Im ersteren Fall werden die zugehörigen Farben verstärkt, im letzteren verschwinden sie. So oder so entsteht durch diese Interferenz farbiges Licht.

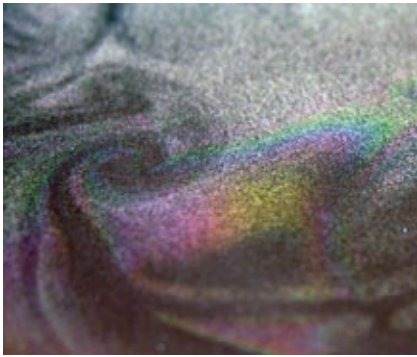
Die ringförmige Struktur der Farben verdankt sich dabei der Kugelsymmetrie der Tröpfchen. Man kann sich für jede Farbe oder Wellenlänge einen Kegel vorstellen, dessen Spitze in unser Auge weist. Licht einer bestimmten Wellenlänge wird dann von allen Tröpfchen aus, die auf dem Kegelmantel sitzen, in das Auge gelangen, so dass wir einen farbigen Kreis wahrnehmen. Doch nur dann, wenn viele ungefähr gleich große Tröpfchen von weißem Licht durchstrahlt werden, addieren sich die Intensitäten des gebeugten Lichts, und es entsteht tatsächlich ein gut sichtbares Ringsystem – sonst bleibt der Nebel grau.

In den turbulenten Nebelschwaden über dem Tee verändern sich die Farbstrahlen ständig. Einheitliche Be-



**Konvektionsvorgänge in der Flüssigkeit lassen schwebende Tröpfcheninseln entstehen. Die Größe der Tröpfchen darin ist mehr oder weniger identisch – Voraussetzung dafür, dass die Inseln in bunten Farben schimmern.**





Die Farbstreifen in den Tröpfcheninseln sind in ständiger Bewegung, weil die Tröpfchen durch Luftbewegungen immer wieder verwirbelt werden.

Um das an der Flüssigkeit reflektierte Sonnenlicht bildet sich eine Korona, wenn man die Tasse aus etwas größerem Abstand betrachtet.



WILFRIED SUHR

dingungen, unter denen sich gleich große Tröpfchen bilden könnten, liegen ganz offensichtlich immer nur kurzfristig vor. Anders ist es bei den Tröpfchen, die schwebende Inseln über der Oberfläche des Tees formen (oben). Denn dank eines subtilen Selektionsprozesses besitzen sie alle etwa dieselbe Größe.

### Wassertröpfchen werden in der Schweb gehalten

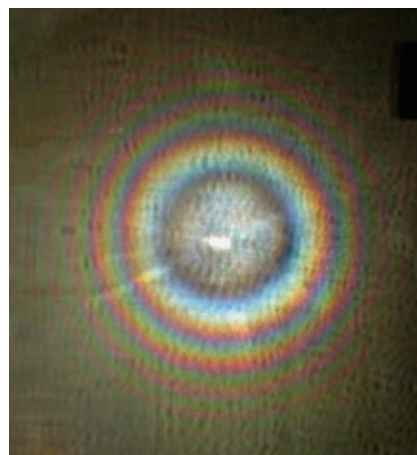
Dieser Prozess verläuft so: An der Grenze zwischen heißer Wasseroberfläche und vergleichsweise kalter Luft bildet sich Wasserdampf und steigt so schnell auf, dass die Strömung schon in geringer Höhe turbulent wird. Grund für die starke Beschleunigung der Moleküle ist vor allem die Wärme, die frei wird, wenn ein Teil des heißen Dampfes in der kälteren Luft gleich wieder zu winzigen Wassertröpfchen kondensiert. Diese werden dann als Nebel sichtbar und helfen uns, die schnelle Bewegung des unsichtbaren Dampfes zumindest indirekt zu verfolgen.

Normalerweise entstehen die Tröpfchen in unterschiedlichen Größen. Die größeren und damit schwereren fallen sofort wieder in das Getränk zurück, die kleineren entweichen in den sichtbaren Nebelfahnen. Dazwischen gibt es Tröpfchen, die genau das richtige Gewicht haben, um von dem aufsteigenden Dampfstrom getragen und in der Schweb gehalten zu werden.

Diese treibenden Tröpfcheninseln sorgen nicht nur für die beeindruckenden Farben, sondern verraten uns auch etwas über die Dynamik an der Ober-

fläche des Getränks. Denn sie sind voneinander durch schmale Grenzbereiche getrennt, durch die wir direkt die dunkle Oberfläche des Tees sehen. Die Tröpfcheninseln schweben nämlich genau über jenen Oberflächenbereichen, in denen heiße Flüssigkeit aufsteigt, sich abkühlend zu den Rändern hinbewegt und schließlich – kühler, also wieder schwerer geworden – erneut absinkt. Sie reichen also nur bis zu jenen Orten, über denen mangels Wärmeenergie kein Dampf und damit auch kein Nebel mehr entsteht.

Noch verstärkt wird diese Konvektion übrigens durch die mit der Temperatur variierende Oberflächenspannung. Heißes Wasser besitzt eine geringere als kaltes; es kann also energetisch



Eine Korona mit ausgeprägten Ringstrukturen kann sich auch dann zeigen, wenn man eine entfernte Lichtquelle durch eine mit kleinen Wassertröpfchen beschlagene Scheibe betrachtet. Die dunkle Sprenkelung ist Folge der Materialstruktur der Scheibe.

günstiger sein, die kühlere Oberfläche durch eine heißere zu ersetzen. Auch aus diesem Grund breitet sich die aufsteigende heiße Flüssigkeit in Richtung auf die kühlen Ränder aus.

Am Ende unternehmen wir noch ein kleines Experiment mit unserer Teetasse. Lassen wir das Sonnenlicht so auf die Oberfläche des Tees fallen, dass es eine möglichst ausgedehnte Tröpfcheninsel durchstrahlt, und blicken aus etwas größerem Abstand darauf (oben rechts). So wird die Verwandtschaft des Farbenspiels über dem Tee mit den Lichterscheinungen um Sonne und Mond offensichtlich, denn jetzt setzen sich auch die vereinzelt Farbfetzen über dem Tee zu einer veritablen Korona zusammen. ~

### 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.

### LITERATURTIPP

**Suhr, W., Schlichting, H.J.:** Quételet's Fringes Due to Scattering by Small Spheres Just Above a Reflecting Surface. In: Applied Optics 48, S. 4978–4984, 2009

### WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1157703](http://www.spektrum.de/artikel/1157703)

# Komplexität und Emergenz

Zwei riskante Begriffe: Sie dienen der kompakten Beschreibung unübersichtlicher Systeme und ihres oft sprunghaften Verhaltens. Doch dabei läuft man Gefahr, die Zusammenhänge zu vernebeln. Ein Beispiel aus der Physik könnte zur Klärung beitragen.

Von Michael Springer

»Je näher man ein Wort ansieht,  
desto ferner sieht es zurück«

Karl Kraus

Von einem Augenblick zum anderen verlor einer meiner Freunde vor einiger Zeit fast völlig seine kognitiven Fähigkeiten. Sprachlos schaute er um sich wie ein Raumfahrer in einem Sciencefiction-Roman, der plötzlich auf einen fremden Planeten gebeamt worden ist, oder wie ein Säugling im Kinderwagen, der die großen Köpfe grinsender Erwachsener anstarrt, die sich bedrohlich nähern.

Mein Freund litt an Herpes-Enzephalitis. Monatelang verlor er einen Großteil seines Gedächtnisses und der Sprechfähigkeit. Heute, da er sich fast vollständig erholt hat, spricht er von jener Zeit als einer vollkommenen Leere, einem traumlosen Schlaf, aus dem er plötzlich erwachte. Anscheinend lebte er während seiner Krankheit nur im Hier und Jetzt, ohne Vergangenheit oder Zukunft. Seine kognitiven Fähigkeiten muteten geringer an als die von vielen Tieren. Wenn er

eine Mahlzeit bekam, schien er zu überlegen, was er damit anfangen sollte; einige Zeit lang musste man ihn füttern. Nur seine Reflexe funktionierten: Er öffnete seinen Mund für den sich nähernden Löffel, und er schluckte das Essen.

## Simplify your Life!

In gewisser Weise vereinfachte die Enzephalitis das Leben meines Freundes radikal; sie reduzierte es auf elementare Tatsachen ohne Struktur, das heißt ohne die geringste Komplexität. Vielleicht umfasste seine Erfahrung wenigstens ein paar kurzlebige separate »Dinge« wie Löffel, fremde Personen und trinkbare Flüssigkeiten, aber diese Objekte waren nicht hierarchisch strukturiert. Statt eine Welt als ein komplexes Gebäude mit vielen Stockwerken zu bilden, lagen sie umher wie lauter Ziegel auf einer grenzenlosen Ebene.

Was meinem Freund sichtlich fehlte, war die Gabe der Erinnerung. In »Der logische Aufbau der Welt« versuchte der logische Empirist Rudolf Carnap (1891–1970) im Jahr 1928, die Welt aus möglichst einfachen Bausteinen zu rekonstruieren – aus »Elementarerlebnissen« und einer einzigen »Ähnlichkeitsrelation«. Mein Freund war während seiner Krankheit sicher nicht fähig, auf diese Weise eine strukturierte Welt aufzubauen; da sein Gedächtnis nicht richtig arbeitete, konnte er keine kohärenten Ähnlichkeiten zwischen seinen Erfahrungen etablieren.

Doch in einem praktischen Sinn wurde das Leben meines Freundes durch das Fehlen eines ähnlichkeitsbildenden Gedächtnisses immens kompliziert. Allein gelassen wäre er gestorben. Er brauchte Hilfe: Die komplizierten Handlungen von Ärzten, Krankenpflegern und Freunden mussten die fehlende Komplexität seiner strukturell »flachen« Welt ausgleichen.

Übrigens entspricht diese Situation ziemlich genau derjenigen eines buddhistischen Bettelmönchs, der völlige Erleuchtung erreicht hat. Ihm erscheinen alle Lebensstatsachen als gleichermaßen (un)wichtig; er bleibt untätig und überlebt nur, solange Mitmenschen ihn mit Kleidung und Nahrung versorgen.

## AUF EINEN BLICK

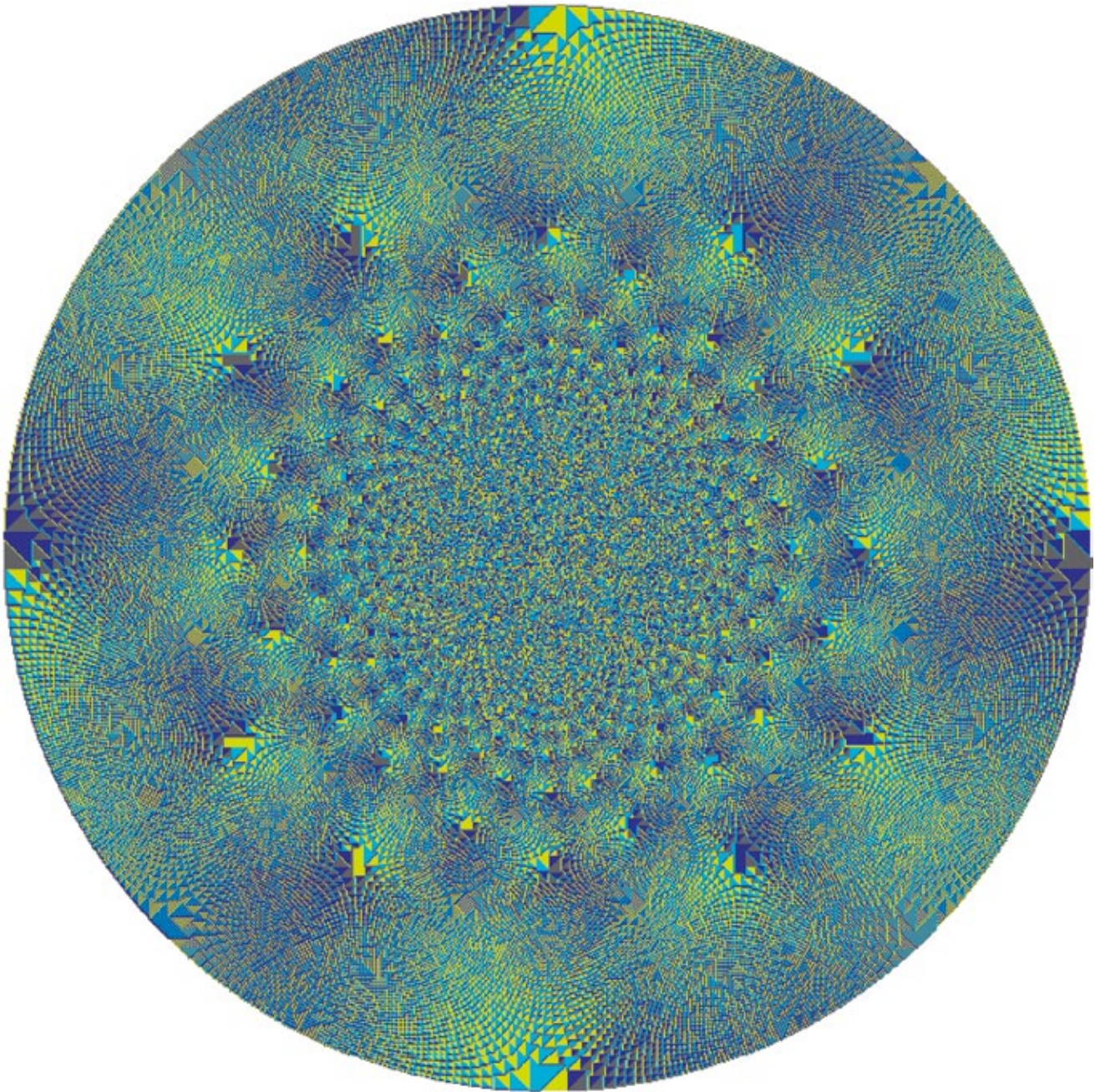
### ÜBERRASCHENDE NEUE EIGENSCHAFTEN

**1** Auf den ersten Blick ist die Welt verwirrend komplex. Mit Modellen versuchen Wissenschaftler, die **Komplexität zu reduzieren**. Dabei erweisen sich unterschiedliche Beschreibungsebenen als nützlich – etwa die statistische Betrachtung von Gasatomen, um makroskopische Wärmephänomene zu erklären.

**2** Beim Wechsel zwischen den Ebenen tauchen – durch so genannte **Emergenz** – oft ganz neue Eigenschaften auf. So hat die Zeit in der statistischen Thermodynamik eine Richtung, während die Bewegung jedes einzelnen Atoms reversibel abläuft.

**3** Komplexität und Emergenz sind sehr allgemeine **Systemeigenschaften**, die aber für sich genommen noch nichts erklären.





MIT FRODL GEN VON JAMES PROPP UND ED PEGG, JR. (MATHPUZZLE.COM)

Die »Goldbug-Variationen« führen vor, wie aus einer einfachen Regel eine überraschend komplexe Struktur entstehen kann. Denken Sie sich ein feines Quadratgitter in der Ebene; zu jedem Quadrat gehört ein winziger Wegweiser, wobei anfangs alle ostwärts zeigen. Nun werden im Zentrum nacheinander zahlreiche Käfer (»bugs«) ausgesetzt. Jeder Käfer dreht dort den Wegweiser um 90 Grad gegen den Uhrzeigersinn, folgt der Richtung zum nächsten Gitterpunkt, tut dort das Gleiche und so weiter – bis er auf dem ersten freien Platz zur Ruhe kommt. Mit der Zeit entsteht ein kompliziert gemusterter Kreis; die Farben bezeichnen Stellungen der Wegweiser.

Entgegen der Wortbedeutung macht Komplexität die Dinge also im täglichen Leben einfacher. Wir brauchen sie, um unser praktisches Wissen zu organisieren und zu simplifizieren. In den meisten Fällen wäre es unnötig – und würde bloß Verwirrung stiften –, sämtliche elementaren Aspekte der Dinge, mit denen wir hantieren, im Auge zu behalten. Wir strukturieren unsere Erfahrung, indem wir Modelle konstruieren, die so einfach sind wie möglich und so komplex wie

nötig. Bei dem Versuch, sie anzuwenden, wissen wir: Jedes Modell, so komplex es auch sein mag, ist weniger kompliziert als die Wirklichkeit, der es gerecht zu werden versucht – wahrscheinlich unendlich viel weniger.

Wir könnten dies mit dem Satz ausdrücken: »Die Realität ist unendlich komplex.« Diese scheinbar metaphysische Aussage ist in der Tat ganz sinnvoll. Sie bedeutet einfach erstens, dass jedes praktikable Modell weniger komplex sein





**Der Positivist Ernst Mach ließ nur Sinneseindrücke als Grundlage empirischen Wissens gelten. Für ihn waren deshalb Atome nicht real, sondern hatten bloß als »denk-ökonomische« – Komplexität reduzierende – Gedankenkonstruktionen eine gewisse Berechtigung.**

muss als die Dinge, die es modelliert; und zweitens, dass niemand vorher wissen kann, ob und wann dieses Modellbauen je zu einem Ende kommen wird. Somit reduziert jedes komplexe Modell die reale Komplexität, vereinfacht dadurch die Dinge und erleichtert das Leben.

### **Komplexitätsreduktion in der Wärmelehre**

Vor erstaunlich kurzer Zeit debattierten die Physiker noch, ob es überhaupt Atome gibt. Der österreichische Philosoph und Physiker Ernst Mach (1838–1916) war beispielsweise ein überzeugter Positivist und Sensualist. Er glaubte nur an »positiv« – empirisch bestätigte – Sinnesdaten und betrachtete jede Aussage über Dinge, die sich jenseits unserer Anschauung in einer objektiven Realität aufhalten sollen, als pure Metaphysik, das heißt Unsinn. Da sich zu seiner Zeit niemand ein Mikroskop vorstellen konnte, das einzelne Atome sichtbar macht, wurde er unweigerlich wütend, wenn jemand Atome erwähnte, und pflegte zu höhnen: »Ham's eins g'sehn?«

Machs Landsmann und Kollege Ludwig Boltzmann (1844–1906) war hingegen überzeugter Atomist und Mitbegründer der statistischen Thermodynamik, einer Theorie der Wärme, die von atomaren Bewegungen ausgeht.

Wie gesagt – damals war es unmöglich, einzelne Atome zu beobachten, geschweige denn ihre Orte und Geschwindigkeiten zu messen. Heutzutage könnten wir das im Prinzip erreichen. Doch selbst kleine makroskopische Objekte oder Gasmenge enthalten so viele Atome, dass nicht einmal ein moderner Supercomputer sie alle zu verfolgen vermag. Es ist aber auch gar nicht nötig, sämtliche einzelnen mikroskopischen Teilchen zu beobachten, um zu beschreiben, wie sich das makroskopische Objekt verhält, das aus ihnen besteht. Wenn Wasser auf dem Herd steht, bewegen sich die Wassermoleküle immer rascher, und die schnellsten entkommen als Dampf. Im Alltag halten wir uns – genau wie die Experimentalphysiker zu Zeiten Machs und Boltzmanns – nicht damit auf, einzelne Wasserpartikel zu beobachten. Wir messen einfach mit dem Thermometer, dass das Wasser sich erwärmt, und wir können zusehen, wie es zu verdampfen beginnt und schließlich bei 100 Grad Celsius kocht.

Mit der Theorie der Thermodynamik machten Physiker wie Boltzmann gewissermaßen aus der Not unseres mangelnden Wissens über das Schicksal jedes einzelnen Atoms in einem Gas eine Tugend, indem sie große Teilchenmengen statistisch beschrieben. Was bedeutet Temperatur? Sie ist ein Maß für die mittlere kinetische Energie der Teilchen: Je höher diese Energie, desto wärmer das Gas, und umgekehrt. Was ist Druck? Die Kraft der Teilchen (pro Flächeneinheit), welche die Wand des Gasbehälters bombardieren. So entsteht oder »emergiert« der makroskopische Zustand eines Systems – charakterisiert durch Volumen, Temperatur und Druck – aus der statistischen Beschreibung des mikroskopischen Systemzustands, der durch Ort und Geschwindigkeit jedes Einzelteilchens definiert ist.

Und was ist mit der Entropie, dem faszinierendsten Begriff der Thermodynamik? Die Wärmelehre, die zunächst zur Beschreibung der Dampfmaschine, des Motors der industriellen Revolution, diente, hatte die Entropie als ein Maß für die Dissipation der thermischen Energie eingeführt: Wenn wir Wärme verwenden, um Bewegung zu erzeugen, zum Beispiel einen Motor anzutreiben, geht unweigerlich ein Teil der Wärmeenergie an die Umgebung verloren. Die Entropie nimmt damit zu.

Doch nun definierte Boltzmann die Entropie atomistisch – als den Logarithmus der Anzahl aller mikroskopischen Zustände eines Systems, die denselben makroskopischen Zustand ergeben. Somit besagt die Entropie, wie viele unterschiedliche Konfigurationen sämtlicher winzigen Teilchen als makroskopisch gleich zu betrachten sind, da sie ein und demselben Gesamtzustand des Systems entsprechen. Zum Beispiel würde es keinen Unterschied machen, wenn wir zwei Gaspartikel vertauschten und jedes sich wie das jeweils andere verhielte. Ganz allgemein könnten wir die Orte und Geschwindigkeiten mehrerer Teilchen auf viele subtile Arten so verändern, dass das Gesamtbild nicht beeinflusst würde. Der Logarithmus der Anzahl all dieser mikroskopischen Möglichkeiten ergibt die Entropie des großen Systems. Dass wir hier den Logarithmus einsetzen und nicht die Anzahl selbst, hat technische Gründe. Er garantiert, dass die Entropie sich additiv verhält: Die Gesamtentropie eines Systems,



**In seinem Werk »Der logische Aufbau der Welt« versuchte der Philosoph Rudolf Carnap, den gesamten Gegenstandsbereich der Naturwissenschaften aus elementaren Sinneserlebnissen und einer einzigen Relation zu konstruieren – der Ähnlichkeit zwischen Elementarerlebnissen. Diese Basis erwies sich aber als zu schmal für die wissenschaftliche Praxis.**

das aus zwei Teilen zusammengefügt wird, ist die Summe der Entropien der Teilsysteme.

Diese abstrakte Definition der Entropie wird oft als »Unordnung« veranschaulicht: Das Wachstum der Entropie entspricht wachsender Unordnung. Beispielsweise kann ein homogen verteiltes Gas, das ein Volumen im thermischen Gleichgewicht erfüllt, viel mehr mikroskopisch äquivalente Zustände haben als dasselbe Gas, wenn es in einer Ecke desselben Volumens konzentriert ist oder eine Geschwindigkeitsverteilung fern vom Gleichgewicht besitzt. Im ersteren Fall sind Entropie und »Unordnung« hoch, im letzteren niedrig.

## Die Emergenz der Zeit

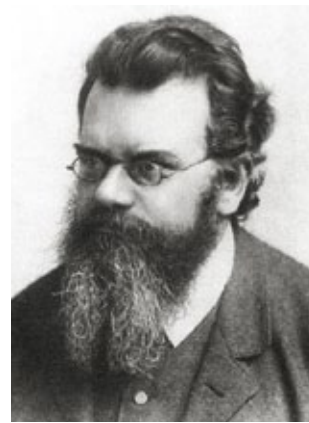
Oben wurde en passant behauptet, dass der makroskopische Systemzustand aus mikroskopischen Zuständen »emergiert« – soll heißen daraus entsteht, auftaucht oder herauskommt, eben durch so genannte Emergenz. Soweit es die makroskopischen Größen Volumen, Temperatur und Druck betrifft, mutet deren Emergenz freilich eher primitiv an: Eine riesige Anzahl von mikroskopischen Größen wird statistisch zu drei Makrogrößen komprimiert. In diesem Fall reduziert die Emergenz die Komplexität des Verhaltens vieler Atome dadurch, dass sie deren Durchschnittsverhalten charakterisiert – aber ist das nicht eine enttäuschende Transformation? Unter Emergenz versteht man in der Regel etwas, das komplexe Phänomene nicht bloß vereinfacht, sondern auch Neues erzeugt; Emergenz sollte aus einem komplexen System nach gängigem Verständnis »mehr als die Summe seiner Teile« machen, nicht weniger!

Zu Gunsten der »emergenten« Größen Volumen  $V$ , Temperatur  $T$  und Druck  $p$  könnte man immerhin anführen, dass sie der makroskopischen Zustandsgleichung für ideale Gase  $p \cdot V = \text{const.} \cdot T$  genügen, welche sich mit Hilfe der oben erwähnten statistischen Interpretation dieser Größen leicht auf die Stoßbewegungen mikroskopischer Gaspartikel zurückführen lässt. Doch das echte Wunder der Emergenz wird erst durch die Entropie vollbracht. Bekanntlich hängt diese makroskopische Größe nicht nur mit der Unordnung eines Zustands zusammen, sondern vor allem mit seiner Wahrscheinlichkeit: Je mehr mikroskopische Zustandsmöglichkeiten ein makroskopischer Zustand birgt, desto wahrscheinlicher ist er. In jedem sich selbst überlassenen System ist Unordnung wahrscheinlicher als Ordnung; darum tendieren abgeschlossene Systeme von Natur aus zu Unordnung und höherer Entropie.

Diese Entwicklungsrichtung – ausgedrückt im Zweiten Hauptsatz der Thermodynamik, der postuliert, dass die Entropie abgeschlossener Systeme niemals abnimmt – erzeugt in der Tat etwas Neues: Sie führt in die Physik den Zeitpfeil ein. Die Tatsache, dass Vergangenheit und Zukunft nicht das Gleiche sind, »emergiert« aus der statistischen Beschreibung komplexer Mikrosysteme.

Das ist wirklich bemerkenswert. Der Fortgang der Zeit emergiert aus der Statistik! Als Boltzmann seine Theorie

**Der Physiker Ludwig Boltzmann entwickelte eine Theorie der Wärme, die auf der statistischen Beschreibung mikroskopischer Atombewegungen beruhte. Insbesondere seine Deutung der Entropie war seinerzeit umstritten, weil sie den Zeitpfeil aus der Statistik reversibler Prozesse herleitete.**



formulierte, schüttelten prominente Kollegen den Kopf. Bleiben nicht alle physikalischen Grundgleichungen unverändert, wenn man die Zeitrichtung umkehrt? Der Lauf der Planeten, die Wurfbahn eines Steins, die Kollision von Billardkugeln – all das kann sich zeitlich umgekehrt entwickeln, ohne ein physikalisches Gesetz zu verletzen. Sämtliche mikrophysikalischen Wechselwirkungen der Gaspartikel, wenn man sie sich vereinfacht als winzige Billardkugeln vorstellt, sind reversibel; aber als statistisches Ensemble benehmen sie sich irreversibel!

Kein Wunder, dass das für Boltzmanns Zeitgenossen schwer zu verdauen war. Durch eine statistische Beschreibung, welche die komplexen Interaktionen unzähliger Partikel radikal vereinfacht, emergiert unsere sich irreversibel von der Vergangenheit zur Zukunft entwickelnde Makrowelt aus einer ganz und gar reversiblen Mikrowelt. Wenn wir dieses innerphysikalische Beispiel kühn verallgemeinern, können wir nun Emergenz definieren als die Erzeugung einer qualitativ neuen Eigenschaft durch Reduktion von Komplexität.

Wie das Beispiel illustriert, liegt die emergente Eigenschaft näher bei unserer konkreten Alltagserfahrung als das System, aus dem sie entsteht. Unser Leben geht zeitlich vor sich; wir erinnern uns an die Vergangenheit und wissen nicht, was die Zukunft bringen mag. Vor unseren Augen spielen sich niemals vollkommen reversible Prozesse ab; sie sind Abstraktionen, Idealisierungen. Philosophisch gesprochen – und angelehnt an eine Bemerkung von Karl Marx (1818–1883) aus seiner »Einleitung zur Kritik der Politischen Ökonomie« über den Fortgang des Wissens über komplexe Wirtschaftssysteme – können wir formulieren: Emergenz steigt auf vom Abstrakten zum Konkreten.

## Wie real ist die Emergenz?

Was könnte realer sein als eine »konkrete« Tatsache der Alltagserfahrung wie der Zeitpfeil? Doch da emergente Eigenschaften aus der Reduktion komplexer Systeme hervorgehen, könnte man umgekehrt argumentieren, nur diese komplexen Systeme seien real, die Emergenz hingegen nicht. Das wäre der radikal reduktionistische Standpunkt. In der Tat



Der Chemiker Ilya Prigogine (Nobelpreis 1977) zog weitreichende Folgerungen aus seinen Forschungen über die Thermodynamik komplexer Systeme fern vom Gleichgewicht. Er postulierte einen Paradigmenwechsel der Physik »vom Sein zum Werden«.

betrachten theoretische Physiker, die sich mit Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie befassen und sie mit der Quantenmechanik zu einer »Theorie von Allem« namens Quantengravitation vereinen möchten, die Zeit bloß als die vierte Koordinate der Raumzeit; sie beschreiben die Welt als ein vierdimensionales »Blockuniversum«, das einfach da ist. Was wir als Entwicklung erleben, ist das, was geschieht, wenn wir uns längs der Zeitkoordinate bewegen; in der Realität als Gesamtheit steht alles für immer fest. In diesem Sinn betrachtete schon Einstein die Zeit als Illusion.

Paradoxaerweise neigen wir dazu, eine Tatsache des Lebens umso mehr als »Illusion« zu betrachten, je besser wir die betreffende Tatsache verstehen, das heißt, je mehr wir sie als emergent zu erklären vermögen. Das ist seit Kurzem bei Bewusstseinsphänomenen der Fall; offensichtlich beruht die reduktionistische Deutung mentaler Phänomene auf dem Fortschritt von Hirnforschung und Neurowissenschaft. Wenn in den berühmten Experimenten des amerikanischen Physiologen Benjamin Libet (1916–2007) die Versuchsperson beschließt, zu einem bestimmten Zeitpunkt einen Finger zu bewegen, während zugleich ihre Hirntätigkeit zeitlich genau verfolgt wird, so reduziert dies den Entscheidungsprozess auf neurophysiologische Wechselwirkungen – und unser »freier Wille« scheint als Illusion entlarvt zu werden. Bekanntlich fand Libet, das Gehirn werde sogar schon vor der bewussten Entscheidung des Probanden aktiv, doch dieses umstrittene Resultat verschärft nur noch die reduktionistische Wirkung derartiger Experimente.

Aber warum sollte es nötig sein, einen Begriff als »bloße Illusion« über Bord zu werfen, nur weil er sich wissenschaftlich erklären lässt – was eben stets bedeutet: Er kann auf etwas anderes reduziert werden? Wir sprechen weiterhin von Temperatur, obwohl wir wissen, dass es sich »nur« um atomare Zufallsbewegungen handelt; wir beschreiben und analysieren Gedanken und andere Bewusstseinsphänomene, obwohl sie »nichts als« neuronale Interaktionen sind; wir schätzen Lieder über Sonnenauf- und -untergänge, obwohl seit Jahrhunderten bekannt ist, dass die Bewegung der Sonne eine von der Erdrotation erzeugte Illusion ist.

Beispielsweise ist der »freie Wille« ein intuitiv überzeugendes, obgleich philosophisch seit jeher umstrittenes Konzept: eine ursachenlose Ursache für spontanes Handeln. Indem die Wissenschaft den physiologischen Hintergrund von bewussten Entscheidungen untersucht, zerstört sie das Konzept von absoluter Freiheit. In diesem Sinn erweist die Forschung den freien Willen als Illusion. Doch daraus folgt nicht, dass wir für unsere Taten nicht verantwortlich sind. Die Feststellung, dass alles, was wir entscheiden und tun, Ergebnis mikroskopischer – atomarer, chemischer, physiologischer – Prozesse ist, umschreibt ganz zu Recht den Bereich der einschlägigen Wissenschaften, aber davon abgesehen ist diese Aussage leer, unpraktisch, geradezu metaphysisch. Sie beschreibt nicht, geschweige denn erklärt das hochgradig emergente Phänomen, wie eine Person sich in einem moralischen Dilemma zwischen Richtig und Falsch oder »Gut« und »Böse« entscheiden muss.

Wie oben postuliert, ist die Realität komplex, sogar unendlich komplex. Doch daraus folgt nicht notwendig, dass jede Reduktion von Komplexität weniger real sein muss. Sie kann mehr oder weniger angemessen sein. Wir erkennen eine erfolgreiche Reduktion daran, dass sie einen traditionellen, vielleicht sogar vorwissenschaftlichen Begriff adäquat wiedergibt. Dieser mag seit unvordenklichen Zeiten in Gebrauch sein, wurde aber nie zuvor als emergente Qualität erkannt. Bei diesem Erkenntnisvorgang wird der traditionelle Begriff expliziert – das heißt erklärt, reduziert und modifiziert. Oft wird eine solche Neuinterpretation nicht gleich akzeptiert. Es kann Jahrzehnte oder gar Jahrhunderte dauern, bis sie sich etabliert hat, wie das bei kulturellem Wandel nun einmal üblich ist.

Zum Beispiel liegt es intuitiv nahe, sich selbst und andere als physische Körper zu betrachten, die von unsichtbaren Seelen bewohnt und gesteuert werden. Kinder entwickeln diese »Theory of Mind« spontan, und die meisten Kulturen und Religionen vertreten modifizierte Versionen davon. Die Wissenschaft vertreibt nun diesen Leib-Seele-Dualismus allmählich und entlarvt ihn als Illusion – doch wir werden gewiss fortfahren, mentale Phänomene als unterschiedlich von Körpervorgängen wie der Verdauung zu betrachten.

Eine solche angemessene, erfolgreiche Komplexitätsreduktion dürfen wir als Indiz für einen Fall von »wirklicher« Emergenz betrachten. Wenn die Beschreibung eines abstrakten komplexen Systems mittels Komplexitätsreduktion zu emergenten konkreten Eigenschaften führt, die wir zwar schon vorher kannten, aber bisher als unerklärliche Lebens-tatsachen betrachteten, dann haben wir echte Emergenz entdeckt.

### Was Komplexität nicht vermag

Da Komplexität und Emergenz sehr unscharfe Begriffe sind, wirken sie verführerisch: Sie scheinen das Versprechen einer einheitlichen Theorie für Strukturen und deren Entwicklung zu enthalten. Doch an sich haben diese Begriffe keine Erklärungskraft; sie bezeichnen nur Fälle von »qualitativem«



Wandel, wie den Phasenübergang von Flüssigkeit zu Gas am Siedepunkt.

Tatsächlich haben mit Komplexität zusammenhängende Ideen nicht die in sie gesetzte Hoffnung erfüllt, sie könnten als Grundlage einer allgemeinen Theorie der Natur dienen. In den 1980er Jahren trugen viele wissenschaftliche Aufsätze »Chaos« und »Fraktal« im Titel, und der belgische Chemienobelpreisträger Ilya Prigogine (1917–2003) propagierte einen Wandel der wissenschaftlichen Methodik »vom Sein zum Werden«. Er hatte chemische Prozesse fern vom thermischen Gleichgewicht analysiert und unterschiedliche Beispiele für das spontane Entstehen geordneter Strukturen beschrieben. In seinen späteren Jahren versuchte er eine allgemeine Theorie der Selbstorganisation zu schaffen, die Ameisenkolonien und menschliche Siedlungen einschließen sollte.

Der französisch-amerikanische Mathematiker Benoît Mandelbrot (1924–2010), der als Forscher für die Computerfirma IBM arbeitete, veröffentlichte 1982 ein bahnbrechendes Buch über die »fraktale Geometrie der Natur«. In den 1980er Jahren wurden Personalcomputer zum Allgegenwart, und nun konnte man damit faszinierende Bilder von Reisen durch die unendlichen »selbstähnlichen« Details der berühmten Mandelbrotmenge erzeugen. Fraktale Mengen schienen die passende Mathematik für die Beschreibung »rauer« oder »chaotischer« Phänomene zu liefern, von der Geometrie von Küstenlinien und Blumenkohl bis zum Verhalten von Aktienmärkten.

Die technische Grundlage dieser Entwicklungen bildete die allgemeine Zugänglichkeit von Computern. Diese können das Verhalten »chaotischer« nichtlinearer Systeme simulieren und die Werte so genannter iterierter Funktionen mit hoher Geschwindigkeit numerisch berechnen. Heutzutage liefern Supercomputer auf dieser Grundlage verlässliche Wettervorhersagen und umfassende Klimamodelle, simulieren »chaotische« Verbrennungsvorgänge oder berechnen komplexe Wechselwirkungen fundamentaler Teilchen.

Das sind große Errungenschaften, aber sie ebneten nicht den Weg zu einer einheitlichen Theorie komplexer Phänomene. Prigogine versuchte am Ende sogar, eine fundamentale Theorie der Quantenmechanik zu entwickeln, die auf mathematischen Begriffen aus der statistischen Thermodynamik beruhte und den Zeitpfeil einschloss – aber ohne Erfolg. Aus diesem Fehlschlag lässt sich vielleicht eine all-

**Benoît Mandelbrot untersuchte mathematische Gebilde mit fraktaler – nicht ganzzahliger – Dimension und wies auf ihre Ähnlichkeit mit komplexen Naturformen hin. Berühmt wurde das »Apfelmännchen«, die unendlich detailreiche Darstellung der nach Mandelbrot benannten Menge.**



RAMA / CC-BY-SA 2.0-FR (HTTP://CREATIVECOMMONS.ORG/LICENSES/FR-SA-2.0-FR/DEEDS)

gemeine Lehre ziehen. Die Weiterentwicklung komplexer Systeme vermag durch Emergenz ganze Hierarchien von Phänomenen zu erzeugen, die wissenschaftlichen Fachbereichen entsprechen und aufeinander ruhen wie die Stockwerke eines Turms. Diese Evolution führt, wie von John Maynard Smith und Eörs Szathmáry 1995 in »The Major Transitions in Evolution« beschrieben, »aufwärts« von ganz abstrakten zu immer konkreteren Modellen: von der Elementarteilchenphysik zu statistischen Ensembles und zur Chemie, von dort zu Biochemie und Biologie und weiter zum Studium von Ökologie und Gesellschaften.

### Die Richtung der Emergenz

Doch die Emergenz ist eine Einbahnstraße; der Erklärungsaufzug in diesem hierarchischen Gebäude fährt nur aufwärts, nie abwärts. Es ist möglich, die nächsthöhere Ebene durch Herleiten ihrer komplexen Phänomene aus der größeren Komplexität der niedrigeren Ebene zu erklären, aber niemals umgekehrt. Die fundamentale Physik der Quantenmechanik lässt sich nicht mit den Mitteln der nächsten Ebene, der Thermodynamik, beschreiben. Der Zeitpfeil (»Werden«) gehört zur Ebene der statistischen Theorie; er kann nicht abwärts ins Erdgeschoss der reversiblen Teilchenphysik (»Sein«) projiziert werden.

Einen solchen Fehler scheinen mir jene Physiker zu begehen, die versucht haben, mit dem Begriff »Information« die Quantenphysik zu erklären. Sie behaupten, die physikalische Realität bestehe auf der fundamentalsten Quantenebene weder aus Materie noch Energie, sondern aus Information. Doch wie die Entropie gehört jeder quantifizierbare Begriff von Information nicht zur zeitsymmetrischen Quantenmechanik, sondern entstammt der nächsthöheren Ebene, der statistischen Thermodynamik.

Noch viel weniger lassen sich hochgradig emergente Phänomene wie Intentionen, Entscheidungen oder »freier Wille« irgendwie direkt aus dem Unbestimmtheitsprinzip der Quantenmechanik herleiten, obwohl diese immer wiederkehrende Idee anscheinend große Anziehungskraft ausübt. Quantenmechanische Unbestimmtheit erklärt nicht Entscheidungsfreiheit.

**W I S** wissenschaft  
in die schulen!



Didaktische Materialien für den Unterricht zum Thema  
»Wärmelehre« kostenfrei herunterladen unter:

[www.wissenschaft-schulen.de/waerme](http://www.wissenschaft-schulen.de/waerme)

Für sich allein ist Robinson Crusoe kaum ein Mensch; er ist ähnlich isoliert wie ein einzelnes Gasatom, dem man weder Druck noch Temperatur zusprechen kann. Doch kaum taucht Freitag auf, bilden die zwei schon eine ganze Gesellschaft, die auf dieser Illustration aus den 1870er Jahren deutlich die idealisierten Züge des zeitgenössischen Kolonialismus trägt.



PUBLIC DOMAIN

Dieses Beispiel zeigt: Selbst wenn die Emergenz scheinbar in der richtigen Richtung wirkt, das heißt »aufwärts«, kann sie fehlgehen, wenn dabei eine so genannte Sphärenvermischung stattfindet. Ein bekanntes Exempel ist der Sozialdarwinismus. Er überträgt biologische Begriffe wie »Kampf ums Dasein« und »Überleben des Tüchtigsten« unkritisch auf die Soziologie. Dabei werden metaphorische Ausdrücke, die Charles Darwin für seine Erklärung der biologischen Evolution prägte – in der Tat angeregt durch zeitgenössische Ideen des britischen Ökonomen Robert Malthus (1766–1834) –, missverstanden als vermeintlich naturwissenschaftlich herleitbare Ziele und Werte für menschliche Kulturen. Doch der biologischen Evolution liegt das Prinzip der genetischen Vererbung zu Grunde, während die Geschichte menschlicher Gemeinschaften auf der Weitergabe von kulturellem Erbe beruht.

Andererseits folgt daraus keineswegs, dass die beiden Bereiche absolut nichts gemein hätten; schließlich hat sich die soziale Domäne allmählich in wissenschaftlich rekonstruierbaren Schritten aus dem biologischen Naturreich entwickelt. Darum gibt es ein faszinierendes Gegenbeispiel zum sozialdarwinistischen Missbrauch der Biologie in der Soziologie: die Erforschung der Emergenz von Kooperation und »Altruismus« unter Tieren sowie unter auf den eigenen Vorteil bedachten Agenten in sozialen Spielen. Offensichtlich sind isolierte Individuen an sich durch ihre biologische Fitness definiert; zusätzlich beginnen sie in ihren Interaktionen mit ihresgleichen Anzeichen von altruistischem Verhalten zu zeigen, das sich dann im Nachhinein als »kulturell« interpretieren lässt.

Damit entwickeln die Individuen einer Population Emergenz wie die Atome eines Gases. Jedes einzelne verhält sich nach zeitlosen Gesetzen, doch insgesamt haben sie eine Ge-

schichte in der Zeit. Solange Robinson Crusoe auf seiner Insel allein blieb, kreisten Tag und Nacht, Regen und Sonnenschein, Flut und Ebbe in ewiger Wiederkehr. Erst als ein anderes menschliches Wesen erschien, dem Robinson passenderweise den Namen des Wochentags gab, an dem der Mitmensch auftauchte, begann für ihn die Zeit erneut zu fließen. ~

#### DER AUTOR



**Michael Springer** ist promovierter Physiker, Schriftsteller und ständiger Mitarbeiter von »Spektrum der Wissenschaft«.

#### QUELLEN

- Carnap, R.:** Der logische Aufbau der Welt. Felix Meiner, Hamburg 1999
- Crutchfield, J.P.:** Between Order and Chaos. In: Nature Physics 8, S. 17–24, 2012
- Mandelbrot, B.B.:** Die fraktale Geometrie der Natur. Birkhäuser, Basel 1987
- Maynard Smith, J., Szathmáry, E.:** Evolution. Prozesse, Mechanismen, Modelle. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 1996
- Prigogine, I.:** Vom Sein zum Werden. Zeit und Komplexität in den Naturwissenschaften. Piper, München 1979
- Zeh, H.D.:** The Physical Basis of the Direction of Time. Springer, Berlin 2001

#### WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1157699](http://www.spektrum.de/artikel/1157699)



# 2013 KALENDER WELTEN

SCIENCE-SHOP SPEZIAL 5/2012

Die schönsten Kalender-  
für Sie ausgewählt!



## 1 STERNZEIT

Kalendarium dtsch.-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.

## 2 M. C. ESCHER

Internationales Kalendarium, 12 Monatsblätter, Foliendeckblatt, Format: 50 x 66 cm, Ackermann

Bestell-Nr. 2173 € 34,95

Eschers technische Konstruktionen wirken perfekt – sind aber nicht Realität. Gerade im Großformat der Abbildungen dieses Kalenders entfaltet Eschers faszinierende konstruierte Welt ihre eindruckliche, suggestive Wirkung!

## 3 STARKE TYPEN – WELT DER TIERE

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

Bestell-Nr. 3362 € 39,80

Wieviel Kraft und Lebensfreude – wieviel Charme und Witz diese Bilder vermitteln! 12 Glanzlichter der Tier-Fotografie als idealer Begleiter durch das Jahr.

## 4 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.

## 5 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.

## 6 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 Welt-raum. Das Kalendarium bietet zusätzlich Hinweise auf wichtige Himmelsereignisse im Jahr 2012.

**Portofreie Lieferung nach  
Deutschland und Österreich**

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

Bequem  
bestellen:

→ direkt bei  
www.science-shop.de

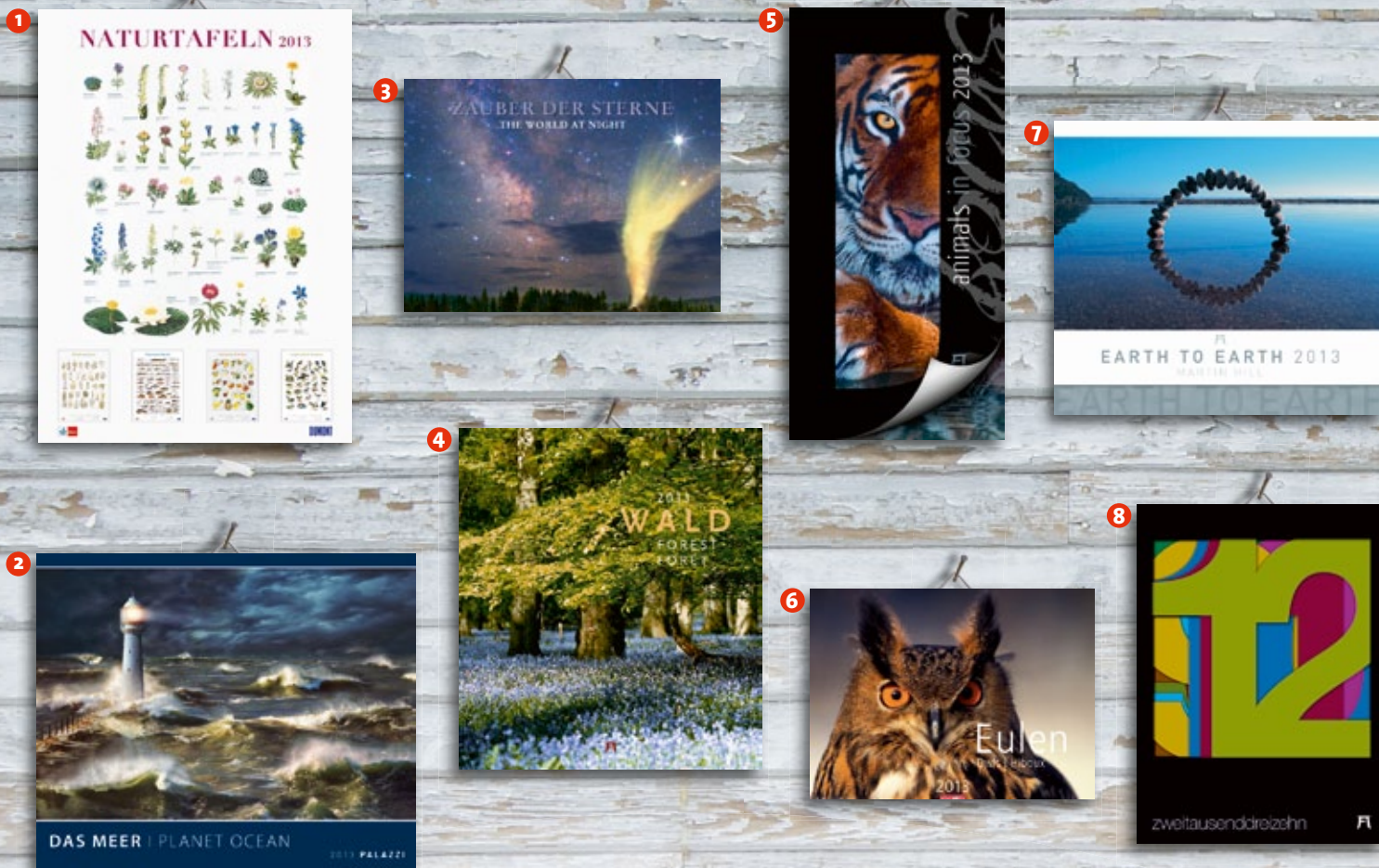
→ per E-Mail  
info@science-shop.de

→ telefonisch  
+49 6221 9126-841

→ per Fax  
+49 711 7252-366

→ per Post  
Postfach 810680 • 70523 Stuttgart





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

## 2 DAS MEER – PLANET OCEAN

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

**Bestell-Nr. 2429 € 39,80**

Zwölf außergewöhnliche Studien über Wind und Wellen, vom Spiel der Elemente und den riesigen Weiten der Ozeane.

## 3 ZAUBER DER STERNE

Kalendarium zweisprachig, 13 farb. Blätter, Format: 52 x 42,5 cm, DuMont

**Bestell-Nr. 3671 € 22,99**

Das weltumspannende Projekt »The World at Night« (TWAN) zeigt den Himmel über magischen Orten der Erde. Zwölf der eindrucksvollsten Fotografien zwischen Himmel und Erde finden Sie in diesem Kalender.

## 4 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.

## 5 ANIMALS IN FOCUS – POSTER-KALENDER

13 farb. Blätter, 12 Passepartoutblätter, Format: 33 x 66 cm, Ackermann

**Bestell-Nr. 3668 € 34,95**

Die mattschwarzen Rahmen setzen die hochglänzenden Tierfotografien gekonnt in Szene und sorgen für spannende Einblicke durch besondere Ausschnitte. Klappen Sie die Passepartouts ganz nach hinten weg, wird der Kalender zur hochwertigen Postersammlung für viele Jahre.

## 6 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).

## 7 EARTH TO EARTH

Kalendarium dtsh.-engl.-französ., 13 farb. Blätter, Format: 54 x 48 cm, Ackermann

**Bestell-Nr. 3672 € 29,95**

Der neuseeländische Land-Art-Künstler Martin Hill arbeitet ausschließlich mit Naturmaterialien, die er an Ort und Stelle findet. Seine harmonischen und erstaunlich präzisen Installationen unterliegen der Vergänglichkeit.

## 8 ZWEITAUSENDDREIZEHN

13 farb. Blätter m. formgestanzten Zahlen, Format: 33 x 45 cm, Ackermann

**Bestell-Nr. 3666 € 24,95**

Einen ungewöhnlichen Anspruch an Ablauf und Sehgewohnheiten stellt der Kalender an seinen Nutzer und Betrachter. Gegen den üblichen Rhythmus von hinten nach vorne geblättert, überlagern sich die formgestanzten Zahlen dieses Kalenders Monat für Monat zu immer komplexer werdenden grafischen Mustern.

**Bestellen** ☎ +49 6221 9126-841  
**Sie direkt:** @ [info@science-shop.de](mailto:info@science-shop.de)

**Bequem bestellen:**

→ direkt bei [www.science-shop.de](http://www.science-shop.de)

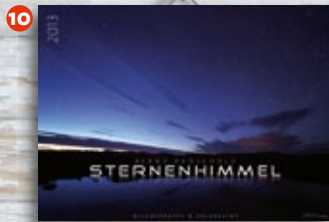
→ per E-Mail [info@science-shop.de](mailto:info@science-shop.de)

→ telefonisch +49 6221 9126-841

→ per Fax +49 711 7252-366

→ per Post Postfach 810680 • 70523 Stuttgart





### 9 TERRA

Intern. Kalendarium, 13 farb. Blätter, Format: 33 x 100 cm, Ackermann

Bestell-Nr. 3675 € 39,95

Das Premium-Panorama-Format des Kalenders unterstreicht die Kraft der farbstarken Luftaufnahmen und zeigt die Schönheit der verschiedenen Kontinente unserer Erde.

### 12 KREATUREN DER TIEFSEE

Internat. Kalendarium, 13 farb. Blätter, Format: 45 x 34,5 cm, Weingarten

Bestell-Nr. 3673 € 19,95

In einer Tiefe von 1000 Metern gibt es keinerlei Lichteinfall. So produzieren die Wesen, die hier leben, ihre eigenen Lichtquellen, um Futter anzulocken oder Feinde abzuschrecken.

### 15 TECHNICS XXL

Kalendarium viersprachig, 13 farb. Blätter, Format: 48 x 64 cm, teNeues

Bestell-Nr. 3667 € 14,99

Ein Liebhaberstück für alle Technik-Freaks! Ob Braunkohlebagger, Staudamm, Photovoltaikanlage oder Windpark, diese gigantischen Technikwunder lassen Männerherzen höher schlagen.

### 10 STERNENHIMMEL

13 farb. Blätter, Format: 45 x 33 cm, Weitsicht

Bestell-Nr. 3683 € 19,95

Seit vielen Jahren bereist der Astrofotograf Bernd Pröschild die entlegensten Landschaften der Erde. Unter dunklem Himmel hält er das Geschehen am Firmament in bis zu 24-stündigen Zeitrafferaufnahmen fest.

### 13 VOM ZAUBER ALTER BÄUME

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

Bestell-Nr. 3361 € 26,99

Zwölf verwiterte und steinalte Baumriesen präsentieren sich in ihrer ganzen Ehrwürdigkeit und Imposanz. Heinz Wohner hat sie in Deutschland aufgespürt und fotografiert. Anschließend hat er seine Schwarzweiß-Fotografien kunstvoll von Hand koloriert.

**Portofreie Lieferung nach Deutschland und Österreich**

### 11 NATURE PHOTO ART

Text dttsch.-engl., 13 Duplex-Blätter, Format: 50 x 70 cm, Palazzi

Bestell-Nr. 3669 € 44,80

Zwölf Natur-Studien von Michel Rajkovic in höchster Druck-Qualität – nah am Original-Fotoabzug. Die bewußte Beschränkung auf Schwarz und Weiß mit einer Palette feinsten Grau-Töne verleihen diesen Bildern besondere Präsenz.

### 14 LEUCHTTÜRME

Kalendarium dttsch.-engl.-französ., 13 farb. Blätter, Format: 33 x 67,5 cm, Weingarten

Bestell-Nr. 2876 € 19,95

Majestätisch und geheimnisvoll wachen Leuchttürme über Wasser und Land. Der Kalender präsentiert Bauwerke aus Deutschland, Frankreich, Australien, Dänemark, den USA und Namibia.

### 16 DER LEBENSFREUDE INSPIRATIONEN-KALENDER

13 farb. Blätter, Spiralbindung, Format: 58,5 x 48,5 cm, DuMont

Bestell-Nr. 3670 € 29,99

Wunderschöne Blütenfotos und die positiven Denkanstöße von Dr. Doris Wolf und Dr. Rolf Merkle machen diesen Kalender zu einem wohltuenden Begleiter durch das Jahr.

Mehr Infos und weitere Kalender:  
[www.science-shop.de/kalender](http://www.science-shop.de/kalender)

Bequem bestellen:

→ direkt bei [www.science-shop.de](http://www.science-shop.de)

→ per E-Mail [info@science-shop.de](mailto:info@science-shop.de)

→ telefonisch +49 6221 9126-841

→ per Fax +49 711 7252-366

→ per Post Postfach 810680 • 70523 Stuttgart





## WAS BLÜHT DENN DA? Notizkalender

13 farb. Bl., Spiralbindung,  
22 x 49 cm., DuMont

**Bestell-Nr. 3677 € 9,99**

Dieser praktische und dekorative Notizkalender ist doppelt nützlich: Er erleichtert die Terminplanung und hilft bei der Beantwortung der Frage: Was blüht denn da?



## HEIMISCHE VÖGEL Kalender

Mit Nutzkalendarium, 13 farb. Bl., 30 x 39 cm, Weingarten

**Bestell-Nr. 2435 € 14,95**

Dieser individuell gestaltete Kalender präsentiert zwölf heimische Vogelarten zusammen mit einem passenden Zitat.

## Jahrbücher

**AHNERTS ASTRONOMISCHES JAHRBUCH 2013**  
ca. 194 S. mit zahlr., meist farb. Abb., DinA4, Spektrum der Wissenschaft  
**Bestell-Nr. 1339 € 10,90**  
Ahnerts Astronomisches Jahrbuch ist das unentbehrliche Standardwerk für Hobbyastronomen. Im handlichen Zeitschriftenformat enthält es alle wichtigen Informationen über die Himmelsereignisse 2013.

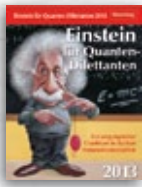
**KOSMOS HIMMELSAHR 2013**  
**Sonne, Mond und Sterne im Jahreslauf**  
Hrsg. v. Hans-Ulrich Keller, 288 S. m. zahlr. Farbbabb., kart., Franckh-Kosmos  
**Bestell-Nr. 1316 € 16,99 (D), € 17,50 (A)**

Aktuelle Himmelschauspiele, zuverlässige kalendrische Angaben und die beliebten Monatsthemen: das *Kosmos Himmelsjahr* ist ein Multitalent, das von seinen Lesern sehr geschätzt wird.

**Ebenfalls lieferbar als**  
**KOSMOS HIMMELSAHR PROFESSIONAL 2013**  
Buch m. DVD-ROM für Windows, Franckh-Kosmos  
**Bestell-Nr. 1317 € 26,99**

Das Package für Profis: *Kosmos Himmelsjahr* als Buch und die DVD *Kosmos Himmelsjahr digital* in attraktiver Geschenkbox.

## Abreißkalender - Wissen für jeden Tag



## 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 und 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.



## DENKST DU NOCH ODER PHILOSOPHIERST DU SCHON?

Ein vergnüglicher Exkurs in die wunderbare Welt der Philosophie

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

**Bestell-Nr. 3676 € 15,99**

Humorvolle und alltagsnahe Antworten auf die großen und kleinen Fragen der Philosophie.



## KALENDER FÜR CLEVERE KIDS

Der Kinder Brockhaus

320 zweifarb. Bl., 12,5 x 16 cm, 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. Ab 8 Jahren.



## MEYERS! GRIPS-GYMNASTIK

320 zweifarb. Bl., 11 x 14 cm, Meyers

**Bestell-Nr. 1535 € 9,99**

Das tägliche 5-Minuten-Training für Gedächtnis, Konzentration, Kreativität und schnelles Denken.



## WISSEN FÜR KIDS

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

**Bestell-Nr. 2870 € 12,99**

Eine spannende Entdeckungsreise durch die Welt des Wissens. Farbenfrohes, kindgerechtes Layout. Ab 10 Jahren.



## LATEIN

Sprachen lernen leicht gemacht

320 Bl. m. zahlr. zweifarb. Cartoons, 12,5 x 16 cm, Harenberg

**Bestell-Nr. 2871 € 9,99**

Das spannende Übungsprogramm vermittelt die Faszination einer vergangenen Sprache und Kultur eindrucksvoll und lebendig. Mit Vokabelsammlung im Anhang.

**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) \_\_\_\_\_ **KAL12SDW**



## Skalpell on the rocks

»Die Kälte spielt in der modernen Anaesthetie eine große Rolle, sie wurde 1938 von Allen wiederentdeckt. Bei der Eisanaesthetie darf das betreffende Glied nicht zum Gefrieren gebracht werden, es wird lediglich in einer eisgefüllten Zinkwanne auf eine Temperatur von +4 °C unterkühlt. Bei dieser Temperatur tritt eine Lähmung der schmerzleitenden Nervenfasern im Gewebe ein. Nach der Durchführung der Unterkühlung ist eine Amputation schmerzfrei durchführbar, das Allgemeinbefinden wird nach der Wiedererwärmung praktisch nicht beeinträchtigt.« Die Umschau in Wissenschaft und Technik 17, 1962, S. 545

## Nase vorn beim Elektronenbeschleunigen

»Gegenüber dem Bau von Beschleunigern von Protonen war der Bau von Geräten, die Elektronen auf sehr hohe Energie beschleunigen, etwas in Rückstand geraten. Die erste dieser Maschinen, die betriebsfertig wurde, ist das Elektronen-Synchrotron in Cambridge. Dieses Gerät ist ein Ringbeschleuniger von 72 m Durchmesser, in dem Elektronen auf eine Endenergie von 6 GeV (6 Milliarden Elektronenvolt) gebracht werden können. Ein Elektronenbeschleuniger ähnlicher Leistung wird von der Forschungsgruppe DESY in Hamburg gebaut, ist jedoch noch nicht fertiggestellt.« Kosmos 9, 1962, S. 358

## Der erste Fernsehsatellit



»Telstar« ist aus 15000 Einzelteilen, darunter eine Elektronenröhre und 2528 Halbleitern, zusammengesetzt.

Die elektronische Ausrüstung ist in einer Kunststoffmasse fixiert, die sich ihrerseits in einem Aluminiumgehäuse befindet. Beim siebenten Erdumflug vermittelte »Telstar« gleichzeitig telephonische Anrufe, rasche Nachrichtensendungen und Bildfunkübertragungen. Im Zusammenhang mit dem Uebermittlungsversuch wurde ein Fernschreiber verwendet, der 1500 Worte pro Minute schreibt.« Neuheiten und Erfindungen 322, 1962, S. 149 – 150



Der erste Fernsehsatellit »Telstar« vermittelte 60 Telefonverbindungen, Fernsehen und Bildfunk gleichzeitig.

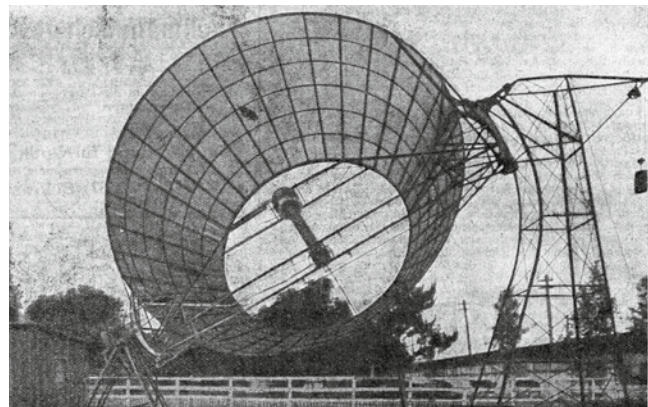


## Das Licht in der Meerestiefe

»Untersuchungen erstreckten sich auf den Widerstand, den Meerwasser den Lichtstrahlen entgegensetzt. Die verschiedenen Ausstrahlungen, aus denen das Sonnenlicht sich zusammensetzt, wurden sehr ungleichmäßig aufgesogen. Bis zu einer Tiefe von 100 Meter sind noch

alle Lichtelemente festzustellen. In 500 Meter Tiefe dagegen ist das Rot bereits aufgesogen, während die blauen und violetten Strahlen mit Hilfe der photographischen Platte noch wahrgenommen werden können. In 1000 Meter Tiefe aber sind nur die violetten und ultravioletten Strahlen noch feststellbar. Von 1700 Meter Tiefe ab wird der Ozean nur noch durch die Ausstrahlungen leuchtender Seetiere erhellt.« Central-Zeitung für Optik und Mechanik 26, 1912, S. 292

von zehn Meter Durchmesser. Die Achse war direkt auf die Sonne gerichtet. Die Wirkung dieses Brennspiegels war nun dieselbe, wie die eines jeden anderen Brennspiegels auch. Er vereinigte die auf ihn fallenden Sonnenstrahlen in einem Punkte. In diesem Brennpunkt befindet sich ein Dampfkessel, der also, anstatt wie gewöhnliche Dampfkessel mit Kohle oder Koks, direkt mit Sonnenstrahlen geheizt wird. So entsteht Dampf, der dann in der Dampfmaschine seine Ausnutzung findet.« Central-Zeitung für Optik und Mechanik 26, 1912, S. 315 – 316



1700 Spiegel fokussieren Sonnenlicht auf einen Dampfkessel.

## Der Sonnendampfkessel

»Seit einigen Jahren beginnt man mit dem Bau der sogenannten »Sonnenmotoren«, d. h. von Kraftmaschinen, die ihren Antrieb durch die Sonne selbst erhalten. Man baute – es geschah dies in Südkalifornien – einen riesigen Brennspiegel

# Wie Tief Xynthia Luft holte

Warum strömt die Luft in einer linksdrehenden Spirale in ein Tiefdruckgebiet hinein?  
Weil sie durch die Corioliskraft nach rechts abgelenkt wird.

VON THOMAS RUBITZKO

»Das Orkantief Xynthia liegt mit seinem Kern über dem Ärmelkanal und verlagert sich rasch nordostwärts. Infolgedessen ist in fast ganz Deutschland mit Orkanböen von Südost auf Südwest bis West drehend zu rechnen«, verkündet der Nachrichtensprecher. Das dazugehörige Fernsbild (rechts) oder – noch eindrucksvoller – der Zeitrafferfilm aus Satellitenaufnahmen zeigt uns, dass die Luft in einer linksdrehenden Spirale auf einen Punkt zustürzt, als säße dort der Abfluss einer Badewanne. Jedes Luftteilchen vollführt eine lange, immer enger werdende Linkskurve, wie man an den mitgerissenen Wolkenfetzen erkennt. Würde das »Loch«, das in Wirklichkeit ein Punkt minimalen Luftdrucks ist, nicht seinerseits wandern, hätten wir an jedem Ort einigermaßen konstante Windverhältnisse, solange das Tiefdruckgebiet besteht.

Aber wie kommt überhaupt eine Spirale zu Stande? Warum sieht es so aus, als würde die Luft in ihr beständig und zunehmend stärker nach links abgelenkt? Paradoxe Antwort: Weil sie nach rechts abgelenkt wird, und zwar durch die Erdrotation. Für einen auf der Erde stehenden Beobachter erscheint die Neigung jedes Luftteilchens, seiner

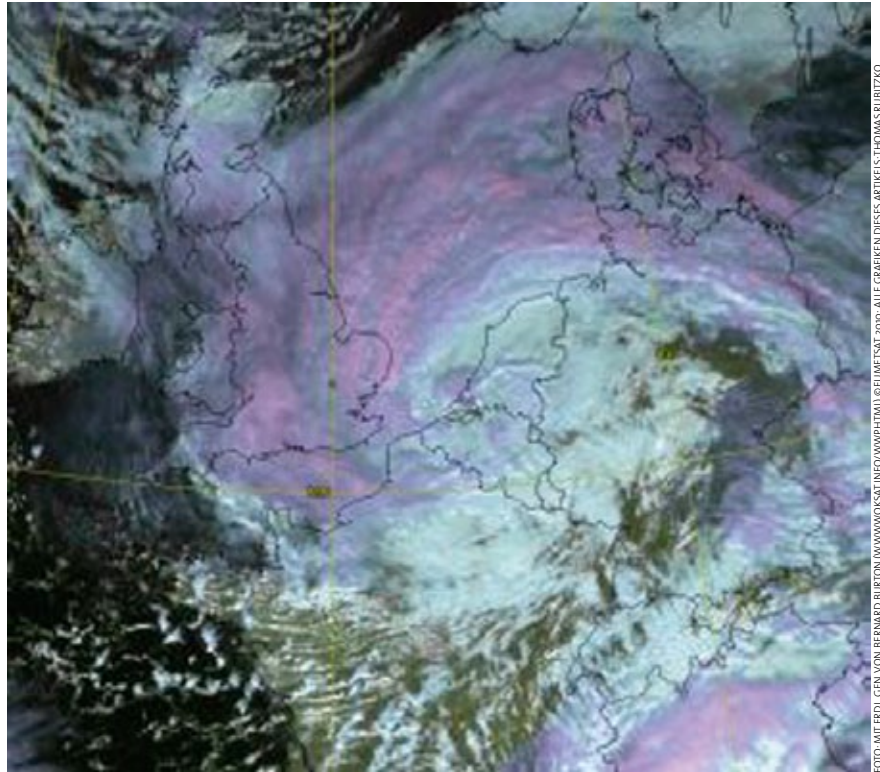


FOTO: MIT FRIEDRICH VON BERNHARD BURTON (WWW.WOUSA.INFO/WP/HTM) © ZEITUNGSDIENST/STADT 2010; ALLE GRAFIKEN DIESES ARTIKELS: THOMAS RUBITZKO

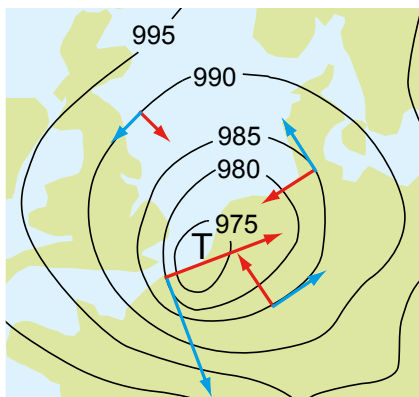
Das Orkantief Xynthia am 28. Februar 2010 um 12 Uhr mit seinem Kern über der Küste der Niederlande im Satellitenbild.

Trägheit zu folgen, wie die Wirkung einer Kraft, die es senkrecht zu seiner Flugrichtung ablenkt, und zwar – auf der Nordhalbkugel – nach rechts. Nach dem französischen Physiker Gaspard Gustave de Coriolis (1792–1843) nennt man sie die Corioliskraft.

Die Karte zeigt zur oben abgebildeten Wetterlage den Luftdruck am Boden mit Isobaren in Millibar. Die Gradientkraft (rot) ist stets senkrecht zur Isobaren und zum niedrigeren Druck hin gerichtet. Ihr würde die Windströmung folgen; aber die Corioliskraft lenkt sie nach rechts ab, bis sie parallel zur Isobaren verläuft (blau).

Aber der Reihe nach. Ursache aller Luftbewegungen sind Unterschiede im Luftdruck. Meteorologen tragen den von Ort zu Ort variierenden Luftdruck (in einer bestimmten Höhe über dem Erdboden) in eine Karte ein und verbinden Punkte gleichen Drucks durch Linien, die Isobaren (Bild links). Diese geben ein ähnliches Bild ab wie die Höhenlinien auf topografischen Karten und sind auch vergleichbar zu interpretieren.

Je näher die Höhenlinien auf einer gewöhnlichen Landkarte beieinander liegen, desto steiler geht es an dieser Stelle bergauf oder bergab. Ein armer Wanderer, der den Halt verliert, wird rechtwinklig zu der Höhenlinie, auf der



er sich befindet, abwärts beschleunigt, und zwar umso stärker, je dichter dort die Höhenlinien liegen. Entsprechend erfährt jedes Luftteilchen eine Kraft, die senkrecht zu seiner Isobare in Richtung auf den niedrigeren Luftdruck gerichtet und umso stärker ist, je dichter dort die Isobaren liegen, je steiler also das Druckgefälle ist (rote Pfeile im Bild S. 60 links unten). Kräfte dieser Art heißen Gradientkräfte.

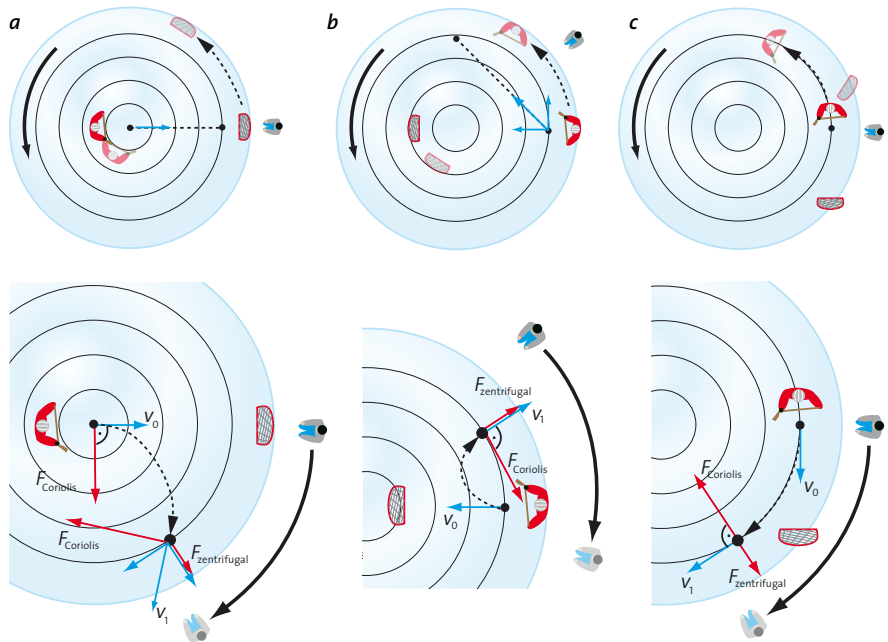
Höhe im Gelände und Druck in der Luft haben noch eine weitere Gemeinsamkeit: Sie sind proportional zu einer potenziellen Energie. In beiden Fällen beschleunigen Gradientkräfte Bewegliches so, dass es sich seiner potenziellen Energie so rasch wie überhaupt möglich entledigt.

Wäre die Druckverteilung zeitlich konstant und die zugehörige Gradientkraft die einzige Kraft, dann würden sich alle Luftteilchen beschleunigt geradewegs zum Kern eines Tiefdruckgebietes bewegen. Dies gilt tatsächlich auch für sehr kleinräumige Druckgebiete, nicht aber, wenn Prozesse großräumig und damit in längeren Zeitintervallen ablaufen.

### Spielball der Kräfte

Die Erde dreht sich von Norden aus betrachtet entgegen dem Uhrzeigersinn um ihre Achse. Die Lufthülle ist in Ruhe gegenüber der Erdoberfläche, vollführt jedoch, von außen gesehen, wie die Erde als Ganzes eine Rotationsbewegung, was insbesondere eine zum Zentrum hin beschleunigte Bewegung ist. Diese Beschleunigung wird durch eine Kraft verursacht, und zwar die Gravitationskraft, genauer: deren Komponente senkrecht zur Erdachse. Würde die Gravitation urplötzlich abgeschaltet, so würde die Luft, ihrem gegenwärtigen Impuls folgend, einfach tangential ins All davonschweben.

Bewegte Luft hat zunächst ebenfalls keine natürliche Neigung, der Erdrotation zu folgen. Vielmehr weht sie so, wie ihre Trägheit und – zum Beispiel – Druckkräfte es ihr befehlen, derweil die Erde sich unter ihr wegdreht. Für den erdfesten Beobachter sieht das aber möglicherweise ganz anders aus.



Schuss aufs Tor auf dem rotierenden Eishockeyplatz, aus der Perspektive des außen stehenden (obere Bilder) und des mitrotierenden Beobachters (untere Bilder). Der Spieler zielt vom Zentrum auf das Tor an der Peripherie der Scheibe (a); von der Peripherie aufs Tor im Zentrum (b); in tangentialer Gegenrichtung zur Bewegung der Scheibe (c). Kräfte und Geschwindigkeiten in den unteren Bildern sind im rotierenden Bezugssystem angegeben. Die Anfangsgeschwindigkeit  $v_0$  hat in allen Fällen denselben Wert.

Um das besser zu verstehen, ersetzen wir die Erde in Gedanken durch ein kreisförmiges, im Gegenuhrzeigersinn rotierendes Eishockeyspielfeld (Bild oben). Wenn der Mittelpunkt der Scheibe der Nordpol ist, rotiert sie wie die echte Erde um die Erdachse. Damit die Effekte deutlicher werden, soll die Scheibe allerdings weit schneller rotieren als die Erde. Die Zuschauer dagegen sitzen außerhalb der Scheibe und rotieren überhaupt nicht.

Auf der Scheibe soll nun Eishockey mit einem reibungsfreien Puck gespielt werden. Das Tor steht am Rand und der Spieler im Zentrum der Scheibe (Bild oben, a). Der Spieler gibt dem Puck einen Kraftstoß Richtung Tor, und der gleitet in gerader Linie in der richtigen Richtung. Was soll er auch sonst tun? Auf ihn wirken nach dem Abschlag keine Kräfte mehr – jedenfalls nicht in der Scheibenebene. Nur hat sich während der Laufzeit das Tor ein ganzes Stück weitergedreht, so dass der Puck sein Ziel weit verfehlt.

Der Spieler erlebt dies anders. Er wundert sich zwar über die um ihn he-

rumrotierenden Zuschauer, wähnt sich aber in Ruhe auf der Scheibe. Nach dem Schlag beobachtet er eine merkwürdige Rechtsablenkung des Pucks, der dadurch auf einer gekrümmten Bahn läuft und weit vom Tor entfernt die Scheibe verlässt. Um die newtonschen Gesetze weiterverwenden zu können, interpretiert der Spieler die Rechtsablenkung als Folge einer Kraft, die senkrecht zur Bewegungsrichtung nach rechts wirkt. Diese Scheinkraft ist die Corioliskraft (Spektrum der Wissenschaft 12/2008, S. 46).

Physiker fassen ein rotierendes Bezugssystem, wenn überhaupt, dann nur mit spitzen Fingern an. Denn wer sich auf so etwas einlässt, also zum Beispiel den Standpunkt des Eishockeyspielers einnimmt, muss mit Scheinkräften leben. Während der externe Zuschauer die Bewegung des Pucks als geradlinig und gleichförmig beobachtet und nicht weiter darüber nachzudenken braucht – sie steht ja im Einklang mit den newtonschen Gesetzen –, muss der Spieler auf der rotierenden Scheibe die merkwürdigsten Kräfte



te postulieren, nur um die Illusion aufrechtzuerhalten, die newtonschen Gesetze gälten in seiner scheinbaren Ruhe. Das beschränkt sich nicht auf die Corioliskraft; es kommt auch noch die Fliehkraft (»Zentrifugalkraft«) hinzu. Wenn der Spieler den Puck einfach auf den Eisboden legt, ohne ihm Bewegung mitzugeben, gleitet das Ding nach außen weg – so beobachtet es der Spieler. Der Zuschauer von außen dagegen sieht den Puck nur seiner Trägheit folgend geradlinig tangential wegfliegen.

Wenn der Physiker allerdings auf der rotierenden Erde sitzt, bleibt ihm kaum etwas anderes übrig, als sich für ruhend zu halten. Deswegen ist es für ihn sogar überaus sinnvoll, Scheinkräfte zu postulieren. Mit ihrer Hilfe kann er nämlich alle beobachtbaren Bewegungen voraussagen. Er stellt fest, dass die Corioliskraft umso größer ist, je schneller sich der Zu-

schauer um ihn dreht (der Zuschauer würde sagen, je schneller sich die Scheibe dreht). Außerdem kann er feststellen, dass die Kraft der Geschwindigkeit des bewegten Objekts – in seinem Bezugssystem – proportional ist.

Wenn der Spieler nicht von innen nach außen, sondern vom Rand der Scheibe auf ein Tor in der Mitte zielt, trifft er wieder gewaltig daneben (Bild S. 61, b). Außer dem auf das Tor gerichteten Impuls hat der Puck noch einen tangential gerichteten, den er von der Scheibe geerbt hat; er war ja vor dem Abschlag bezüglich der Scheibe in Ruhe. Die Vektoren addieren sich, und der Puck fliegt auf einer geraden Bahn kräftefrei über die Scheibe – aber nicht durch deren Zentrum. Die Scheibe dreht sich unter ihm hindurch.

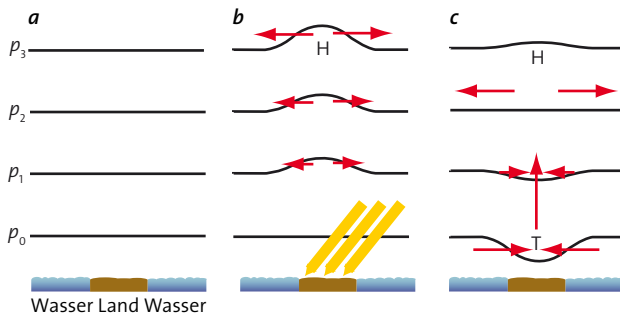
Der Spieler erlebt den Puck wieder nach rechts abgelenkt auf einer krum-

men Bahn laufend. Auch hier bleibt ihm nichts anderes übrig, als diesen Bewegungsablauf der rechtsablenkenden Corioliskraft zuzuschreiben. Diesmal macht sich – in seinem Bezugssystem – die Fliehkraft sogar noch auffälliger bemerkbar, während sie beim Stoß vom Zentrum nach außen dem Puck nur einen zusätzlichen Schubs gibt.

Nun schießt der Spieler in tangentialer Richtung entgegen der Drehbewegung. Der Beobachter von außen sieht wieder eine geradlinige, der mitrotierende eine gebogene Bahn. Wenn es dem Schützen gelingt, dem Puck dieselbe Geschwindigkeit zu geben wie die Bahngeschwindigkeit der Scheibe, nur mit umgekehrtem Vorzeichen, dann bleibt von außen gesehen das Geschoss in Ruhe; für den Spieler dagegen vollführt es eine Kreisbahn um den Scheibenmittelpunkt – und schlägt ihm von

## Tiefdruckgebiete

**Abhängig von ihrer Entstehung** unterscheidet man zwei Typen von Tiefdruckgebieten:



**Thermisch bedingte Tiefdruckgebiete:** Druckunterschiede am Boden können eine Folge unterschiedlicher Temperaturen sein. Wird von mehreren benachbarten Flächen (a) die mittlere (Land) stärker erwärmt als die beiden anderen (Wasser) und mit ihr die Luft darüber, so dehnt sich diese nach oben aus. Die Isobarenflächen wölben sich dort nach oben (b). Dabei ändert sich der Druck am Boden zunächst nicht, weil nach wie vor die gleiche Menge Luft auf beiden Flächen lastet.

Das heißt: Über der warmen Fläche nimmt der Luftdruck mit der Höhe nicht so rasch ab wie über der kühlen. Folglich ist in einer bestimmten Höhe der Druck dort größer als nebenan. Dadurch strömt Luft auf diesem Niveau von der erwärmten zu den kalten Seiten, bis das Druckgefälle ausgeglichen ist.

Als Konsequenz lastet nun am Boden über der warmen Fläche eine geringere Luftmasse als über den kühlen (c). Dort nimmt der Druck am Boden ab: Ein Tiefdruckgebiet entsteht.

**Dynamische Tiefdruckgebiete** sind nicht an einen warmen Kern gebunden, sondern Folge von Unregelmäßigkeiten in der Höhenströmung. Diese Starkwindbänder (»Jetstreams«) umspannen den Globus in mittleren Breiten in einer Höhe von etwa 10 000 Meter.

Angetrieben werden die Jetstreams durch den thermisch verursachten Druckgradienten. Die heiße Umgebung des Äquators und die kalte eines Pols spielen dieselbe Rolle wie zuvor Land und Wasser. In der Höhe herrscht am Äquator ein hoher, am Pol ein niedriger Druck. Zum Ausgleich müsste auf der Nordhalbkugel ein Südwind wehen; aber den lenkt die Corioliskraft nach rechts zu einem isobarenparallelen Westwind ab.

Da die Corioliskraft so den Druckausgleich verhindert, baut sich ein großes Druckgefälle auf, und die Strömungsgeschwindigkeit nimmt zu. Dadurch wird die Höhenströmung instabil und bildet Mäander aus. Dazu trägt auch die unregelmäßige Verteilung von Land und Wasser bei. Durch Trägheitseffekte (Luft strömt mit hoher Geschwindigkeit in ein Gebiet mit geringen Druckunterschieden) überwiegt an gewissen Stellen die Corioliskraft die Gradientkraft so stark, dass die Luft »bergauf« (vom niedrigen zum hohen Druck) strömt. So entsteht ein Tiefdruckgebiet mit niedrigem Druck am Boden wie in der Höhe.

Die so nördlich der Höhenströmung entstandenen Tiefdruckgebiete haben einen kalten Kern und driften verhältnismäßig langsam mit etwa 1000 Kilometern pro Tag nach Osten. Xynthia stellte solch ein dynamisches Tief dar, war aber außerordentlich weit im Süden entstanden und nahm eine ungewöhnliche Zugbahn.

hinten gegen die Füße (Bild S. 61, c)! Genaues Nachrechnen ergibt, dass in diesem Fall die Corioliskraft der Fliehkraft genau entgegengesetzt, aber doppelt so stark ist. Die Differenz wirkt wie eine Zentripetalkraft, die den Puck auf seiner Kreisbahn hält.

Zurück zur Realität! Aus dem Eishockeypuck werden wieder Luftteilchen und aus der rotierenden Scheibe die echte Erdkugel. Allerdings wirkt die Corioliskraft immer nur in einer Ebene, die auf der Erdachse senkrecht steht. Ihre rechtsablenkende Wirkung parallel zur Erdoberfläche ist deshalb bei Bewegungen am Pol am größten und nimmt bis zum Äquator auf null ab. Auf der Südhalbkugel verkehrt sich ihre Wirkung in eine Linksablenkung, denn von Süden aus gesehen dreht sich die Erde im Uhrzeigersinn, und alle Bewegungen, auf der Hockeyscheibe wie auf der Erdoberfläche, laufen spiegelbildlich ab.

Der Betrag der Corioliskraft ist allerdings so klein, dass sie erst bei länger anhaltenden, großräumigen Bewegungen zum Tragen kommt.

### Schön entlang der Isobaren

Was passiert nun, wenn ein Druckfeld (eine räumliche Druckverteilung) auf der rotierenden Erde auf ein Luftteilchen wirkt? Nehmen wir zunächst an, dass die Isobaren geradlinig und parallel verlaufen. Das Teilchen ist anfangs in Ruhe und wird senkrecht zu den Isobaren beschleunigt. Wieder vernachlässigen wir die Reibung, was in der oberen freien Atmosphäre der Realität recht nahekommt. Die Bewegungsenergie des Teilchens ist gleich der potenziellen Energie, die es aus dem Druckfeld aufgenommen hat, also proportional der Anzahl an Isobaren, die es auf seinem Weg geschnitten hat. Nach der Formel  $E_{\text{kin}} = mv^2/2$  wächst die Geschwindigkeit mit der Wurzel aus dieser Energie.

Vom ersten Moment der Bewegung lenkt die Corioliskraft das Luftteilchen nach rechts ab, und zwar umso stärker, je schneller es ist. Da es nun nicht mehr den steilsten Weg »bergab« nimmt, nimmt seine Geschwindigkeit nicht so stark zu, wie wenn es die Corioliskraft nicht gäbe; aber sie nimmt zu, bis die

Corioliskraft der Gradientkraft entgegengesetzt gleich ist. Genau dann fliegt das Luftteilchen entlang einer Isobaren, den niedrigeren Druck zur Linken und den höheren zur Rechten. Da es auf seinem Weg keine Isobaren mehr kreuzt, wächst der Betrag seiner Geschwindigkeit nicht mehr. Weicht das Teilchen von dem Weg genau auf der Isobaren nach links ab, wird es schneller, daraufhin nimmt die Corioliskraft zu und treibt es auf den »richtigen« Weg zurück. Driftet es dagegen nach rechts ab, muss es im Druckfeld »ansteigen« und wird dadurch langsamer, worauf die Corioliskraft nachlässt, bis beide Kräfte wieder im Gleichgewicht sind.

Dieser Rückkopplungsmechanismus hält das Luftteilchen auch dann noch »in der Spur«, das heißt auf einer Isobaren, wenn diese selbst sich in Fahrtrichtung nach links krümmt, wie dies nahe dem Kern eines Tiefdruckgebiets der Fall ist (Bild S. 60 unten). Um das Luftteilchen in die Linkskurve zu zwingen, muss allerdings die Gradientkraft etwas größer sein als die Corioliskraft.

Bei der Reise um ein Hochdruckgebiet liegt der Hochdruckkern stets rechts der Fahrtrichtung, und die Luft folgt in einer Rechtskurve den Isobaren. Dazu muss die Corioliskraft die Gradientkraft ein bisschen überwiegen. Das kann sie nur durch eine höhere Bahngeschwindigkeit erreichen.

Daraus folgt: Bei gleichem Druckgefälle strömt die Luft schneller aus einem Hochdruckgebiet heraus, als sie in ein Tiefdruckgebiet hineinfließt. Das hat den paradoxen Effekt, dass ein Hochdruckgebiet bereits zerfließt, während es entsteht; dagegen kann ein Tiefdruckgebiet ein stärkeres Druckgefälle aufbauen und damit am Ende doch höhere und sehr unangenehme Strömungsgeschwindigkeiten verursachen.

In den oberen reibungsfreien Luftschichten kann also im Prinzip die Luft im Gegenuhrzeigersinn um das Tief herumwehen, ohne einen Druckausgleich zu erreichen. Am Boden wirken dagegen zusätzlich noch Reibungskräfte, die aus der Wechselwirkung mit der Erdoberfläche resultieren und die Luft-

strömung bremsen. Dadurch lässt die Corioliskraft nach, und die Gradientkraft gewinnt dann die Oberhand. Also schneidet das Luftteilchen nun auf seinem Weg verschiedene Isobaren, aber die so gewonnene Energie wird alsbald von der Reibung wieder aufgezehrt, und die Geschwindigkeit bleibt annähernd konstant.

Insgesamt fließt die Luft also in Bodennähe nicht um das Tief herum, sondern in einer Spiralbewegung im Gegenuhrzeigersinn in den Kern des Tiefs hinein. Steigt man an einem Ort am Rand des Tiefs nach oben, so dreht sich deshalb der Wind in höheren Lagen wegen der dort geringeren Reibung nach rechts.

Die oben angesprochenen Wechselwirkungen mit der Erdoberfläche sind übrigens das, was von einem Tiefdruckgebiet nachhaltig im Gedächtnis bleibt. Durch das Orkantief Xynthia kamen mehrere Menschen ums Leben; die Versicherungswirtschaft verzeichnete allein in Deutschland Schäden von einer halben Milliarde Euro. Schätzungsweise 500 000 Gebäude und 40 000 Autos wurden beschädigt, ganz zu schweigen von den unzähligen umgestürzten Bäumen. Xynthia zählt damit zu den ganz Großen unter den Orkantiefs, übertroffen nur von dem legendären »Lothar« zu Weihnachten 1999. ~

### DER AUTOR



**Thomas Rubitzko** lehrt Physik und Physikdidaktik an der Pädagogischen Hochschule Ludwigsburg. Er hat von 1995 bis 2006 das Preisrätsel für »Spektrum der Wissenschaft« bearbeitet.

### QUELLEN

**Egger, J.:** Vom Tornado zum Ozonloch. Oldenbourg, München 1999

**Weischet, W., Endlicher, W. (Hg.):** Einführung in die Allgemeine Klimatologie. Borntraeger, Stuttgart 2008

### WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1157702](http://www.spektrum.de/artikel/1157702)

# Neues aus dem Reich des Krösus

Schon in der Antike war das kleinasiatische Lydien ein Mythos. Archäologen und Historiker suchen nun nach seinen Spuren nicht nur in der einstigen Hauptstadt Sardis, sondern auch in der lydischen Provinz.

Von Oliver Hülten



Weil er sein Reich in den Untergang geführt hatte, wollte sich Krösus einer Legende nach selbst verbrennen, doch Zeus löschte die Flammen.





Auf einer Halbinsel im See Gölhisar nahe der namensgebenden türkischen Stadt erforschen deutsche und österreichische Altertumsforscher die Überreste der lydischen Stadt Alt-Kibyra.

Es waren beunruhigende Nachrichten, die König Krösus (griechisch Kroisos), den Herrscher des wohlhabenden Lydien (siehe Karte S. 66), um 550 v. Chr. erreichten. Sein Schwager Astyages, König im benachbarten Medien, war von seiner Armee gestürzt worden. Schlimmer noch: Ein früherer Vasall, der Perser Kyros II., hatte sich dreist des Throns bemächtigt und wollte nun sein Reich vergrößern. Ein Krieg zeichnete sich ab, und Krösus schien es angebracht, göttlichen Rat einzuholen. Also entsandte er Boten zu den wichtigsten Orakelstätten seiner Zeit. Ihre Aufgabe klang einfach. 100 Tage nach ihrem Aufbruch aus der lydischen Hauptstadt Sardis sollten sie den Priestern die Testfrage stellen, was der König am heutigen Tage mache. Nur das Apollon-Heiligtum in Delphi wusste die richtige Antwort: Er bereitet in einem ehernen Kessel ein Mahl aus einer Schildkröte und einem Lamm. Beeindruckt opferte Krösus dem Gott, beschenkte den Tempel und ließ sein eigentliches Anliegen vorbringen: Welche Folge hätte ein Präventivschlag gegen die Perser? Die Antwort lautete sinngemäß, Krösus werde ein großes Reich zerstören.

#### AUF EINEN BLICK

##### FORSCHEN IN DER PROVINZ

**1** Das antike **Lydien** war ein kleinasiatisches Königreich des 8. bis 6. Jahrhunderts v. Chr., das noch wenig erforscht ist. Bislang konzentrierten sich Archäologen auf die Hauptstadt **Sardis**, neuerdings entdecken sie auch die Stätten des Umlands.

**2** Griechische Geschichtsschreiber überlieferten nur spärliche Informationen zur lydischen Kultur, hauptsächlich die Legende um den letzten König **Krösus**, der Persien im Krieg unterlag.

**3** Jüngsten archäologischen Funden zufolge ähnelten die lydischen Siedlungen einander: Es gab eine **Akropolis** und eine **Unterstadt**, in der Wohnräume und Werkstätten oft im gleichen Haus lagen; die Haupttempel waren der Göttin **Kybele** geweiht; Vornehme wurden in **Grabhügeln** um den Ort beigesetzt.

Siegesgewiss ordnete er die Mobilmachung an und überquerte bald darauf mit seinem Heer den Grenzfluss Halys. Bei der Stadt Pteria trafen sie um 547 v. Chr. auf die persische Armee, doch die Schlacht endete unentschieden. Mit dem Einbruch des Winters zog sich Krösus nach Sardis zurück und entließ vorerst seine Truppen. Kyros aber trotzte der Kälte und setzte ihnen nach. Auf dem Schlachtfeld klar überlegen, trieb er die Lyder hinter ihre Stadtmauer. Nach nur 14-tägiger Belagerung fiel Sardis, und Krösus geriet in Gefangenschaft. Damit hatte er wahrhaft ein großes Reich zerstört – sein eigenes. Lydien wurde persische Provinz.

Schon in der Antike erfreute sich Krösus' tragisches Geschick großer Beliebtheit bei Sängern und Dichtern. So existieren verschiedene Versionen über sein weiteres Schicksal, in denen er häufig durch das Eingreifen der Götter vor dem Tod gerettet wird. Trotz der Überlieferungen aber war Historikern und Archäologen unserer Zeit bis vor wenigen Jahren nur wenig über sein Volk und die lydische Kultur bekannt. Das meiste davon basiert auf Ausgrabungen in Sardis, wohingegen das übrige Reichsgebiet – das immerhin zur Blütezeit fast den gesamten westlichen Teil der heutigen Türkei umfasste – erst seit Kurzem erschlossen wird.

Die Hauptstadt war vermutlich 1444 durch den italienischen Kaufmann Cyriacus von Ancona (1391–1455) wiederentdeckt worden. Dieser hatte auf seinen Reisen antike Stätten aufgesucht und gezeichnet, was er dort vorfand, sowie antike Inschriften kopiert. Auch der französische Adlige Jean-Baptiste Tavernier wandelte auf Krösus' Spuren. Er identifizierte 1670 die Ruinenstätte nach ihrer Lage zwischen den Flüssen Hermos und Paktolos als das von antiken Chronisten beschriebene Sardis.

Wissenschaftliche Ausgrabungen unternahmen erstmals Archäologen der Princeton University unter der Leitung von Howard C. Butler zu Anfang des 20. Jahrhunderts. Und es waren amerikanische Forscher wie George M.A. Hanfmann von der Harvard University oder Nicholas D. Cahill



Im 6. Jahrhundert v. Chr. erreichte das lydische Reich unter den Königen Alyattes und Krösus seine größte Ausdehnung.

von der University of Wisconsin-Madison, die diese Arbeit fortführten.

Weil die Siedlungsschichten des 6. Jahrhunderts v. Chr. dort in der Regel von jüngeren, meist aus nachchristlicher Zeit stammenden überlagert sind, gelang es bisher nur an wenigen Stellen, die alte lydische Hauptstadt frei zu legen. Auf dem Burgberg, der mit seinen steilen und felsigen Abhängen die Stadt überragt, haben offenbar nur wenige Reste von Terrassenmauern die Brandschatzung durch die Perser oder die Baumaßnahmen der folgenden Epochen überstanden. Vermutlich erhoben sich dort einst der lydische Königspalast, die Tempel und weitere Gebäude, die den Angehörigen der Elite vorbehalten waren. Darauf deuten beispielsweise luxuriöse Objekte im Fundgut hin: Tierfiguren, die einst bronzene Gefäße zierten, teures Importgeschirr sowie Münzen aus Silber oder der natürlich vorkommenden Gold-Silber-Legierung Elektron.

Auch mit roter, blauer und weißer Farbe bemalte oder mit aufwändigen Reliefs verzierte Terrakottaplatten zeugen vom

Als Lydion bezeichnen Archäologen einen bauchigen Gefäßtyp mit hohem Fuß, langem Hals und waagrecht davon abgehender Lippe, der in Lydien erfunden wurde und dort weit verbreitet war. Zwar wurde diese Form von griechischen Töpfern kopiert, dennoch sind Fragmente solcher Gefäße im Fundgut ein Indiz für einen lydischen Hintergrund der jeweiligen Stätte.

damaligen Wohlstand. Sie schmückten wahrscheinlich einst als Frieße die Lehmziegelmauern eines lang gestreckten Gebäudes, das auf einem Fundament von Bruchsteinen stand. Das Dach war mit bemalten Ziegeln gedeckt und weiteres Terrakottaschmuck versehen. Gebäudetyp und Verzierung lassen nach Ansicht der Ausgräber erahnen, dass dies nicht bloß die Wohnstatt eines Sterblichen gewesen ist, sondern ein Tempel der Kybele, die der griechischen Artemis entsprach. Das würde gut passen, berichtete Herodot doch von einem solchen Bauwerk in Sardis. Überdies hatte König Krösus eine besondere Beziehung zu dieser Göttin, denn er ließ ihr in Ephesos einen so großen Marmortempel errichten, dass dieser in der Antike als ein Weltwunder galt.

Zu Füßen der Akropolis erstreckte sich die weitläufige Unterstadt. Auch sie wurde bei der Eroberung durch die Perser ein Raub der Flammen, aber die einstürzenden Gebäude be-



STATISCHE ANTIKENSAMMLUNGEN UND GEWITHTHEK, MÜNCHEN / FOTO: RENATE KÜHLING, MIT FREILEGEN VON OBER HILFEN





Einer der größten griechischen Tempel wurde um 300 v. Chr. in Sardis der Göttin Artemis errichtet (links und unten), nachdem die persischen Besatzer durch Alexander den Großen vertrieben worden waren. Auch der lydische König Krösus hatte ihr ein Heiligtum bauen lassen – Hinweise fanden sich auf der Akropolis (links im Hintergrund). Zwischen dieser und der griechischen Ruine graben Forscher die Unterstadt mit Wohngebäuden, Werkstätten, weiteren Tempeln und einer Stadtmauer aus (unten).



gruben das Inventar lydischen Alltags unter sich. So hat sich einiges über die Jahrhunderte bewahrt, darunter einfache Schüsseln zum Bereiten der Mahlzeiten ebenso wie das schön dekorierte Tafelgeschirr Wohlhabender, Behältnisse für Parfüm oder Salben wie auch rituell genutzte Miniaturgefäße. Vieles davon war bei seiner Entdeckung noch so gut erhalten, wie man es sonst allenfalls in Gräbern vorfindet. Die meiste Keramik hatten Handwerker in Sardis selbst produziert, wie Form und Dekoration zeigen, zudem gab es Importwaren, die großenteils aus den griechischen Koloniestädten der kleinasiatischen Westküste stammten.

### Goldland Lydien

Darüber hinaus fanden sich alle Arten von Haushaltsgegenständen wie Webgewichte, eiserne Spieße zum Braten von Fleisch, aber auch allerlei Schmuck. Manches davon dürfte direkt in den Wohnhäusern hergestellt und dort verkauft worden sein. Sogar eine Goldwerkstätte kam ans Licht, in der das Edelmetall geschmolzen und weiterverarbeitet worden sein konnte. Man gewann es aus dem Sediment des vorbeifließenden Paktolos, der es in der Legierung mit Silber, also als Elektron, mit sich führte. Dieses Gold bildete eine der Grundlagen für den Reichtum und die Macht der Lyder.

Vermutlich standen in der Unterstadt ebenfalls ein Palast und ein Tempel. Dafür sprechen Fragmente architektonischer Zierelemente, die in späterer Zeit zweckentfremdet und anderweitig erneut verbaut wurden. So entdeckten die Archäologen in jüngeren Siedlungsschichten Reliefs und Skulpturen, welche zumindest in einem Fall die in Lydien verehrte Muttergottheit Kybele darstellen. Wesentlich häufiger trafen sie noch auf Attribut-Tiere wie den Löwen. Er ist so

oft als Motiv genutzt worden, dass er gewissermaßen zum Wappentier der Lyder avancierte.

Eine gewaltige, zwischen 18 und 20 Meter dicke und bis zu 13 Meter hohe Befestigungsmauer schützte Sardis bis zur Eroberung; auch sie war aus Lehmziegeln auf einem Steinsockel errichtet worden. Ein kleines Teilstück davon samt einem Tor sowie einiger benachbarter Häuser haben die amerikanischen Archäologen in den letzten Jahren frei gelegt. Dabei stießen sie wieder auf Spuren der Katastrophe: meterdicke Schichten von Asche und Schutt sowie einige Schwerter, Helme und Pfeilspitzen – und die Skelette zweier Soldaten, die von der einstürzenden Mauer begraben worden waren. Einer hielt zum Zeitpunkt seines Todes offenbar noch einen Stein in seiner Faust, wohl ein Wurfgeschoss.

Welchen Wohlstand Sardis vor diesen dramatischen Ereignissen besaß, demonstrieren die Grabhügel (so genannte Tumuli) außerhalb der Stadtmauer. Nur die Großen des Reichs konnten sich dergleichen leisten: Eine steinerne Grabkammer mit Satteldach nahm den Leichnam und die Beigaben auf, darüber wurde ein Hügel aufgeschüttet. Ein langer Gang

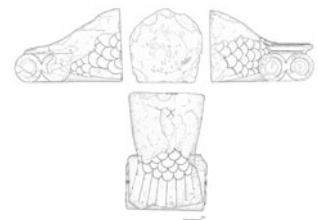




BEIDE FOTOS UND ZEICHNUNG: OLIVER HÜDDEN



In einer aufgelassenen Apfelplantage auf der Halbinsel im See Gölhisar kamen diese Bruchstücke einer ursprünglich wohl gut zwei Meter großen Vogelskulptur zum Vorschein. Die Forscher vermuten, dass sie einen Falken darstellte, eines der Attribut-Tiere der in ganz Kleinasien, im lydischen Reich aber besonders verehrten Muttergottheit Kybele.



führte ins Innere, eine Steinmauer umgürtete den Tumulus, und ein Stein, der an einen Phallus erinnert, bildete die Bekrönung des Hügels. Seit Jahrhunderten wurden und werden diese Grabbauten leider aufgebrochen und geplündert – auf der Suche nach den sagenhaften Schätzen des für seine Reichtümer berühmten Königs Krösus.

So bemerkenswert die Entdeckungen auch sein mögen, liefern sie doch für Sardis kein geschlossenes Bild, und die Peripherie des Reichs ist noch viel unbekannter. Daher war es ein glücklicher Zufall, der den damals noch in Heidelberg ansässigen Inschriftenspezialisten Thomas Corsten 1995 in die Kibyrtis führte.

Der Name der Region verweist eigentlich auf eine Zeit lange nach den Lydern: Kibyra, heute eine eindrucksvolle Ruine nahe der modernen Kleinstadt Gölhisar, wurde nämlich erst in hellenistischer Zeit (wohl im 3. Jahrhundert v. Chr.) gegründet und führte dann einen Städtebund an – die kibyratische Tetrapolis (siehe Karte S. 66), die dem Gebiet den Namen gab. Der antike Geograf Strabon (um 63 v. Chr. – 23 n. Chr.) aber berichtete, Kibyra sei keine Neugründung gewesen. Vielmehr habe man eine lydische Vorgängersiedlung verlegt. Inzwischen Professor für Alte Geschichte in Wien, beschloss Corsten gemeinsam mit dem Autor, nach diesem Alt-Kibyra zu suchen.

Gut drei Kilometer von der heutigen Stadt entfernt liegt der See Gölhisar mit einer felsigen Halbinsel. Kurzfristig erregte deren Umgebung in den 1980er Jahren Aufmerksamkeit, als Mitarbeiter des Archäologischen Museums der türkischen Provinzhauptstadt Burdur erfuhren, dass dort antike

Gräber ausgeraubt worden waren. Bei Notgrabungen stießen sie neben diversen anderen Funden auf etliche vollständige Gefäße, deren Vielfalt, Qualität und Zusammensetzung Anlass zu Spekulationen gab. Beispielsweise nahm der britische Archäologe Alan Hall die Halbinsel in Augenschein und glaubte den Ort mit der ebenfalls von Strabon erwähnten Siedlung Sinda identifizieren zu können. Wo Hall aufhörte, setzten wir an und unternahmen 2008 die ersten Surveys auf der Insel und im Umfeld des Sees. Ein Survey umfasst die Begehung des Geländes nach einem festgelegten Raster, bei der alle Oberflächenfunde genau verortet und notiert werden.

### Auf den Spuren einer vergangenen Welt

Heute allerdings zeugt nur noch wenig auf der Halbinsel von einer Stätte des Altertums: wenige, halb verfallene Mauern, verstreut herumliegende Bruchstücke antiker Architektur und in den Fels geschlagene Kammern. Das geübte Auge erkennt darüber hinaus Bereiche, wo das ursprünglich unebene Gelände für ein Bauvorhaben plan abgearbeitet wurde, und identifiziert Grundmauern. In einer modernen, verwilderten Apfelplantage fanden sich zudem tausende Fragmente von zumeist bemalten Keramikgefäßen. Großenteils stammen sie aus der archaischen Periode und lassen sich in die Zeit vom 7. bis zum späten 6. Jahrhundert v. Chr. einordnen. Viele waren – das zeigten Vergleiche mit anderen Orten in diesem Teil Kleinasien – in der Region hergestellt worden. Andere hatte man von weit her importiert, etwa aus

dem damals unter lydischer Kontrolle stehenden Karien an der Westküste, manches auch von den griechischen Städten Kleinasiens oder aus dem zentralanatolischen Raum. Ein kleines Pferdeköpfchen aus Terrakotta dürfte seinen Weg sogar von Zypern in die Kibyratis genommen haben (siehe Bild rechts).

Dass wir tatsächlich Alt-Kibyra auf der Spur waren, bestätigten Scherben typisch lydischer Gefäße. Hinzu kamen Bruchstücke von Tonplatten, die sich bei näherem Hinsehen als Teile genau solcher Terrakotten entpuppten, wie sie in Sardis ausgegraben worden sind. Damit aber nicht genug: Im Gestrüpp am Hang oberhalb der Apfelplantage stieß eine Studentin auf eine zerbrochene Skulptur aus Kalkstein (siehe Bilder links). Man erkennt noch ein stilisiertes Gefieder – das Stück gehört zu einer überlebensgroßen Vogelstatue. Vergleiche mit ähnlichen Kunstwerken ermöglichten eine Einordnung in das 6. Jahrhundert v. Chr. und den griechisch-lydischen Kulturraum. Eine der Parallelen dazu stammt erneut aus Sardis. Wahrscheinlich handelte es sich um einen Falken und damit um das zweite Attribut-Tier der Göttin Kybele neben dem Löwen. Eine solche Skulptur stand zweifellos in einem Heiligtum und erklärt die kostbaren Terrakottaplaten, aber auch das Pferdeköpfchen – es war eine Weihgabe.

Inzwischen ist ebenso klar, dass die Siedlung wohl aus einigen dutzend Häusern aus Lehmziegeln bestand, die auf den natürlichen Geländeterrassen erbaut und durch ein System aus engen und teils steilen Gassen verbunden worden waren. Auf zwei sicher unter großen Mühen aus dem Fels geschlagenen Plateaus, rund 40 Meter über dem See, ragten vermutlich repräsentative Bauten auf, darunter vielleicht das erwähnte Heiligtum. In ihrer Anlage dürfte die Siedlung also Sardis durchaus geglichen haben, und das Leben lief hier wohl kaum anders ab, wenngleich auf provinziellem Niveau.

Den lydischen Hintergrund bestätigt schließlich auch die zugehörige Nekropole südlich des Sees: Gut 50 aus Steinen errichtete Grabhügel wurden dort an den Hängen dokumen-



Das Pferdeköpfchen aus Terrakotta gehörte wohl zu einer Weihgabe für Kybele, importiert aus Zypern und dargebracht im Tempel von Alt-Kibyra.

tiert, allerdings oft kaum noch zu erkennen, da von Raubgräbern zerstört oder zum Bau der Häuser eines nahe gelegenen türkischen Dorfs abgetragen. Deshalb entdeckten wir auch nur Reste von Beigaben: archaische Keramik, die eisernen Radbeschläge eines Wagens, Teile bronzener Gefäße. Sechs der Tumuli besaßen noch ihre »Phallussteine« (siehe Bild unten). Wenn man sich vorstellt, wie diese Tumuli in der Antike die Landschaft um den See herum geprägt, ja dominiert haben müssen, wird klar, dass die Siedlung im lydischen Grenzland sicherlich bedeutend war. Und die zahlrei-



Phallusartige Steine wie dieser standen einst auf lydischen Grabhügeln. Etliche solcher Tumuli hat man im Umkreis von Alt-Kibyra entdeckt. Leider wurden sie ohne Ausnahme schon in der Vergangenheit geplündert.





OLIVER HÜLDEN

Ein Löwenrelief zielt den Eingang dieses mutmaßlich lydischen Felsengrabes, Dutzende Kilometer von Alt-Kibyra entfernt.

chen Importfunde spiegeln eindrucksvoll ihre Außenkontakte wider.

Wie aber passt dieses »Alt-Kibyra« in das lydische Reichsgefüge? Wahrscheinlich handelte es sich um eine kleine Siedlung, die im Zuge der lydischen Eroberungen im Grenzland angelegt worden war, um das Gebiet zu kontrollieren, doch sind das noch Mutmaßungen. Zudem gibt uns die Stätte weitere Rätsel auf: Warum etwa datiert der Großteil der bislang gefundenen Keramik in die archaische Zeit, während die gut 300 Jahre bis zur Verlegung der Siedlung und Gründung des hellenistischen Kibyra im Fundgut viel weniger Widerhall finden? War die Stadt vielleicht größtenteils verlassen worden, weil sie nach dem Fall von Sardis gleichfalls dem Machtverlust Kyros' II. zum Opfer fiel? Möglich wäre es, denn es ist überliefert, dass der persische General Harpagos für ihn auch das benachbarte Lykien unterwarf.

In die Lydienforschung ist Bewegung gekommen. Ein halbes Dutzend internationaler Projekte versucht in enger Vernetzung mittlerweile die offenen Fragen zu klären. Und ständig kommt Neues ans Licht: Inzwischen hat unser deutsch-österreichisches Team rund 90 Kilometer nördlich des Sees Gölhisar bei Yeşilova eine Befestigungsanlage aus Bruchsteinen auf einem Bergplateau entdeckt, die ungefähr aus der gleichen Zeit stammt. Einige Kilometer wiederum davon entfernt wurde in der Antike ein Grab in einen Felsen gehauen, dessen Eingang das Relief eines springenden Löwen und

dreier Wildziegen zielt (siehe Bild oben). Der Stil legt eine Datierung in das 6. Jahrhundert v. Chr. nahe, und das ähnlichste Motiv findet sich – wer hätte es gedacht – auf einem marmornen Kybeleschrein aus Sardis. ~

#### DER AUTOR



Der promovierte Archäologe **Oliver Hülken** vom Institut für Klassische Archäologie der Ludwig-Maximilians-Universität München leitet das Kibyris-Projekt gemeinsam mit dem Epigrafiker Thomas Corsten vom Institut für Alte Geschichte und Altertumskunde, Papyrologie und Epigraphik der Universität Wien. Finanziert wird das Projekt durch die Gerda Henkel Stiftung in Düsseldorf.

#### QUELLE

**Cahill, N.D. (Hg.):** The Lydians and Their World, Istanbul 2010; erhältlich bei: Phoibos Verlag, Wien

#### WEBLINKS

[www.klass-archaeologie.uni-muenchen.de/projekte/kibyris/index.html](http://www.klass-archaeologie.uni-muenchen.de/projekte/kibyris/index.html)

*Das Kibyris-Projekt im Internet*

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1157704](http://www.spektrum.de/artikel/1157704)



DER SPIEGEL

Preis  
€ 7,50

NR. 4 | 2012

# GESCHICHTE



Jetzt  
im  
Handel.

## DIE PÄPSTE

Absolute Herrscher im Namen Gottes

**ROMS BISCHÖFE**  
Vom Stadtregiment  
zur Großmacht

**DOGMA**  
Der Fehler der  
Unfehlbarkeit

**SCHWEIZERGARDE**  
Stillgestanden  
für den Oberhirten

- REFORMATION** Zum Umdenken gezwungen
- PETERSDOM** Der lange Streit der Architekten
- KLEIDERORDNUNG** Was trägt der Papst?



## GEOTHERMIE

# Energie aus der Tiefe

In Pilotanlagen versuchen Ingenieure seit Jahren, die Wärme des Erdinneren mit Hilfe von Kraftwerken nutzbar zu machen. Doch abseits vulkanischer Zonen bleibt der Beitrag dieser Technologie noch überschaubar.

Von Karl Urban

Zum Verweilen lädt das Schild nicht gerade ein: »Achtung: Geothermiegebiet – Explosionsgefahr.« Der schwefelig-gelbe Boden nahe dem Weiher Krýsuvík im Südwesten Islands ist so heiß, dass Quellwasser aus Schlammlöchern blubbert. Vorsichtig durchqueren wir auf einem glitschigen Holzpfad das Naturspektakel. Es stinkt nach faulem Ei und Schwefel – vulkanischen Ausdünstungen aus den Tiefen der Erde.

Ungastliche Landschaften wie diese sind es, die Island mehrheitlich mit einheimischer Energie versorgen. 62 Prozent seines Bedarfs deckt der Inselstaat aus dem Boden. Auf diese Weise beheizt er nicht nur Wohnungen, Schwimmbäder und die verschneiten Straßen von Reykjavík, Erdwärmekraftwerke liefern auch fast ein Viertel des benötigten Stroms. Andere Länder eifern diesem Vorbild seit Jahren nach, vor allem solche mit aktiven Vulkanzonen. Die gesamte elektrische Leistung der Geothermiekraftwerke weltweit entspricht der von rund elf Atomkraftwerken; 80 Prozent von ihnen stehen auf dem pazifischen Feuergürtel. Überall um den Stillen Ozean herum stoßen tektonische Platten aufeinander und befeuern die Inselvulkane von Japan, Indonesien, den Philippinen und Neuseeland. Aus den gleichen Gründen ist die Erdkruste auch unter den westlichen USA, El Salvador oder Mexiko so heiß, dass sich hier geothermische

Stromerzeugung lohnt. Allein diese Länder planen bis 2015, ihre Geothermiekapazität um weitere zwei Drittel auszubauen.

Dabei gilt: Wenn man nur tief genug bohrt, gibt es auch anderswo ausreichend heißes Gestein. In Deutschland bemühen sich Pioniere seit Jahrzehnten, die noch weitgehend unerschlossenen Tiefen zu verstehen und für die Energieversorgung zu erschließen. Der Erfolg ist bislang mäßig. So waren im Musterland für den schnellen Ausbau erneuerbarer Energien Anfang 2012 gerade mal 7,3 Megawatt am Netz, entsprechend der Nennleistung weniger Windräder. Dabei ist die Erdkruste hier zu Lande in wenigen Kilometern Tiefe eigentlich genauso heiß wie in den brodelnden Schlammtöpfen Islands. Denn sie wird überall beständig von unten beheizt.

Seitdem die Erde vor rund 4,6 Milliarden Jahren entstand, fungiert der Erdkern als Wärmemotor des Planeten. Sein äußerer Teil ist flüssig und rund 5000 Grad Celsius heiß. Der große Temperaturunterschied zur Oberfläche bewirkt, dass sich im festen Erdmantel gewaltige Konvektionsströme umwälzen, die beständig thermische Energie vom Erdinneren nach oben transportieren und nebenbei die Plattentektonik in der Erdkruste am Laufen halten.

Für die Energieversorgung weniger vorteilhaft ist die Verteilung der geothermischen Wärme. Gut zwei Drittel davon treffen auf ozeanische Kruste. Vor allem entlang der Mittelozeanischen Rücken verpufft die Erdwärme damit kaum nutzbar für uns in die Weltmeere. Vulkaninseln auf diesen Meeresgebirgen wie Island oder Neuseeland stellen Ausnahmen dar. Dass die Erdkruste in stabileren kontinentalen Regionen überhaupt ausreichend warm ist, verdanken wir einer zusätzlichen Energiequelle in der Kruste selbst: Hier zerfallen nämlich seit Jahrmilliarden ständig natürlich vorkommende Uran-, Thorium- und Kaliumisotope. Die insgesamt nutzbare geothermische Wärme ist dadurch zwar nicht tatsächlich erneuerbar, wird sich aber in den kommenden Jahrtausenden kaum signifikant verringern.

Anfänglich ließ sich Erdwärme allerdings nur dort anzapfen, wo Magmakammern schlummern. Im toskanischen

## AUF EINEN BLICK

### TECHNIK MIT POTENZIAL – UND TÜCKEN

**1** Mit der Tiefe nimmt die Temperatur im Inneren der Erde zu. Doch die Wärme ließ sich lange Zeit nur an ausgewählten Standorten nutzen. Deshalb stehen heute fast alle größeren **Geothermiekraftwerke** der Welt in Vulkangebieten.

**2** Das Potenzial der Geothermie ist noch längst nicht ausgeschöpft. Derzeit entstehen viele neue Kraftwerke. Obwohl es in Deutschland kaum **vulkanische Tätigkeit** gibt, erschließen auch hier einige Pilotanlagen den heißen Untergrund.

**3** Die tiefe Erdwärme ist manchmal schwer zu bändigen. Vor der Bohrung wissen Experten selten, wie ergiebig der Untergrund ist. Auch können die Bohrungen **schwache Erdbeben** auslösen.



Vulkangebiet Lardarello etwa unternahm der italienische Geschäftsmann Piero Ginori Conti (1865–1939) im Jahr 1904 erste Versuche, aus dort ausströmendem Dampf über einen Dynamo Strom zu gewinnen. Dabei galt die Tiefenwärme selbst in Deutschland schon früh als Energiequelle der Zukunft. In der Anfangszeit der industriellen Revolution inspirierte sie Bernhard von Cotta (1808–1879) zu Prognosen für die Zeit nach Erschöpfung aller Kohlelager: Die »Innenwärme der Erde«, meinte der Geologe und Bergbauexperte, solle dann zur Oberfläche geleitet und dort »zur Erwärmung der Wohnungen oder selbst zur Heizung von Maschinen verwendet« werden.

Damals wussten die Bergleute bereits, dass die Erde immer heißer wird, je tiefer sie gruben. Pro Tiefenkilometer wächst die Temperatur durchschnittlich um 30 Grad Celsius. Eine Bohrung in drei Kilometer Tiefe müsste somit bereits auf gut 100 Grad Celsius heißes Gestein stoßen. Wie diese Wärme an die Oberfläche gebracht werden könnte, war jedoch längst noch nicht geklärt. Auch die geothermischen Besonderheiten mussten Geologen erst im Detail verstehen, denn der Wärmestrom unter der Bundesrepublik ist durch tektonische Prozesse mancherorts erhöht. Im Oberrheingraben steht die europäische Erdkruste unter Spannung. Sie zerbricht dort zwar nicht völlig, ist aber dünner und heißer.

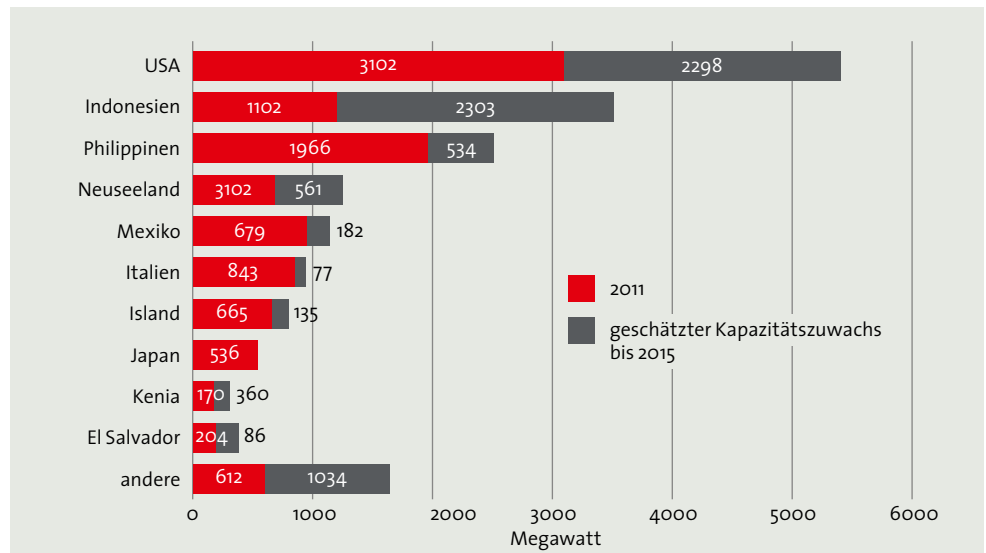


Das Geothermiekraftwerk Nesjavellir steht 30 Kilometer östlich von Reykjavík. Es versorgt Islands Hauptstadt mit Strom und heißem Brauchwasser.

SHUTTERSTOCK / COREPICS



Die weltweite geothermische Leistung wird derzeit mit hoher Geschwindigkeit ausgebaut. Alle stark profitierenden Länder besitzen Zugang zu aktiven Vulkanzonen.



SPKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: RUGGERO BERTANI, INTERNATIONAL GEOTHERMAL ASSOCIATION (IGA) / GEOTHERMAL ENERGY ASSOCIATION (GEA) & ISLANDBANKI, 2011

Anderswo wird die Kruste dagegen nicht auseinander gezerrt, sondern von oben gestaucht. Das gewaltige norddeutsche Becken füllte sich über hunderte Jahrmillionen mit Sedimenten, die immer schwerer auf der tektonischen Platte lasteten. Das passierte auch am Rand von Südbayern und des Allgäus, wo sich die Alpen auftürmten. Viel Gesteinsschutt rollte die Hänge hinab in das Molassebecken am Alpennordrand. Das drückte im Vorgebirgsraum die Erdkruste zusammen und machte sie für den Wärmestrom aus dem Erdinneren durchlässiger.

Eine umfassende Bestandsaufnahme erstellte das Büro für Technikfolgen-Abschätzung (TAB) 2003 für den Deutschen Bundestag – und attestierte unserem vulkanisch inaktiven Land enorme geothermische Energiereserven. Demnach ließe sich mit vorhandener Technik die riesige Energiemenge von 1200 Exajoule für die Stromgewinnung aus dem Untergrund fördern. Selbst wenn daraus permanent die Hälfte des einheimischen Strombedarfs gedeckt würde, bliebe das Reservoir über 1000 Jahre lang nutzbar.

Für die ersten Geothermiekraftwerke mussten Ingenieure zwei Probleme lösen: die Schwierigkeit, zuverlässig kilometertiefe Löcher zu bohren, sowie das Salz im Grundwasser.

Durch die Bohrlöcher können sie heißes Wasser aus tiefen Grundwasserleitern entnehmen, das im Kraftwerk zur Strom- und Wärmeproduktion abgekühlt wird. Danach gelangt es durch ein zweites Bohrloch in die Tiefe zurück, um sich dort erneut zu erhitzen. Jedoch ist das förderbare Thermalwasser hier zu Lande durch seinen hohen Salzgehalt ungeeignet, direkt eine Dampfturbine anzutreiben. Um Strom zu gewinnen, wird die Wärme in einem Zwischenschritt deshalb auf eine zweite Flüssigkeit übertragen. Das ist meist ein organisches Lösungsmittel mit einem deutlich niedrigeren Siedepunkt. Erst durch diesen so genannten Organic Rankine Cycle (ORC) und die verwandte Kalinatechnik auf Ammoniakbasis gelang es vor wenigen Jahren, mit ersten Kraftwerken neben Heizwärme auch Strom zu produzieren.

Das erfolgreichste von ihnen steht südlich von München: Im Vorort Unterhaching erschloss ein kommunaler Energieversorger ab 2004 eine Tiefenschicht aus Kalkstein. Abgelagert in der späten Jurazeit, hatte sich das Gestein in 3,5 Kilometer Tiefe im Lauf seiner Geschichte zersetzt. Dadurch wurde dieser so genannte Karst porös und für Thermalwasser durchlässig. Über eine Bohrung fördert das Kraftwerk heute bis zu 150 Liter Wasser pro Sekunde mit einer Temperatur

Unter den erneuerbaren Energien stellt die Geothermie weltweit noch einen kleinen Anteil. Wegen ihrer äußerst stetigen Verfügbarkeit ist sie als Energieform dennoch gefragt.

Technologie	elektrische Leistung		Jahresproduktion		Verfügbarkeit
	GW	Prozent	TWh	Prozent	Prozent
Wasserkraft	1010	76,4	3716	83,0	42
Biomasse	62	4,6	282	6,3	52
Wind	198	14,9	364	81	21
Geothermie	11	1,1	67	1,5	77
Fotovoltaik	40	3,0	49	1,1	14
Total	1321	100	4478	100	

SPKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: LADISLAUS RYBACH UND RENZI, RENEWABLES 2011 GLOBAL STATUS REPORT

von über 120 Grad Celsius und pumpt es dann abgekühlt über ein zweites Loch in die Tiefe zurück. Jährlich gewinnt es dabei 47 Gigawattstunden Heizwärme und versorgt damit zwei Drittel der Kleinstadt. Nebenbei produziert es rund 22 Millionen Kilowattstunden Strom – genug für ein Viertel der örtlichen Privathaushalte.

### **Künstliche Risse für die Durchlässigkeit**

Etwas anspruchsvoller waren die Arbeiten für das Kraftwerk in Landau in der Pfalz, das 2007 ans Netz ging. Denn im Oberrheingraben gibt es in der Tiefe kein ergiebiges und heißes Grundwasserreservoir. Geologen wussten nur, dass tektonische Kräfte das Gestein vor Jahrmillionen zerbrochen und damit etwas durchlässiger für Wasser gemacht hatten. Deshalb pumpten die Betreiber nun selbst Wasser in drei Kilometer Tiefe, um einige weitere Risse für hindurchströmendes Wasser zu schaffen, das dann die Wärme aufnehmen soll-

te. Das gelang in Grenzen: Mit durchschnittlich 60 Litern pro Sekunde fördern die Pumpen deutlich weniger heißes Wasser als in Unterhaching. Immerhin werden seitdem aber drei Megawatt elektrische Leistung bereitgestellt und einige hundert Haushalte mit Wärme versorgt.

Kraftwerke dieser Art reichen aber kaum aus, um den prognostizierten Schatz zu heben: Laut der TAB-Studie macht tiefes Thermalwasser wie in Unterhaching gerade mal ein Prozent, teilweise durchlässige Störungszonen wie in Landau nur vier Prozent des technischen Potenzials der tiefen Geothermie aus. Die verbleibenden 95 Prozent bestehen aus heißem, aber extrem dichtem Gestein, das kaum Wasser führt.

Dieses Problem war bereits in den 1960er Jahren bekannt. Schon damals tauchte die Idee auf, den dichten Untergrund für Wasser durchlässiger zu machen. Früh war klar, dass das nur mit roher Gewalt ging. Der US-Physiker George Kennedy erzwang 1964 sogar, das Gestein mit einer unterirdischen



Im bayerischen Dürrenhaar wurde von 2007 bis 2009 nach Erdwärme gebohrt. Die rund 4500 Meter tiefe Bohrung erschließt mit dem Malmkarst ein ergiebiges Reservoir für heißes Tiefenwasser. Im Münchener Raum hat diese Schicht einen Geothermieboom für die lokale Energieversorgung von Privathäusern ausgelöst.

MIT FRIEDL. GEN. DER HERRENRECHT AG



Viel versprechende Geothermieregionen liegen entlang aktiver tektonischer Plattengrenzen. Aber auch fernab von diesen, wie in Deutschland oder Australien, kann die Tiefenwärme mit neuen Methoden genutzt werden.

Atombombe zu zertrümmern. Eine zweite Idee verschwand dagegen auch mit dem Ende der Nukleareuphorie nicht in den Schubladen: Wasser sollte mit hohem Druck in die Tiefe gepresst werden, um dort das Gestein großflächig zu zertrümmern. Dieses »Fracking« genannte Verfahren nutzten Erdölunternehmen zunächst, um im Gestein fest gebundene Rohstoffe zu lösen (siehe Spektrum der Wissenschaft 8/2012, S. 72). Doch mit der gleichen Technik lässt sich auch ein künstlicher Grundwasserleiter schaffen. Durch ihn kann dann Wasser strömen, um die Hitze des Gesteins aufzunehmen, bevor es wieder hochgepumpt wird.

Bis Ingenieure solche verbesserten geothermischen Systeme (Enhanced Geothermal Systems, EGS) überhaupt erzeugen konnten, bedurfte es mehrerer Anläufe. Am US-amerikanischen Los Alamos National Laboratory – dem Entwicklungsort der ersten Atomwaffen – zerklüfteten sie zunächst das Gestein tief in einem alten Vulkanschlott mit Wasser. Es gelang den Forschern aber nicht, die Risse aus verschiedenen Bohrungen miteinander zu verbinden, um dauerhaft Wasser hindurchschicken zu können. Ein späteres Experiment im japanischen Hijiori westlich von Sendai misslang dann; zwei Bohrungen im Untergrund waren sich zu nahe gekommen. Es entstand ein hydraulischer Kurzschluss, wodurch hineingepresstes Wasser direkt in das zweite Bohrloch drang, ohne sich unterwegs ausreichend erwärmen zu können.

Ein europäisches Forschungskraftwerk entstand ab 1987 im elsässischen Soultz-sous-Forêt. Hier stießen die Ingenieure in das so genannte Grundgebirge vor, um die Granite hydraulisch durchlässiger zu machen. Das Ziel der Anlage war von Anfang an, vor allem die dabei im Gestein ablaufenden Prozesse genau zu analysieren. Sie speist deshalb zwar nur bescheidene 1,5 Megawatt ins Stromnetz ein. Dennoch eifern heute weltweit mehrere EGS-Projekte den Erfolgen aus dem Elsass hinterher. Immerhin hatte sich erstmalig ein nutzbares Rissgeflecht mit einer Fläche von drei Quadratkilometern gebildet. Das war mit Messungen schwacher Erschütterungen an der Erdoberfläche nachgewiesen worden.

Diese für Menschen kaum wahrnehmbaren Erschütterungen sind ein wichtiges Diagnosewerkzeug, entstehen sie doch unvermeidlich beim Einpressen des Wassers. Wird der Druck im Bohrloch richtig geregelt, verästeln sich die Risse und bilden so einen optimalen Wärmetauscher im dichten Gestein. Ist er dagegen zu hoch, verstärken sich die Mikrobenen, die dann auch für Menschen spürbar werden. Das mindert die Akzeptanz für die Zukunftsenergie rapide, was sich beim ersten kommerziellen EGS-Kraftwerk Europas am Stadtrand von Basel zeigte. Die Ingenieure begannen 2006 mit Hochdruck Wasser in die Tiefe zu pumpen, kontrollierten aber die Reaktion der Seismometer nicht genau genug. Das darauf folgende Erdbeben erreichte eine Magnitude von 3,4, woraufhin der



Geschäftsführer angeklagt wurde, ein Erdbeben mutwillig in Kauf genommen zu haben. Er wurde am Ende zwar freigesprochen – das Pilotkraftwerk jedoch dichtgemacht.

Die Anlage im pfälzischen Landau erhielt ab 2009 ebenfalls starken Gegenwind, als in der Stadt ein spürbares Beben auftrat. Mit einer Stärke von 2,7 war es zwar zehnmal schwächer als das in Basel, gleichwohl überraschte es Anwohner wie Betreiber. Bald darauf formierten sich im Oberrheingraben mehrere Bürgerinitiativen, die sich gegen ähnliche geplante Vorhaben engagierten. Die Landesregierung von Rheinland-Pfalz richtete daraufhin ein Mediationsverfahren ein, das nach über einem Jahr eine Einigung zwischen den meisten Gegnern und Befürwortern erbrachte. Demnach sollen Geothermieanlagen zukünftig sehr viel transparenter geplant, gebaut und betrieben werden.

Aus der Sicht der Betreiber handelt es sich bei solchen spürbaren Beben lediglich um behandelbare Kinderkrankheiten einer jungen Technik. Sie bräuchten bis zu fünf Jahre, ein einzelnes Kraftwerk zu errichten. So habe die Zeit bisher kaum ausgereicht, die Reaktion des Tiefengesteins auf eingepresstes Wasser gut zu verstehen. Ein Grundproblem der Geologie: Bis heute lässt sich das Verhalten des Gesteins selten genau vorhersagen, bevor es tatsächlich angebohrt wird. Das belegte auch eine Forschungsbohrung in Hannover, mit

der die Gebäude der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe beheizt werden sollten. Um das Gestein etwas aufzuweiten und dabei sein Bruchverhalten zu verstehen, pumpten die Geophysiker der Bundesanstalt Wasser mit besonders hohem Druck ins Gestein. Selbst die feinsten Seismometer registrierten dabei kaum Erschütterungen.

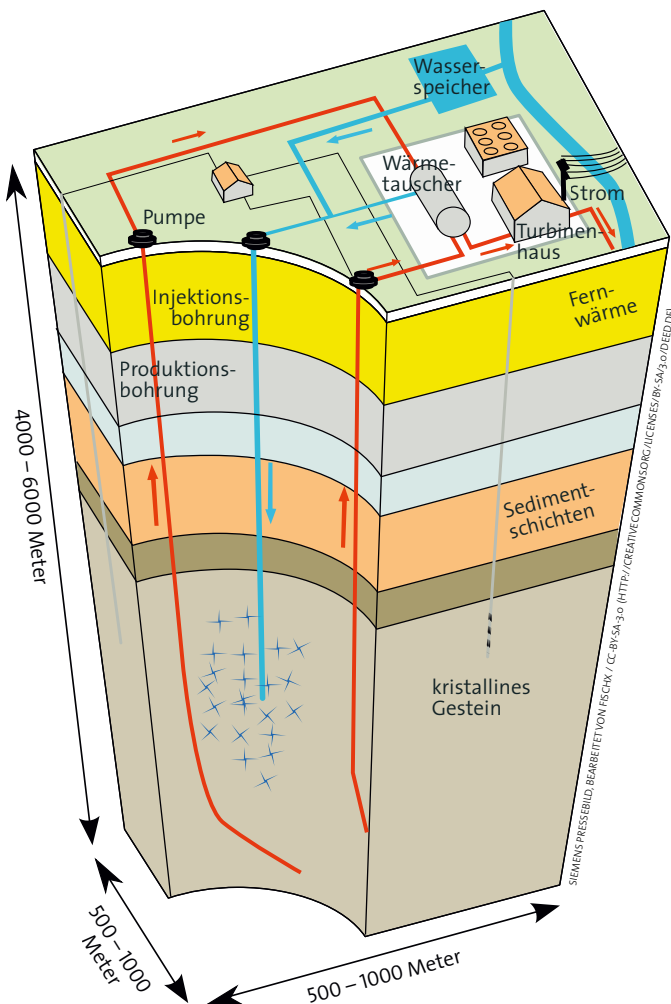
### Pumpen, ohne Erschütterungen auszulösen

Die Forscher versuchen nun, anhand der Messdaten aus Hannover und anderer Bohrungen ein Reaktionsmuster angepasst für andere Regionen abzuleiten. Es soll dann bei zukünftigen Bohrungen helfen, dass das Wasser so rasch wie möglich hinabgepumpt wird, ohne spürbare Erschütterungen hervorzurufen. Um das sicherzustellen, misst schon heute ein dichtes Netz aus Seismometern an jedem neuen Bohrloch, wie stark die Erdoberfläche schwingt, um damit die Arbeit an der Bohrstelle direkt zu steuern. Diese Herangehensweise erschwert aber die Tatsache, dass manchmal Tage bis Wochen vergehen, bis das ins Bohrloch gepresste Wasser tatsächlich die Erde erzittern lässt. Besonders im Oberrheingraben könnten sich deshalb spürbare Beben zukünftig kaum ganz ausschließen lassen. Zumindest müssten bei den Investitionskosten jedes Kraftwerks leichte Gebäudeschäden berücksichtigt werden.

Die Kosten der Tiefengeothermie sind aber bisher aus anderen Gründen unverändert hoch geblieben. Während die Einspeisevergütung für Solarstrom, Windkraft zu Lande und Bioenergie wegen technischer Fortschritte seit Jahren reduziert wird, stiegen die Fördersätze für die Erdwärme im Dezember 2011 das zweite Mal in Folge, zuletzt auf bis zu 25 Cent pro eingespeister Kilowattstunde Geothermiestrom. Eigentlich verfolgt das deutsche Erneuerbare-Energien-Gesetz aber das Ziel, Technologien mit sinkenden Zuschüssen marktfähig zu machen.

Die Geothermiebranche stößt allerdings immer wieder auf neue Probleme. So bohrten die Planer bei der Anlage in Landau ihre zwei Löcher zwar in ausreichendem Abstand in die wärmespendende Störungszone, damit das eingepresste Wasser aus dem Kraftwerk nicht zu schnell das Wasser an der Förderbohrung abkühlt. Einen solchen hydraulischen Kurzschluss hatte es im japanischen Hijiori ja schon einmal gegeben. Aber gerade diese Vorsicht löste nun in Landau spürbare Erschütterungen aus: Das zurückgeleitete Wasser traf in der Tiefe auf das wenig durchlässige Gestein der Störungszone. Dort baute sich ein zu hoher Druck auf, was die Betreiber letztlich dazu zwang, ihre Pumpen auf Dauer stark zu drosseln. Eine Lösung ist jedoch in Sicht, die auch die ursprünglich geplante Effizienz des Kraftwerks wiederherstellen könnte.

Mit »Enhanced Geothermal Systems« versuchen Ingenieure, auch trockenes Tiefengestein auszubeuten. Dafür wird Wasser mit hohem Druck ins Bohrloch gepresst, wodurch ein feines Rissgeflecht entsteht. Im so zerklüfteten Gestein kann später Wasser erhitzt und über weitere Bohrlöcher ins Kraftwerk geleitet werden.



te: Die zweite Bohrung soll in der Tiefe einen Seitenarm erhalten. Dabei entstünde eine weitere Möglichkeit, das kühle Wasser zurückzupumpen, was voraussichtlich das Tiefengestein vom Druck entlasten kann.

Selbst die geothermischen Musterschüler von Unterhaching würden heute mit mehr Bedacht in die Tiefe vorstoßen. Noch vor wenigen Jahren war es nicht einfach, die zerklüftete und damit ergiebige Thermalwasserzone der bayrischen Molasse zuverlässig anzubohren. Auf der Suche nach geeigneten Schichten setzen die Planer auf die Vibrationsseismik, die das tiefe Gestein mit Mess-LKWs durchleuchtet. Vor der ersten Bohrung entschied man sich in Unterhaching für eine relativ grobe zweidimensionale Tiefenkartierung. Seitdem erfuhr diese Technik allerdings einen massiven Entwicklungsschub. Ihre Ortsauflösung ist heute zehnmal hö-

her, was den über ein Dutzend geplanten Geothermiekraftwerken im südlichen Bayern zugutekommt.

Eine größere Rolle wird die geothermische Stromerzeugung in den kommenden Jahren trotzdem nicht spielen. Die aktuelle Ausbaugeschwindigkeit müsste sich vervielfachen, um in einigen Jahrzehnten eine Stütze für eine saubere Stromversorgung zu werden (siehe Interview unten). Es gibt jedoch wenig Spielraum, die hohen anfänglichen Investitionskosten und damit auch den Preis pro Kilowattstunde zu senken. Die Hälfte der Kosten verschlingt allein die Bohrung – und nicht immer erreicht sie ausreichend heißes Gestein oder das erhoffte ergiebige Thermalwasser.

Die größte Bremse eines schnellen Geothermieausbaus benennt aber schon der TAB-Bericht von 2003: Der elektrische Wirkungsgrad der Kraftwerke ist mit rund 18 Prozent ge-



INTERVIEW

## »Geothermie liefert Grundlaststrom«

Interview mit dem Geophysiker **Ladislaus Rybach**, Professor emeritus an der ETH Zürich

*Spektrum der Wissenschaft: Sie gehören zu den Vordenkern der Geothermie seit den Anfängen in den 1970er Jahren. Damals trieben zwei Ölkrisen die Regierungen weltweit dazu, über alternative Energien nachzudenken. Wie haben Sie den Ausbau der Geothermie in Mitteleuropa seitdem verfolgt?*

**PROFESSOR LADISLAUS RYBACH:** Es hat schon lange gedauert, bis wirklich Bewegung in die Branche kam. Ausgelöst wurde dies unter anderem durch die Einspeisevergütung in Deutschland, die mittlerweile in immer mehr Ländern eingeführt wird und zu einem Boom aller erneuerbaren Energien geführt hat. Das hat auch die Geothermie ein gutes Stück vorangebracht. Ich bin wirklich beeindruckt, welche Fortschritte das Gebiet zum Beispiel im Umfeld von München macht. Die zweite Entwicklung steht uns aber erst noch bevor: Denn natürliches heißes Tiefenwasser wie im südlichen Bayern gibt es bei Weitem nicht überall. Ganze Landstriche besitzen ausschließlich heißes und eher trockenes Tiefengestein. Aber dieses enthält trotzdem unvorstellbare Mengen an Wärme, die von der Erde auch ständig nachgeliefert wird.

*Allerdings gibt es bis heute nur wenige Pilotprojekte, und nicht alle Vorhaben waren überhaupt erfolgreich. Haben die Ingenieure anfänglich die Probleme unterschätzt?*

**RYBACH:** Ob Thermalwasser vorhanden ist und auch genutzt werden kann, weiß man erst nach der Tiefenbohrung und dem darauf folgenden Fördertest. Deshalb gibt es auch immer wieder Misserfolge. Einen davon habe ich kürzlich in Zürich erlebt. Da hat man viel Geld investiert, und am Ende war die Bohrung nicht ergiebig genug. Man kann eben von der Oberfläche aus nicht eindeutig sagen, welche Beschaffenheit des Gesteins und welche Wasserführung in drei bis vier Kilometer Tiefe vorkommen.

*Viele Ihrer Kollegen sehen den Ausbau der Geothermie in den nächsten Jahren trotzdem positiv und sagen, er wird sich bald stark beschleunigen. Warum hinkt die Geothermie den anderen erneuerbaren Energieträgern so deutlich hinterher?*

**RYBACH:** Lange Zeit war das gar nicht so. Geothermisch erzeugten Strom gibt es immerhin seit mehr als 100 Jahren. Bei der weltweit installierten Leistung hat uns erst 2007 die Fotovoltaik überholt. Selbst drei Jahre später speiste die

ring, so dass sie vergleichsweise warmes Wasser in den Untergrund zurückpressen, dessen Temperatur bloß für die Stromproduktion nicht mehr ausreicht. Stattdessen könnte die Wärme häufiger direkt an Haushalte und die Industrie verteilt werden als bisher. Aber das ist aufwändig und teuer. Dennoch versuchen die meisten Betreiber diesen Weg zu gehen. Die Unterhachinger etwa investierten gemeinsam in ein neues Fernwärmenetz. Weil aber die Gesamtkosten dafür höher sind als für die ganze Geothermieanlage, gelingt das nur bei Bohrungen in ausreichend dicht besiedelten Gebieten.

Parallel dazu gäbe es auch Abnehmer aus der Industrie: Dieses Potenzial berechneten Nils Kock und Martin Kaltschmitt vom Institut für Umweltfragen und Energiewirtschaft an der Technischen Universität Hamburg-Harburg. Demnach ließen sich Klärschlamm, Holzpellets und Lebensmittel



MIT FRIEDRICH VON HANGERS' SÖHNE

Die Bohrgeräte arbeiten einige Monate lang, um in drei bis fünf Kilometer Tiefe vorzudringen. Dafür müssen die mit Industriediamanten gehärteten Bohrmeißel regelmäßig gewechselt werden.

Geothermie noch immer 40 Prozent mehr Strom ins Netz ein, einfach weil Erdwärme viel beständiger verfügbar ist als Sonnenschein. Aber das exponentielle Wachstum der Fotovoltaik hat nun dazu geführt, dass die Geothermie völlig abgehängt wurde. Die Fotovoltaik wächst global um 40 Prozent pro Jahr. Wir sind dagegen froh, im Jahr auf fünf Prozent Steigerung zu kommen.

*Und das soll sich bald ändern?*

**RYBACH:** Wenn es nicht gelingt, maßgeschneiderte Wärmetauscher mit der EGS-Technologie (Enhanced Geothermal Systems) für den Untergrund zu entwickeln, wird es bei den geringen Wachstumsraten bleiben. Dafür sind die natürlichen heißen Quellen eben zu stark beschränkt. Mit künstlichen EGS-Durchlauferhitzern könnten wir dagegen überall Erdwärme anbieten und an sehr vielen Orten ganze Stadtteile mit Strom und Wärme versorgen.

*Für diese Wärmetauscher wird mit hohem Druck Wasser eingepresst, um im Gestein die nötigen Risse zu erzeugen. Dadurch hat bei den ersten Pilotkraftwerken die Erde vereinzelt spürbar gebebt. In Basel wurde 2006 nach Erschütterungen sogar ein Kraftwerksprojekt eingestellt. Wie bewerten sie solche Fälle?*

**RYBACH:** In Basel hat man einmal einen Fehler gemacht, der freilich weit reichende Konsequenzen hatte. Seitdem sind in Deutschland viele Bürgerinitiativen entstanden, allerdings nicht nur gegen Geothermiebohrungen. Da gibt es auch Widerstand gegen die Tiefenlagerung von Kohlendioxid und die Gasförderung aus tiefem Tongestein, die ebenfalls Erschütterungen auslösen können. In der Schweiz hat die Geothermie mittlerweile solche Proteste überstanden, weil wir damit öffentlich richtig umgegangen sind. In Sankt Gallen ging eine Volksabstimmung mit 80-prozentiger Zustimmung deutlich zu Gunsten der Geothermie aus. Es gibt aber eben Vorbehalte bei den Leuten, entweder aus Unkenntnis oder aus Angst vor dem Unbekannten. Diese müssen wir ernst nehmen.

*Können Sie den Menschen die Angst vor diesen Beben nehmen?*

**RYBACH:** Die Angst lässt sich nur überwinden, wenn wir problemlos laufende Anlagen vorweisen können. Ich habe selbst erlebt, wie es ist, wenn man Leute auf dem Kraftwerksgelände herumführt und sie ihre Hand an so eine Röhre legen kann und merken: Die ist ja heiß. Ich bin wirklich hoffnungsvoll, da derzeit entscheidende Länder energisch vorangehen. In den Vereinigten Staaten von Amerika gibt es schon mehrere Projekte, in denen Wärmetauscher gebaut werden; nun wird Australien aktiv. Dort scheinen die Ingenieure sehr darauf zu achten, ob und wie die Erdbeben erzeugt werden. Denn nur sehr leichte, nicht spürbare Erschütterungen sind technisch überhaupt erwünscht. Erst sie erzeugen im unterirdischen Reservoir das durchlässige und fein verteilte Kluftsystem, das wir für den Wärmeaustausch brauchen. Die größeren Magnituden versucht man bei den Mikrobeben ja gerade zu vermeiden, weil sie den Wärmetauscher verschlechtern, indem sie zu große Klüfte öffnen. Nicht nur in meinem Institut an der ETH Zürich arbeiten deswegen viele Leute daran, genau dieses Problem zu lösen: Wie lassen sich ausnahmslos kleine Risse erzeugen, ohne dass es an der Oberfläche spürbar bebt? Da ist die Forschung also dran.

*Wenn die Geothermie mancherorts aber weiter auf gesellschaftlichen Widerstand stößt: Könnte man dort bei den doch eher geringen Wachstumsraten nicht auch auf sie verzichten?*

**RYBACH:** Alle Länder, die nun die Kernenergie zurückfahren, sind dringend auf alle Alternativen angewiesen. Das bedeutet nicht nur Geothermie, aber sie muss im Energiemix der Zukunft dabei sein. Denn geothermische Kraftwerke liefern im Unterschied zu Wind- und Sonnenenergie den wichtigen Grundlaststrom. ∞

Die Fragen stellte **Karl Urban**.



mit geothermischer Abwärme trocknen. Auch wenn sich diese Industrien dafür nahe der Erdwärmequelle niederlassen müssten, könnte es sich lohnen. Denn bisher decken deren Bedarf an Niederenergiewärme vor allem fossile Energieträger, die immer teurer werden.

Andere Staaten haben diesen Schritt bereits vollzogen: Auf Island rieselt schon aus der Dusche allmorgendlich schwefelig riechendes Thermalwasser – und selbst im Winter bieten die Supermärkte einheimische Tomaten, angebaut in geothermisch beheizten Gewächshäusern. Dabei gibt es selbst auf der Vulkaninsel noch Ausbaupotenzial. Energieunternehmen versuchen etwa in einem kühnen Vorhaben zu ergründen, ob sich nicht noch viel heißere Wärmespeicher anzapfen lassen als bisher. Das Iceland Deep Drilling Project soll unter der Vulkaninsel Wasser fördern, das zwischen 400 und 600 Grad Celsius heiß ist. Dabei geht es in einen überkritischen Zustand über, in dem Dampf- und Flüssigphase nicht mehr zu trennen sind – was neue Probleme schafft.

Theoretisch würde das die elektrische Leistung eines Geothermiekraftwerks vervielfachen und dem Bereich moderner Kohlekraftwerke erreichen. Auch bei diesen treibt überkritisches Wasser eine Turbine an, weil deren Kessel ausreichend stark befeuert wird. Doch in freier Natur ist das nicht

ganz so einfach. Schon die Bohrkronen müssten gut gekühlt werden, um solcher Hitze im Gestein dauerhaft standzuhalten. Außerdem müssten die Rohre auf dem kilometerlangen Weg nach oben perfekt isoliert sein, damit der Wasserdampf unterwegs nicht zu stark abkühlt.

Ein Forscherteam war 2009 im Norden Islands sogar schon auf einem guten Weg dorthin: Mitten im Krafla-Vulkansystem bohrte es ein neues Loch. Doch bereits in zwei Kilometern Tiefe wurde der Bohrer immer wieder stark seitlich abgelenkt oder verhakte sich. Als die Mannschaft frustriert das gesamte Bohrgestänge wieder herausholte, fand es an der Krone die Reste von frischem Magma, das bei rund 1000 Grad Celsius mit dem Bohrgerät in Kontakt gekommen war. Damit war es dort selbst für die moderne Technik viel zu heiß. Noch ist unklar, ob sich überkritisches Wasser aus Bohrlöchern in Vulkanzonen wirklich nutzen lässt.

In Mitteleuropa wären so hohe Temperaturen erst in Tiefen von weit über zehn Kilometern anzutreffen. Auf diese Distanz werden Bohrungen extrem teuer; auch würde das Wasser auf dem Weg nach oben zu stark erkalten. Doch könnte man statt Wasser einfach eine andere Flüssigkeit ins Bohrloch drücken. Der US-Forscher Donald Brown vom Forschungszentrum Los Alamos schlug dafür Kohlendioxid vor:

## Erdwärme aus dem Vorgarten

**Schon ein Dutzend Meter unter dem Rasen** liegt die Erdtemperatur, unabhängig von Sommer und Winter, etwa bei konstant 10 Grad Celsius. Das genügt, um – unterstützt durch eine Wärmepumpe – Häuser in der kalten Jahreszeit zu beheizen, was immerhin mehr als die Hälfte des Energieverbrauchs deutscher Haushalte ausmacht. Der Markt für oberflächennahe Erdwärmehelzungen erlebte deshalb in den letzten Jahren zweistellige Wachstumszahlen. Schweden fördert auf diese Weise bereits mehr Wärme aus dem Boden als Island. Auch in Deutschland wurden schon über 265.000 Löcher gebohrt. Ein Fünftel aller Neubauten nutzt hier zu Lande gegenwärtig diese Technik.

Eigentlich handelt es sich bei dieser oberflächennahen Geothermie um Solarenergie: In den angebohrten Tiefen von 50 bis 250 Metern speichert der Boden überwiegend Sonnenstrahlung und lauwarmes einsickerndes Regenwasser. Ein typisches Bohrloch hat einen Durchmesser von 15 Zentimetern und kann in einigen Stunden fertiggestellt werden. Der Bohrmeister zwingt dann zwei Kunststoffschläuche hindurch und verfüllt den verbliebenen Hohlraum mit einem Zementgemisch. Schon kann Wasser durch den geschlossenen Kreislauf dieser Erdwärmesonde strömen. Es zieht thermische Energie aus dem Untergrund und überträgt sie in den Heizungskeller. Den Rest übernimmt dort die Wärmepumpe. Sie funktioniert wie ein Kühlschranks, aber mit umgekehrtem Kreisprozess. Zwar verbraucht die Pumpe dabei auch Strom, dennoch stammen gut 80 Prozent der genutzten Heizenergie aus dem Boden.

Erfolgreich ist die Technik vor allem, weil sie universell einsetzbar ist. Nur in wenigen Gebieten ist sie nicht erlaubt, etwa bei empfindlichen und damit schützenswerten Grundwasserschichten in der Tiefe. In seltenen Fällen birgt der Untergrund auch Tücken: Am Rathaus von Staufen im Breisgau sollte ein Feld aus sieben Erdwärmesonden für saubere Heizwärme sorgen. Eine davon verband daraufhin eine Grundwasserschicht mit einem bis dahin trockenen Sedimentgestein, das die chemische Verbindung Anhydrit enthält. Dieses Mineral begann durch Wasserzutritt zu Gips zu reagieren. Dabei wuchs sein Volumen um 60 Prozent – was einen Teil der historischen Altstadt des idyllischen Städtchens um über 30 Zentimeter anhub und dort viele Gebäude beschädigte.

In Ballungsräumen lässt sich die oberflächennahe Geothermie großflächig nutzen. So werden in Frankfurt am Main bereits ganze Felder aus Erdwärmesonden eingesetzt, um im Sommer Hochhäuser zu kühlen. Dazu wird der Kreisprozess der Pumpe kurzerhand umgedreht und die Wärme aus dem Gebäude in die Tiefe abgeführt. Als Folge erhitzt sich das Gestein unter der Stadt im Sommer auf über 20 Grad Celsius. Ein Teil der Wärme bleibt immerhin lange genug gespeichert, um im Winter wiederverwendet zu werden. Auch andere unterirdische Wärmequellen der Großstädte ließen sich so anzapfen, was eine internationale Studie am Beispiel von Köln zeigte: Rein rechnerisch ließe sich die ganze Stadt demnach aus ihrer eigenen Abwärme in der Tiefe beheizen.

*Karl Urban*



MEHR WISSEN BEI  
Spektrum.de



Unser Online-Dossier »Energie«  
finden Sie unter

[www.spektrum.de/energie](http://www.spektrum.de/energie)

Das Gas wird schon bei moderaten 31 Grad Celsius und einem vergleichsweise geringen Druck überkritisch. In die Tiefe gepumpt, würde ein Teil davon erhitzt werden und dann über ein zweites Bohrloch wieder aufsteigen. An der Oberfläche könnte es direkt eine Turbine antreiben. Würde man dafür verflüssigte Abgase eines fossilen Kraftwerks verwenden, ließen sich die Verlustanteile des Treibhausgases sogar in der Tiefe endlagern. Wenn die Technik denn mal funktioniert: Denn bisher haben Forscher die Interaktionen von CO<sub>2</sub> und Wasser in der Tiefe nicht hinreichend verstanden. Außerdem besitzt Kohlendioxid eine deutlich geringere Wärmekapazität, so dass ein solches Geothermiekraftwerk nur unwesentlich mehr Strom liefern würde als eine konventionelle Anlage auf Wasserbasis.

### Vulkane am Meeresgrund als Energiequelle?

In noch fernerer Zukunft ließe sich eine Idee mexikanischer Ingenieure realisieren: Ein Team um Gerardo Hiriart von der Nationalen Autonomen Universität in Mexiko-Stadt (Unam) will Spaltenvulkane im Pazifik erschließen. Entlang der Mittelozeanischen Rücken schießt aus der Tiefe heißer Dampf unter hohem Druck hervor, an machen Stellen sogar in überkritischem Zustand. Die Forscher schlagen vor, große Trichter über diese so genannten schwarzen Raucher zu stülpen, um aus dem ständig emporquellenden Dampf über der Wasseroberfläche auf Plattformen mit Turbinen Strom zu gewinnen. Selbst wenn das gelänge, dürften nur solche Staaten von der Technik profitieren, die wie Mexiko Zugang zu küstennahen Meeresvulkanen besitzen.

Weltweit liegt das größte Potenzial jedoch weiterhin hier zu Lande in heißen Gesteinszonen mehrere Kilometer unter der Erdoberfläche. Hierhin vorzudringen wäre für eine zukünftige Energieversorgung aus überwiegend erneuerbaren Quellen dringend vonnöten: Denn überall dort, wo Windkraftanlagen und Fotovoltaik massenhaft fossile und atomare Kraftwerke ersetzen, werden die Stromnetze durch die stark schwankende Einspeisung schnell überfordert. Dagegen können Geothermiekraftwerke schon heute über 75 Prozent des Jahres laufen, mit steigender Tendenz.

Damit ist die Erdwärme die stetigste unter den erneuerbaren Energieform. Sie müsste allerdings deutlich schneller wachsen, um diesen Vorteil wirklich ausspielen zu können. Zu beobachten ist dieser Trend derzeit immerhin ansatzweise: Ein Bericht des IPCC prognostizierte anhand laufender Bauvorhaben vieler Staaten, dass die weltweit installierte geothermische Leistung in den nächsten drei Jahren fast

doppelt so schnell zunimmt wie in den letzten drei Jahrzehnten. Mittelfristig könnte der Erfahrungsschatz dann ausreichen, mit der EGS-Technik auch sehr viel mehr heiße Gesteinsschichten zu erschließen. Im besten Fall würden so bis zum Jahr 2050 drei Prozent des globalen Strombedarfs gedeckt werden. Noch mehr könnte die Erdwärme beim Beheizen und Kühlen von Gebäuden beitragen, unterstützt von oberflächennahen Bohrungen (siehe Kasten links). Dafür wird sogar ein Anteil von fünf Prozent prognostiziert.

Die Zahlen machen jedoch deutlich, dass Geothermie für die Stromversorgung fernab vulkanischer Zonen ein Randphänomen bleiben wird. Auch sind die Vorhersagen für den künftigen Ausbau längst nicht so zuverlässig wie bei anderen erneuerbaren Energien. Denn bisher stieß noch jede kilometertiefe Bohrung auf geologische Eigenheiten der örtlichen Erdkruste, mit der sich Ingenieure und Geologen auseinandersetzen mussten. Selbst die kochenden Schlamm-töpfe im isländischen Krýsusík sorgten für Überraschungen: Bis 1999 versorgte hier ein kleines Heizkraftwerk zwei nahe gelegene Orte mit Energie. Eines Tages riss eine Dampfexplosion das unzulänglich gesicherte Bohrloch kurzerhand in Stücke. Die Behörden setzten von da an auf Tourismus und bauten dort einen Holzsteg und ein öffentliches WC. Nach einer weiteren Explosion blieb nur der Steg übrig. Und das Schild mit den drei mahnenden Worten: »Achtung: Geothermiegebiet – Explosionsgefahr.« ~

#### DER AUTOR



**Karl Urban** studierte Geowissenschaften in Tübingen und Reykjavik. Er arbeitet als freier Wissenschaftsjournalist in Heidelberg.

#### QUELLEN

**Brown, D.:** A Hot Dry Rock Geothermal Energy Concept Utilizing Supercritical CO<sub>2</sub> Instead of Water, Proceedings Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford 2000

**Büro für Technikfolgenabschätzung im Deutschen Bundestag:** Möglichkeiten geothermischer Stromerzeugung in Deutschland, 2003

**Edenhofer, O. et al.:** Intergovernmental Panel on Climate Change: Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation, 2012.

<http://srren.ipcc-wg3.de/>

**Hiriart, G. et al.:** Submarine Geothermics; Hydrothermal Vents and Electricity Generation, Proceedings World Geothermal Congress, Bali 2010

**Kock, N., Kaltschmitt, M.:** Effizientere Ressourcenausnutzung geothermischer Anlagen – technische Möglichkeiten und deren Bewertung. In: Zeitschrift für Energiewirtschaft 4, S. 275–286, 2011

**Lund, J.:** 100 Years of Geothermal Power Production, GHC Bulletin, 2004

#### WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1157705](http://www.spektrum.de/artikel/1157705)

# Auf dem Weg zum künstlichen Gehirn

Ein ambitioniertes Projekt zielt darauf ab, in zehn Jahren das menschliche Gehirn vollständig zu simulieren. Es verspricht nicht nur eine Revolution in den Neurowissenschaften, sondern auch grundlegende neue Erkenntnisse für die Computertechnik.

Von Henry Markram

**E**s wird Zeit für einen neuen Ansatz bei der Erforschung des menschlichen Gehirns. Bisher haben Wissenschaftler die einzelnen Teile unseres Denkorgans – von Neurotransmittern über neuronale Schaltkreise bis hin zu den übergeordneten Arealen für bestimmte Funktionen – gesondert untersucht. Dieser reduktionistischen Methode sind bedeutende Erkenntnisse zu verdanken. Mittlerweile stößt sie jedoch an ihre Grenzen. Sie taugt einfach nicht dazu, die Funktionsweise jener informationsverarbeitenden Maschine in unserem Kopf, die vielleicht das komplexeste System im Universum ist, in ihrer Gesamtheit zu erfassen. Dafür muss zum Reduzieren das Konstruieren, zum Zerlegen das Zusammenbauen kommen. Gefragt ist also ein neues Paradigma, das Analyse und Syn-

these in sich vereint. Schon der Urvater des Reduktionismus, der französische Philosoph René Descartes schrieb, man müsse die Teile untersuchen und sie dann zusammenfügen, um das Ganze neu zu erschaffen.

Genau darum geht es beim Human Brain Project (kurz HBP), an dem sich 130 Universitäten in aller Welt beteiligen: Wir wollen ein vollständiges menschliches Gehirn simulieren. Das Vorhaben konkurriert mit aktuell noch fünf anderen im Rahmen der Flaggschiffinitiative der Europäischen Union um ein Preisgeld von einer Milliarde Euro, das den beiden Gewinnern des Wettbewerbs ab 2013, verteilt über zehn Jahre, zur Verfügung stehen wird (siehe Kasten auf S. 88).

Wenn das ambitionierte Vorhaben gelingt, verfügen wir am Ende über ein Forschungsinstrument, zu dem bisher nichts Vergleichbares existiert. Stellen Sie es sich als den leistungsfähigsten Flugsimulator aller Zeiten vor, nur dass man damit nicht durch imaginäre Lüfte fliegt, sondern im Detail nachvollzieht, was beim Denken und Empfinden in unserem Kopf vorgeht. Dieses »virtuelle Gehirn« – ein Programm, das auf Supercomputern läuft – wird in Aufbau und Funktion sämtliche relevanten Informationen beinhalten, die Generationen von Neurowissenschaftler bis heute zusammengetragen haben.

Forscher überall auf der Welt sollen es nutzen können, indem sie Rechenzeit für eigene Experimente reservieren –

## AUF EINEN BLICK

### DAS DENKORGAN ALS COMPUTERMODELL

**1** Anhand von Computermodellen lassen sich bereits einzelne **Hirnfunktionen** digital abbilden. So hat die Forschungsgruppe des Autors im Rahmen des Projekts **Blue Brain** die Arbeitsweise einer **kortikalen Säule** simuliert.

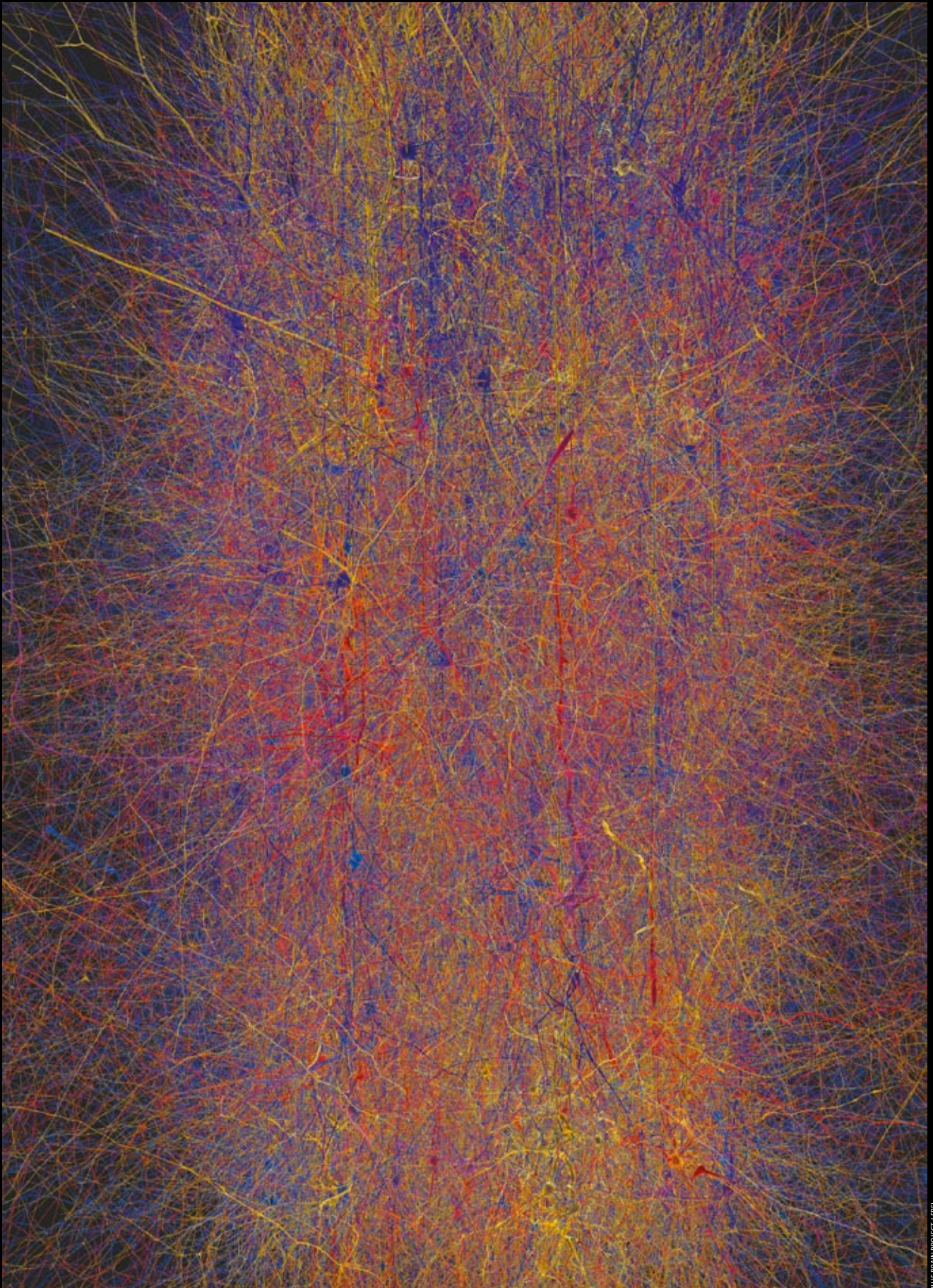
**2** Bis zum Ende des Jahrzehnts werden Rechner so leistungsfähig sein, dass sie **das gesamte menschliche Gehirn virtuell nachbilden** können, indem sie sämtliche Abläufe darin von der Ebene des einzelnen Neurons bis zum gesamten Organ nachvollziehen.

**3** Ziel des Human Brain Projects ist es, ein solches simuliertes Gehirn zu schaffen. Es würde einzigartige Einblicke in die Grundlagen unserer **kognitiven Fähigkeiten** erlauben und der Entwicklung **künstlicher Intelligenz** neue Impulse verleihen.

**4** Ein virtuelles Gehirn könnte aber auch in der medizinischen Forschung als Ersatz für das echte Organ dienen und so etwa neue Erkenntnisse über die **Ursachen psychischer Störungen** wie des Autismus liefern oder die risikolose **Prüfung neuer Psychopharmaka** »in silico« ermöglichen.

**Im Rahmen des Projekts Blue Brain gelang der Gruppe des Autors bereits die Simulation einer 10 000 Neurone umfassenden kortikalen Säule, der Grundeinheit für die Informationsverarbeitung in der Hirnrinde. Die Farben zeigen jeweils die momentane Membranspannung an. Experimentell lässt sich die Gesamttätigkeit einer so großen Hirnregion bis hinab zu den einzelnen Nervenzellen nicht ermitteln.**





BLUE BRAIN PROJECT / EPFL





BILDE BRAIN PROJECT / EPEL

Die Simulation der kortikalen Säule erlaubt es, in das Nervennetz hineinzuzoomen. Auf dem hier gezeigten Ausschnitt sind unterschiedlich eingefärbte Pyramidenzellen mit ihren jeweiligen Fortsätzen zu sehen.

ähnlich, wie Astronomen Beobachtungszeit auf großen Teleskopen buchen. Das gibt ihnen die Möglichkeit, Hypothesen über die Funktionsweise des gesunden wie auch des kranken Gehirns zu prüfen, bessere Diagnosemethoden für seelische Leiden wie Autismus und Schizophrenie auszuarbeiten oder neue Therapieansätze für Erkrankungen wie Depression und Alzheimerdemenz zu entwickeln. Die emulierten Schaltpläne für einige zehn Billionen neuronaler Verknüpfungen dürften aber auch wertvolle Hinweise zur Konstruktion von hirnhähnlichen Computern und intelligenten Robotern geben. Von der virtuellen Nachbildung des Gehirns werden also Neurowissenschaften, Medizin und Informationstechnologie gleichermaßen profitieren.

Eine erste Version könnte schon Ende dieses Jahrzehnts lauffähig sein; bis dahin wird jedenfalls die benötigte Rechenleistung zur Verfügung stehen. Das Modell würde dann eine Plattform bieten, in die sich alles vorliegende Wissen integrieren lässt. Dabei sollte es bereits wertvolle Erkenntnisse liefern, bevor es sämtliche Hirnfunktionen exakt nachbildet. So wird es Vorhersagen über unbekannte Aspekte ermögli-

chen und dadurch helfen, künftige Experimente gezielter zu planen und fruchtlose Bemühungen zu vermeiden. Neu gewonnenes Wissen lässt sich mit Bekanntem verknüpfen, so dass sich die Lücken im Modell Stück für Stück mit immer realistischen Details füllen werden – bis schließlich ein vollständiges, funktionsfähiges Gegenstück des Gehirns existiert, das dem Vorbild von der Gesamtarchitektur bis hin zu den molekularen Details exakt entspricht.

### Beweggründe für die Modellierung des Gehirns

Ein Hirnsimulator wird vor allem aus zwei Gründen dringend benötigt. Der eine ist, dass allein in Europa 180 Millionen Menschen – etwa ein Drittel der Bevölkerung – an Erkrankungen des Gehirns leiden. Diese Zahl wird mit der stetig steigenden Lebenserwartung, die das Durchschnittsalter der Bevölkerung anhebt, weiter wachsen, da die Demenzen als wichtigste Gruppe geistiger Störungen erst in höheren Jahren auftreten. Pharmaunternehmen investieren derzeit zu wenig in neue Therapien für Erkrankungen des Nervensystems, weil deren Ursachen meist nicht genau bekannt sind. Eine Gesamtsicht des Gehirns bietet die Chance, solche Krankheiten nach biologischen Kriterien neu zu beschreiben, statt sie nur als Konstellationen bestimmter Symptome zu betrachten. Diese Betrachtungsweise würde den Schritt hin zu selektiv wirksamen Therapien erleichtern, die bei den zu Grunde liegenden Störungen ansetzen.

Der zweite Beweggrund für das Projekt liegt darin, dass die Informatik in gewissem Sinn in einer Sackgasse steckt. Trotz unaufhörlich steigender Rechenleistung scheitern Computer immer noch an vielen Aufgaben, die selbst die Gehirne von nicht besonders hoch entwickelten Tieren mühelos bewältigen. Informatiker haben zwar große Fortschritte im Bereich der visuellen Mustererkennung erzielt. Dennoch sind Computer nach wie vor kaum in der Lage, den Kontext einer Szene für die Deutung heranzuziehen oder zufällige Informationshappen zur Vorhersage künftiger Ereignisse zu verwenden – was zum Alltagsgeschäft des Gehirns zählt.

Da leistungsfähigere Computer auch mehr Energie benötigen, wird ihr Strombedarf eines nicht allzu fernen Tages nicht mehr zu decken sein. Die Rechengeschwindigkeit heutiger Supercomputer bemisst sich in Petaflops – einer Billion einfacher Berechnungen (Gleitkommaoperationen) pro Sekunde. Die nächste Generation, die um 2020 zu erwarten ist, dürfte 1000-mal so schnell arbeiten. Ihre Rechenleistung bewegt sich dann im Bereich von Exaflops – Trillionen Rechenschritten pro Sekunde. Ein solcher Computer wird etwa 20 Megawatt Strom verbrauchen, was dem Energiebedarf einer Kleinstadt im Winter entspricht. Um Rechner zu bauen, die einige der Dinge, die das menschliche Gehirn vermag, ohne exorbitanten Energieverbrauch zu Stande bringen, bedarf es also grundsätzlich neuer Strategien.

Es ist sicher nicht das Schlechteste, sich bei der Suche danach vom menschlichen Gehirn inspirieren zu lassen, das für seine vielfältigen Intelligenzleistungen nur rund 20 Watt verbraucht – etwa so viel wie eine schwache Glühbirne oder

ein Millionstel des Energiebedarfs eines Exaflop-Computers. Um zu erkennen, wie unser Denkapparat das schafft, müssen wir seine Organisation auf zahlreichen Komplexitätsstufen verstehen, von den Genen bis zur Ebene des bewussten Denkens. Vieles ist schon bekannt, und es gilt nur noch, die vorhandenen Informationen zu einem Gesamtbild zu verschmelzen. Das Gehirnmodell soll dies ermöglichen.

Kritiker bezweifeln, dass sich das menschliche Gehirn vollständig simulieren lässt. Einer ihrer wichtigsten Einwände lautet: Es ist unmöglich, sämtliche Verbindungen seiner rund 100 Billionen Synapsen virtuell zu repräsentieren, weil man sie überhaupt nicht alle erfassen kann. Das stimmt, und deshalb werden wir es auch gar nicht erst versuchen. Wir wollen die unzähligen Kontakte zwischen den Hirnzellen auf andere Weise reproduzieren. Der Trick besteht darin, das Konstruktionsprinzip des Gehirns nachzuahmen: die Regeln für seinen Aufbau, die sich während seiner Evolution herausgebildet haben und bei der Entwicklung eines jeden Fötus immer wieder befolgt werden. Ihre Kenntnis sollte theoretisch ausreichen, um mit der Simulation des Gehirns zu beginnen.

Die Komplexität, die aus diesen Regeln erwächst, ist zwar enorm, weshalb wir die schnellsten Supercomputer benötigen, um sie abzubilden. Die Regeln selbst zu enträtseln erscheint dagegen wesentlich leichter. Und wenn uns das gelingt, gibt es keinen vernünftigen Grund, weshalb wir sie nicht genauso anwenden können wie die Natur, um ein Gehirn »in silico« zu konstruieren.

Ich meine hier Regeln wie die, nach denen Gene aktiv werden und so dafür sorgen, dass verschiedene Typen von Hirnzellen entstehen, sich nach einem bestimmten Plan im Gehirn verteilen und Verbindung untereinander aufnehmen. Einige haben meine Kollegen und ich bereits entdeckt, als wir vor etwa 20 Jahren mit unseren grundlegenden Arbeiten zur Simulation von Hirnfunktionen begannen. Damals erstellten wir Steckbriefe einzelner Nervenzellen. Wir sammelten große Mengen an Daten über die geometrischen Merkmale verschiedener Neuronentypen und schufen für Hunderte davon digitale dreidimensionale Rekonstruktionen. Mit der Patch-Clamp-Technik, bei der die Spitze einer mikroskopisch feinen Glaspipette auf die Oberfläche einer Zelle aufgesetzt wird, um die Ionenströme durch ihre Membrankanäle zu messen, gelang es uns zudem, die elektrischen Eigenschaften der jeweiligen Neurone zu erfassen.

Zur Simulation einer einzelnen Nervenzelle bedurfte es 2005 noch eines leistungsfähigen Computers und einer dreijährigen Doktorarbeit. Doch schon damals zeichnete sich ab, dass bald anspruchsvollere Projekte realisierbar wären. Wir sahen die Chance, auch größere Ausschnitte aus dem Schaltplan des Gehirns modellieren zu können, selbst wenn wir

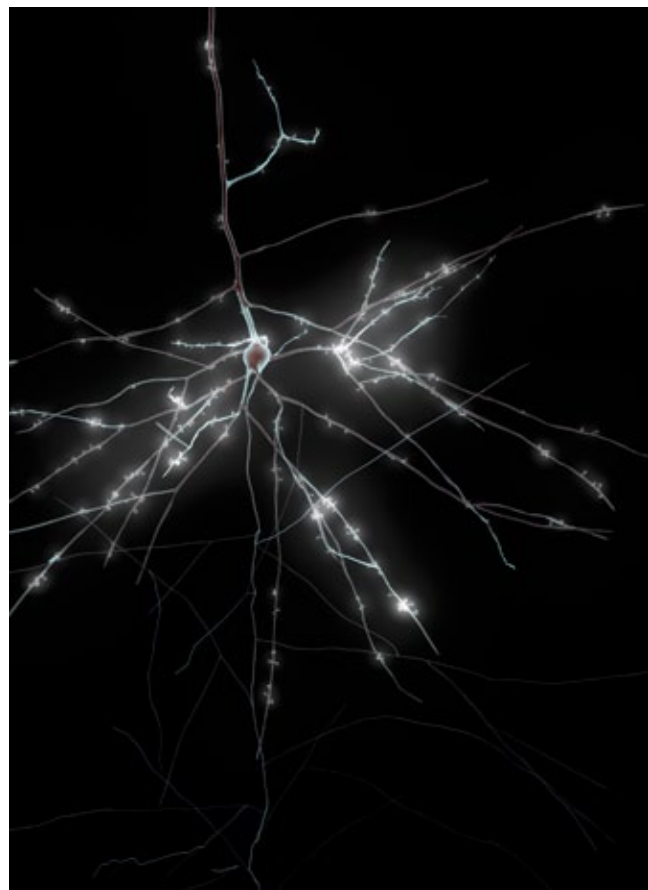
Selbst Details einzelner Nervenzellen lassen sich im Computermodell darstellen. Als helle Knöpfe erscheinen hier die Dornfortsätze (spines) auf den Dendriten. Sie bilden Synapsen, die Kontaktstellen zu vorgeschalteten Neuronen.

ihre Eigenschaften noch nicht vollständig kannten. Am Brain and Mind Institute der Eidgenössischen Technischen Hochschule Lausanne starteten wir daher eines der Vorgängerprojekte des HBP: das Blue Brain Project. Wir wollten »integrative Computermodelle« entwickeln, die alle verfügbaren Daten und Hypothesen zu einem bestimmten neuronalen Netzwerk enthalten, mögliche Widersprüche zwischen ihnen auflösen und Hinweise geben, wo noch wichtige Informationen fehlen.

### Simulation einer kortikalen Säule

Als Pilotprojekt konstruierten wir das Modell einer Hirnstruktur, die als kortikale Säule bezeichnet wird und ein äußerst kompaktes Netzwerk aus einigen zehntausend Neuronen darstellt. Würde man mit einem feinen Hohlbohrer einen Gewebszylinder von einem halben Millimeter Durchmesser und 1,5 Millimeter Höhe aus der Hirnrinde entnehmen, wäre dies eine solche Säule.

Es handelt sich um eine höchst effektive informationsverarbeitende Einheit. Deshalb wurde sie nach ihrer Erfindung im Verlauf der Evolution wieder und wieder kopiert – bis die Hirnrinde ganz damit bedeckt war und sich zur Vergrößerung ihrer Oberfläche in Falten legen musste, damit noch mehr solche Einheiten Platz fanden. Die Säule durchmisst alle sechs Schichten des Neokortex, des äußersten Bereichs der Hirnrinde. Ihre neuronalen Verbindungen zum Rest des Gehirns differieren stark zwischen den einzelnen Lagen. Die







Organisation dieser Verbindungen ähnelt der Art, wie eine Telefonleitung anhand der Vorwahl über Vermittlungsstationen an den Gesprächspartner aufgebaut wird.

Jede kortikale Säule enthält einige hundert verschiedene Neuronentypen. In unser Modell, das auf einem IBM Blue Gene Supercomputer lief, bauten wir alle verfügbaren Informationen über deren Verteilung in sämtlichen Schichten ein, bis wir das »Rezept« für eine kortikale Säule in einer neugeborenen Ratte erstellt hatten. Wir instruierten den Rechner auch, die virtuellen Neurone miteinander zu verbinden – allerdings nur in der Weise und dem Umfang, wie das echte Nervengewebe im Hirngewebe tun.

Wir brauchten drei Jahre, um die Software für das erste Modell einer kortikalen Säule zu entwickeln. Doch am Ende waren wir in der Lage, diese funktionelle Einheit des Gehirns originalgetreu zu simulieren: Ihr virtuelles Gegenstück reproduzierte alles, was über sie bekannt ist. Damit hatten wir zugleich den Beweis erbracht, dass unser Konzept der »Synthesebiologie« funktioniert und völlig neue Forschungsansätze ermöglicht.

Noch handelte es sich um ein statisches Modell, das einem Teil des Gehirns im komatösen Zustand entsprach. Eigentlich wollten wir jedoch wissen, ob es auf einen äußeren Reiz wie eine echte kortikale Säule reagieren würde – wenngleich eine, die vom Rest des Gehirns getrennt ist. Also stimulierten wir 2008 unser virtuelles Hirnstückchen mit einem simulierten elektrischen Impuls.

Das Ergebnis war faszinierend: Wir konnten beobachten, wie die Neurone begannen, sich miteinander zu unterhalten. Spannungspulse oder »Spikes« analog zu den Aktionspotentialen, welche die Laute in der Sprache des Gehirns bilden, breiteten sich über die virtuelle Säule hinweg aus und erfassen das gesamte Netzwerk. Sie bewegten sich zwischen den Schichten auf und ab, oszillierten hin und zurück, wie man das auch an lebenden Hirnschnitten beobachten kann. Dieses Verhalten hatten wir nicht in das Modell einprogrammiert; es ergab sich spontan aus der Architektur des Netzwerks und blieb auch nach dem Ende der Stimulation noch kurze Zeit erhalten – als Beweis für die innere Eigendynamik, welche die Säule entfaltet, während sie den Reiz verarbeitet.

### Wie das Simulationsprogramm funktioniert

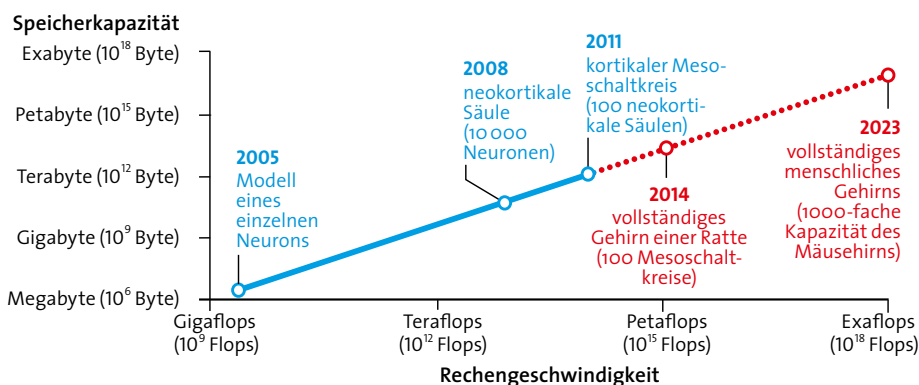
Seitdem haben wir unser integratives Modell stetig verfeinert, indem wir es mit neuen Erkenntnissen von Labors aus aller Welt fütterten. Auch unsere Software entwickeln wir kontinuierlich weiter, so dass wir jede Woche, wenn wir die Simulation neu starten, mit mehr Daten und Regeln arbeiten und so der Realität noch ein Stückchen näher kommen. Im Moment sind wir dabei, das Modell auf eine größere Hirnregion auszudehnen. Danach wollen wir es auf ein komplettes Gehirn erweitern – zunächst einmal das einer Ratte.

Die Aufgabe ist gigantisch. Es gilt nicht nur, enorme Mengen an Daten und Informationen von Forschern weltweit auf einheitliche Weise zusammenzuführen und auf Muster oder Regeln zu durchsuchen, welche die Organisation des Gehirns

## Mehr Gehirn durch leistungsfähigere Computer

Die Chancen für den Aufbau eines virtuellen Gehirns, das detailliert genug für wichtige wissenschaftliche Untersuchungen ist, steigen mit der Rechengeschwindigkeit der verfügbaren

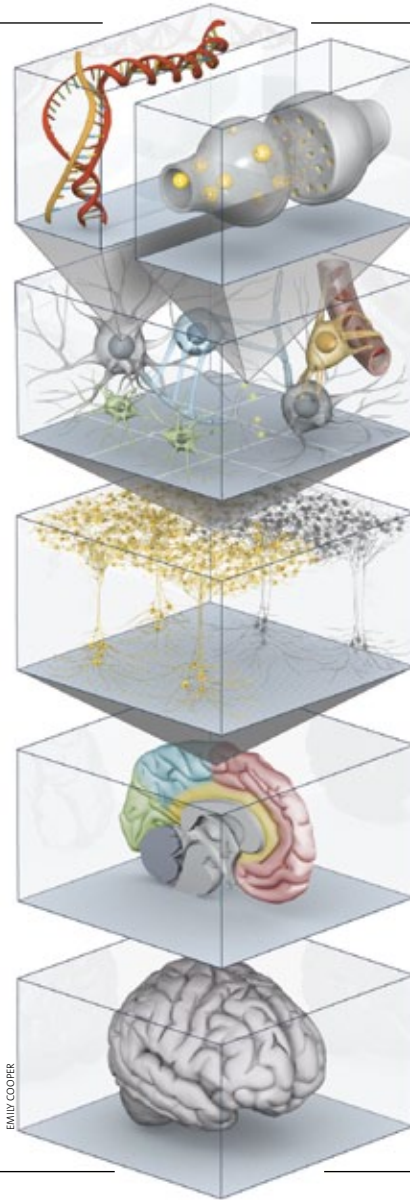
Computer. Im Jahr 2008 gelang es, ein digitales Pendant eines zylindrischen Gewebestücks aus der Hirnrinde der Ratte zu erstellen, einer so genannten kortikalen Säule. Damals lag die Rechenleistung im Bereich von



Teraflops (Billionen elementaren Rechenoperationen pro Sekunde). Mit dem Vorstoß der Supercomputer in den Petaflop- und schließlich Exaflop-Bereich wollen die Protagonisten des Human Brain Project komplette Simulationen des Gehirns von Ratten und später auch des Menschen erstellen.

## Nachbau des Gehirns

**Ziel des Human Brain Project** ist eine Computersimulation der rund 100 Milliarden Neurone in unserem Kopf und ihrer 100 Billionen Verbindungen. Dafür bewerben sich die verantwortlichen Wissenschaftler um Fördermittel in Höhe von einer Milliarde Euro bei der Europäischen Union. Das Computermodell würde die Hirnfunktion auf sämtlichen Stufen der Informationsverarbeitung nachvollziehen, von der chemischen und elektrophysiologischen Signalgebung bis hin zu kognitiven Leistungen, die intelligentem Verhalten zu Grunde liegen.



### MOLEKULARE EBENE

Die Erkenntnisse aus einem Jahrhundert neurologischer Forschung seit der ersten Untersuchung einer Hirnzelle unter dem Mikroskop fließen in das digitale Abbild dieser Zelle ein. Sie verfügt über die molekularen Bestandteile, um alle wesentlichen Merkmale eines Neurons realitätsnah zu simulieren. Dazu gehört insbesondere die Übertragung elektrischer und chemischer Signale.

### ZELLULÄRE EBENE

Auch die äußere Gestalt der Neurone und nichtneuronalen Gliazellen mit ihren Axonen und Dendriten, die Signale empfangen und aussenden, werden exakt nachgeahmt.

### NEURONALE SCHALTKREISE

Ferner bildet das Hirnmodell die Vernetzung der Neurone mit ihren Nachbarzellen und zwischen verschiedenen Hirnregionen nach, um Hinweise auf die Ursachen komplexer psychischer Erkrankungen wie Autismus oder Schizophrenie zu geben.

### HIRNREGIONEN

Bedeutende Untereinheiten des Gehirns wie der für Gefühle zuständige Mandelkern, der Hippocampus als Tor zum Gedächtnis oder das unser Verhalten steuernde Frontalhirn lassen sich isoliert oder in Interaktion mit anderen Regionen untersuchen.

### GESAMTES ORGAN

Ein virtuelles Gehirn soll das echte Organ für Forschungszwecke ersetzen. Zum Beispiel böte es die Möglichkeit, die Auswirkungen einer Mutation zu untersuchen, indem man ein bestimmtes Gen durch Löschen des betreffenden Computerkodes ausschaltet, was Wissenschaftler heute mit gezielt eingeführten Mutationen im Tierexperiment tun. Dabei entfielen nicht nur die langwierige Züchtung, sondern es ließen sich auch beliebig viele Versuchsbedingungen simulieren.

bestimmen. Anschließend müssen wir auch die dahinterstehenden biologischen Vorgänge in mathematische Gleichungen übersetzen und parallel dazu Programme entwickeln, die es erlauben, diese Gleichungen auf Supercomputern zu lösen. Dabei ist darauf zu achten, dass die Software insgesamt ein virtuelles Gehirn erzeugt, das die zu Grunde liegende Biologie getreu widerspiegelt. Wir nennen unser Programmpaket deshalb auch halb ehrfürchtig und halb spöttisch unseren Brain Builder, also Hirnbaumeister

Die Hypothesen über die Arbeitsweise des Gehirns, die wir so gewinnen und stetig verfeinern, ermöglichen schnellere Fortschritte beim Verständnis kognitiver Funktionen. Statt jede Einzelheit durch Messungen zu untersuchen, können wir anhand neu entdeckter Regeln konkrete Vorhersagen machen und sie gezielt im realen Experiment überprüfen. Aktuell geht es uns unter anderem darum, aus Informationen über Gene, die für charakteristische Proteine in bestimmten Neuronentypen kodieren, die Struktur und Funktion dieser Nervenzellen abzuleiten. Den Zusammenhang zwischen ein-

zelnen Genen und kompletten Neuronen bezeichnen wir als »informatische Brücke«. Sie stellt eine Abkürzung dar, die uns die Synthesebiologie bietet.

Eine andere solche informatische Brücke, die Wissenschaftler schon seit Langem nutzen, ist der Zusammenhang zwischen Mutationen und Krankheiten. Mutationen verändern die von den Nervenzellen hergestellten Proteine; das wiederum beeinflusst die Gestalt und die elektrischen Eigenschaften dieser Neurone sowie die Synapsen, die sie bilden, und die elektrische Aktivität, die in lokalen Mikroschaltkreisen auftritt, bevor sie sich wellenartig über ganze Hirnregionen ausbreitet.

Hier zeigt sich, welche Möglichkeiten unser Modell eröffnet. Wir könnten zum Beispiel eine bestimmte Mutation einprogrammieren und dann verfolgen, wie sie sich auf jeder einzelnen Ebene der biologischen Kausalkette auswirkt. Wenn das entstehende Symptombild dem in der Realität beobachteten entspricht, bekommt diese virtuelle Kette von Ereignissen den Status eines hypothetischen Krankheitsme-

chanismus, und wir können nach möglichen Ansatzpunkten für Therapien suchen.

Dabei besteht unsere Vorgehensweise in einer Abfolge von Schritten, die wir immer wieder durchlaufen. Zunächst programmieren wir ein Modell nach bestimmten biologischen Regeln, wobei wir alle relevanten Daten einfließen lassen, die wir finden können. Dann starten wir die Simulation und vergleichen das Ergebnis – also das Verhalten der Proteine, Zellen und Teilnetzwerke – mit passenden experimentellen Befunden. Falls keine Übereinstimmung besteht, prüfen wir zunächst, ob die eingegebenen Daten stimmen, verfeinern die biologischen Regeln und lassen die Simulation erneut laufen. Diesen Zyklus wiederholen wir, bis das Modell die experimentellen Befunde zufriedenstellend reproduziert. Dann erweitern wir es auf eine größere Hirnregion und importieren dazu weitere Daten. Mit zunehmender Qualität der Software beschleunigt sich die Datenintegration und läuft schließlich automatisch ab, während sich das Verhalten des Modells der biologischen Realität immer weiter annähert. Damit scheint die Modellierung des gesamten Gehirns keine Utopie mehr, auch wenn wir noch nicht alles über die verschiedenen Nervenzellen und ihre Synapsen wissen.

### Wichtigster Rohstoff: Daten und noch mehr Daten

Für unser Unterfangen benötigen wir Daten und zwar so viele wie möglich. Ethische Normen setzen Experimenten am menschlichen Gehirn zwar enge Grenzen. Doch ist es zum Glück nach ganz ähnlichen Regeln aufgebaut wie das anderer Säugetiere. Was wir über die genetische Basis des Säugers wissen, stammt größtenteils von Experimenten mit

Mäusen, während solche Versuche an Affen wertvolle Erkenntnisse über kognitive Vorgänge erbracht haben.

Wir können also mit einem Modell eines Nagerhirns beginnen und es als Ausgangsbasis für die Simulation unseres eigenen Denkkorgans verwenden. Dazu müssen wir es nur entsprechend abwandeln und erweitern. Die Gehirnmodelle für Ratte und Mensch werden sich folglich parallel zueinander weiterentwickeln.

Daten aus neurowissenschaftlichen Untersuchungen helfen uns, nicht nur die Regeln für die Organisation des Gehirns zu erkennen, sondern auch zu überprüfen, ob unsere Schlussfolgerungen – die vorhergesagten Kausalketten – korrekt sind. Zum Beispiel weiß man, dass Säuglinge nur die Zahlen von 1 bis 3 als abstrakte Mengenangaben begreifen, höhere hingegen nicht. Wenn es also gelingt, das Gehirn eines Neugeborenen zu simulieren, müsste das Modell genau diese beschränkte Fähigkeit widerspiegeln.

Viele Daten, die wir benötigen, existieren bereits, sind jedoch schwer zugänglich. Sie zusammenzutragen und zu ordnen, gehört zu den größten Herausforderungen für das HBP. Von besonderem Interesse sind dabei auch Patientendaten – nicht nur, weil Fehlfunktionen Rückschlüsse auf den Normalzustand erlauben, sondern auch, weil wir mit unserem Modell nachvollziehen wollen, wie aus einem gesunden Gehirn ein krankes wird. Hirnscans von Patienten können daher eine wichtige Informationsquelle sein. Zu Millionen in den digitalen Archiven der Krankenhäuser weltweit abgelegt, werden sie bisher kaum für Forschungszwecke genutzt. Wenn es gelänge, sie alle mitsamt den zugehörigen Krankengeschichten sowie biochemischen und genetischen Informa-

## Die europäische Flaggschiffinitiative

Das **Human Brain Project** bewirbt sich mit **fünf anderen** um einen der beiden Hauptpreise, welche die EU-Kommission im Rahmen ihrer so genannten Flaggschiffinitiative ausgelobt hat. Deren Zweck ist, visionäre Großprojekte in der Informations- und

Kommunikationstechnologie (ICT) voranzubringen. Die zwei Sieger des Wettbewerbs erhalten eine Milliarde Euro an Fördergeldern, verteilt auf zehn Jahre. Die fünf anderen noch verbliebenen Projekte sind (siehe auch [www.spektrum.de/flaggschiffe](http://www.spektrum.de/flaggschiffe)):

### 1 Graphen (»Graphene«)

**Ziel:** die Erforschung der gesamten Bandbreite an technischen Anwendungsmöglichkeiten für nur eine Atomlage dicke Kohlenstofffolien

**Projektleiter:** Jari Kinaret von der Chalmers-Universität in Göteborg

### 2 Robotergeräten für jedermann (»Roboter Companions for Citizens«)

**Ziel:** empfindsame Roboter, die dem Menschen als intelligente Begleiter im Alltag zur Seite stehen

**Koordinator:** Paolo Dario von der Scuola Superiore Sant'Anna in Pisa

### 3 Der virtuelle Patient (»IT Future of Medicine«)

**Ziel:** Computermodelle für Kranke, an denen Ärzte die beste Behandlung erproben können

**Koordinator:** Hans Lehrach vom Max-Planck-Institut für Molekulare Genetik in Berlin

### 4 Der Echtzeit-Erdsimulator (»FutureICT«)

**Ziel:** Ein Weltmodell, das anhand von aktuellen Daten aus dem Web – etwa Beiträgen in sozialen Netzwerken – globale Entwicklungen vorhersagt

**Koordinator:** Dirk Helbing vom Institut für Soziologie der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich

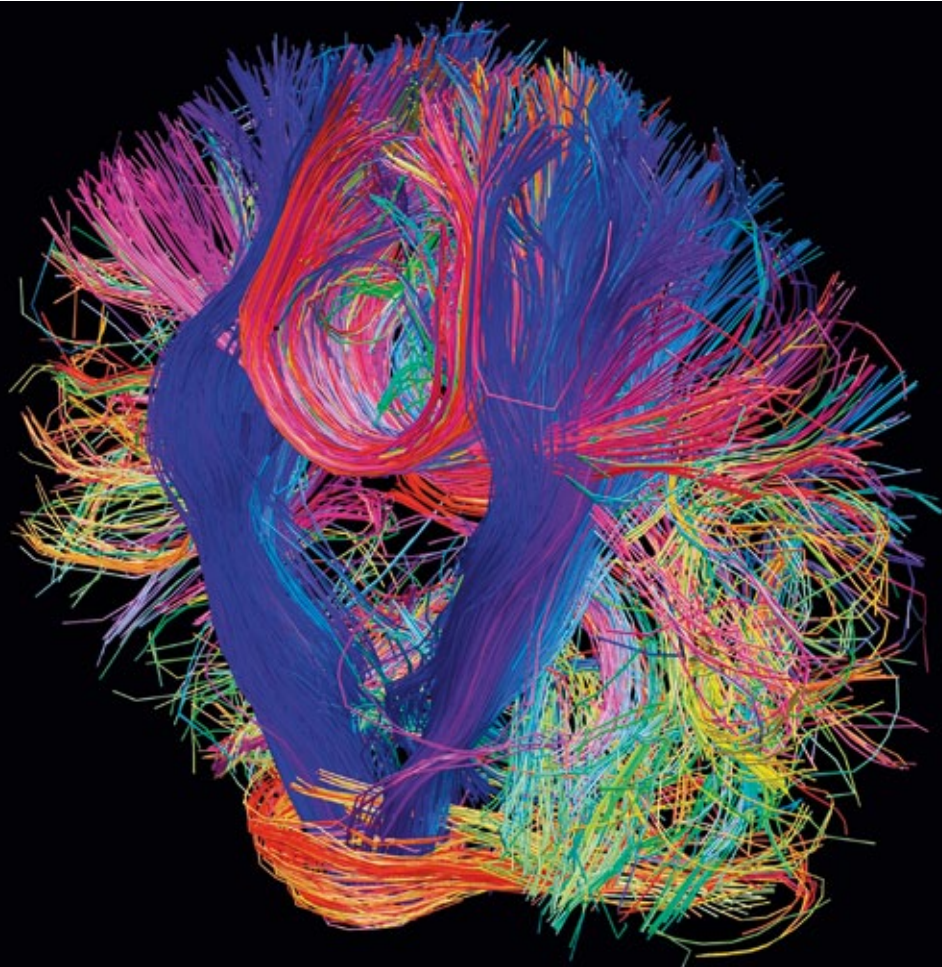
### 5 Der persönliche Schutzengel (»Guarding Angels«)

**Ziel:** ein autonomes intelligentes System, das den Menschen überallhin begleitet, seine Körperfunktionen überwacht, notfalls Hilfe anfordert und seinen Träger vor drohenden Gefahren warnt

**Projektleiter:** Adrian Ionescu von der Eidgenössischen Technischen Hochschule Lausanne



Mit einer speziellen Variante der Magnetresonanztomografie entstand diese Gehirnaufnahme, welche die Faserarchitektur der weißen Substanz zeigt. Der Farbkode veranschaulicht die Richtung der Fasern: Rote ziehen von links nach rechts, grüne von vorn nach hinten, während blaue den Hirnstamm durchqueren. Informationen wie diese gehen in die geplante Hirnsimulation ein.



LABORATORY OF NEURO IMAGING AT UCLA UND MARTINOS CENTER FOR BIOMEDICAL IMAGING AT MASSACHUSETTS GENERAL HOSPITAL, HUMAN CONNECTOME PROJECT FUNDED BY NIH

tionen in einer Datenbank online zugänglich zu machen, ließe sich dieser gewaltige Datenpool nach Mustern durchsuchen, die typisch für eine Krankheit sind.

Das Faszinierende an dieser Vorgehensweise beruht auf der Möglichkeit, Unterschiede und Gemeinsamkeiten zwischen allen erfassten Erkrankungen mit mathematischen Mitteln zu identifizieren. Ein von zahlreichen Universitäten getragenes Projekt, die Alzheimer's Disease Neuroimaging Initiative, verfolgt bereits genau dieses Ziel: Es macht Hirnscans einer großen Zahl von Demenzpatienten und gesunden Vergleichspersonen zusammen mit den Ergebnissen von Liquor- und Blutuntersuchungen in einer Datenbank zugänglich.

Eine wichtige Frage ist schließlich die, ob denn genügend Rechenkapazität zur Verfügung steht. Das neueste Modell aus der Supercomputerreihe Blue Gene von IBM erreicht Geschwindigkeiten im Petaflop-Bereich und besteht aus annähernd 300 000 Prozessoren, die zusammen den Raum von 72 Kühlschränken einnehmen. Damit lässt sich ein Rattengehirn mit 200 Millionen Neuronen bis auf Zellniveau simulieren, nicht jedoch das des Menschen mit seinen gut 100 Milliarden Nervenzellen. Dazu bedarf es eines Computers, der Rechengeschwindigkeiten im Exaflop-Bereich erzielt. Eine Simulation auf molekularer Ebene wäre allerdings selbst dann noch unmöglich.

Weltweit arbeiten Ingenieurteams mit Hochdruck an der Entwicklung von Exaflop-Rechnern. Diese werden wohl wie frühere Generationen von Supercomputern für die Simulation physikalischer Prozesse, etwa aus der Kern- und Teilchenphysik, konfiguriert sein. Biologische Vorgänge nachzuahmen, stellt jedoch völlig andere Anforderungen an die Rechnerarchitektur.

Deshalb stimmt unser Konsortium aus hochrangigen Computerexperten gemeinsam mit Vertretern großer Hard- und Softwarefirmen sowie anderer Partner aus der Industrie eine solche Maschine speziell auf die Simulation von Gehirnfunktionen ab. Das Team entwickelt auch die Software, mit der wir Modelle erstellen können, die alle Auflösungsstufen von einer Gesamtansicht des Gehirns bis hinab zu einzelnen Zellen oder Molekülen umfassen, so dass der Betrachter nach Belieben hinein- und herauszoomen kann.

Sobald der Hirnsimulator gebaut ist, haben Forscher die Möglichkeit, Experimente *in silico* durchzuführen, ganz ähnlich wie sie das *in vivo* tun – nur sehr viel bequemer und mit weniger Einschränkungen. Wenn Wissenschaftler heute nach den Ursachen von Krankheiten suchen, indem sie ein bestimmtes Gen in Mäusen ausschalten, müssen sie die Tiere zunächst züchten. Das ist nicht nur zeitraubend, sondern auch keineswegs für jedes Gen möglich – so führen manche

Mutationen schon vor der Geburt zum Tod –, von den ethischen Bedenken gegen Tierversuche ganz abgesehen.

Im Simulator können die Forscher dagegen jedes beliebige virtuelle Gen ausschalten und die Auswirkungen sofort beobachten – noch dazu an menschlichen »Gehirnen« unterschiedlicher Altersstufen und Funktionszustände. Es ist kein Problem, ein Experiment im selben Modell unter variablen Bedingungen beliebig oft zu wiederholen. Eine solche Gründlichkeit wäre bei keinem Tierversuch erreichbar.

Das dürfte nicht nur die Suche nach möglichen Ansatzpunkten für Medikamente beschleunigen. Auch für die klinische Prüfung sollten sich ganz erhebliche Vorteile ergeben. So werden sich Patientengruppen genauer eingrenzen und unwirksame Substanzen oder solche mit inakzeptablen Nebenwirkungen früher herausfiltern lassen. Die Medikamentenentwicklung sollte dadurch an Effizienz gewinnen und nicht mehr bis zu ein Jahrzehnt dauern wie heute.

### Vorbild für intelligente Computer

Die Erkenntnisse aus den Hirnsimulationen werden sich auch auf das Design von Computern auswirken. Denn durch sie erfahren wir, wie sich im Verlauf der Evolution ein System zur Informationsverarbeitung entwickelt hat, das störungsarm funktioniert, viele hochkomplexe Aufgaben rasch und simultan bewältigt, dabei nur so viel Energie verbraucht wie eine schwache Glühbirne und obendrein eine immense Speicherkapazität hat. Mit Hilfe von Verfahren, die bei den EU-Projekten BrainScaleS und SpiNNaker entwickelt wurden, werden wir auch Hirnschaltkreise auf Siliziumchips drucken. Aus solchen Chips sollen dann so genannte neuromorphe Computer entstehen (siehe den nachfolgenden Beitrag).

Den ersten vollständigen Hirnsimulationen, die wir auf unserem Computer implementieren, wird noch eines fehlen: Sie durchlaufen keine Entwicklung wie das reale menschliche Gehirn in der Kindheit. Von Geburt an gestaltet sich der Kortex durch Vermehrung, Wanderung und Ausmerzen von Neuronen um, während sich die Verknüpfungen zwischen den Nervenzellen ändern – eine Plastizität, die wesentlich von Erfahrungen beeinflusst wird. Unsere Modelle hingegen überspringen Jahre der Entwicklung, setzen erst in einem bestimmten Alter an und beginnen dann Erfahrungen zu sammeln. Dazu müssen wir sie so konstruieren, dass sie sich unter dem Einfluss äußerer Faktoren verändern.

Die Nagelprobe für das virtuelle Gehirn wird kommen, wenn wir es mit einem virtuellen Körper verbinden und mit einer realitätsnahen virtuellen Umgebung interagieren lassen. Das Modell vermag dann Informationen aus seinem Umfeld aufzunehmen und auf sie zu reagieren. Erst in diesem Stadium können wir es mit Wissen füttern oder ihm Fertigkeiten beibringen und sehen, ob es Anzeichen echter Intelligenz entwickelt. Dann hoffen wir auch herauszufinden, was unser Gehirn zu einem so fantastischen Organ macht, das uns über das Chiaroscuro bei Caravaggio ebenso tiefgründige Betrachtungen anstellen lässt wie über die Paradoxien der Quantenphysik. ~



MEHR WISSEN BEI  
**Spektrum.de**



Unser Online-Dossier »Hirnforschung«  
finden Sie unter

[www.spektrum.de/gehirn](http://www.spektrum.de/gehirn)

### DER AUTOR



**Henry Markram** leitet das Blue Brain Project an der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Lausanne. Er hat umfangreiche Forschungsarbeiten zur Neuronennetzen und deren Lernfähigkeit durchgeführt. Dabei entdeckte er einen grundlegenden Mechanismus für die Plastizität des Gehirns: dass sich die Übertragungsstärke von Synapsen je nach dem zeitlichen Muster der eintreffenden Signale erhöht oder erniedrigt (Spike-Timing Dependent Plasticity). Gemeinsam mit anderen Wissenschaftlern entwickelte er außerdem eine Theorie des Gehirns, die auch für das Human Brain Projekt eine Rolle spielt. Demnach handelt es sich um ein informationsverarbeitendes System, das in einem stetig fluktuierenden Zustand operiert – ähnlich den Überlagerungsmustern der Wellen in einer Flüssigkeit, die ständigen Störungen ausgesetzt ist (Liquid State Machine).

### QUELLEN

- Amari, S., et al.:** Neuroinformatics: The Integration of Shared Databases and Tools Towards Integrative Neuroscience. In: Journal of Integrated Neuroscience 1, S. 117–28, 2002
- Buesing, L., et al.:** Neural Dynamics as Sampling: A Model for Stochastic Computation in Recurrent Networks of Spiking Neurons. In: PLoS Computational Biology 7, S. e1002211, 2011
- Cuntz, H., et al.:** One Rule to Grow Them All: A General Theory of Neuronal Branching and Its Practical Application. In: PLoS Computational Biology 6, S. e1000877, 2010
- Perin, R. et al.:** A Synaptic Organizing Principle for Cortical Neuronal Groups. In: Proceedings of the National Academy of Sciences 108, S. 5419–5424, 2011

### LITERATURTIPP

**Schürmann, F.:** Das simulierte Gehirn. In Gehirn & Geist 6/2008, S. 56  
*Ausführliche Beschreibung des Blue-Brain-Projekts zur Simulation einer kortikalen Säule*

### WEBLINKS

- [www.humanbrainproject.eu](http://www.humanbrainproject.eu)  
*Die offizielle Website des Human Brain Project*
- [ScientificAmerican.com/jun2012/brain-project](http://ScientificAmerican.com/jun2012/brain-project)  
*Video eines aktiven Neuronennetzwerks im Gehirn*
- [www.heise.de/tr/artikel/Das-ist-nicht-der-Zugang-der-Physik-278031.html](http://www.heise.de/tr/artikel/Das-ist-nicht-der-Zugang-der-Physik-278031.html)  
*Kritische Anmerkungen des Physikers Klaus Pawelzik zu den Hirnsimulationen des Autors*
- [www.brain-map.org/](http://www.brain-map.org/)  
*Website des Allen Brain Atlas, der für sämtliche Entwicklungsstadien des Gehirns die in jedem Areal aktiven Genen verzeichnet*
- Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1157706](http://www.spektrum.de/artikel/1157706)

# Leserreisen – 2013

Spektrum der Wissenschaft bietet seinen Lesern im Frühjahr 2013 drei Spezial-Reisen an: zu den großen Observatorien nach Chile, zu den spektakulären Polarlichtern nach Lappland und zu einem exklusiven Besuch im CERN nach Genf.



## Lappland

POLARLICHTREISE IN DEN HOHEN NORDEN

Diese beliebte Reise wird im nächsten Jahr noch interessanter: Viele fantastische Polarlichterscheinungen werden intensiver zu beobachten sein, da die Sonnenaktivität weiter gestiegen ist. Deshalb haben wir der Reise in Norwegen auf dem 70. Breitengrad einen Tag hinzugefügt.

Das Programm am Inarisee in Finnland und im Pasviktal in Norwegen an der russischen Grenze bietet neben geführten Polarlichtbeobachtungen bei stabilem Festlandklima und interessanten Vorträgen viele Winteraktivitäten: Husky-, Rentier- oder Schneescooter-Safaris und skandinavische Sauna sowie eine Königskrabben-Safari. Auch die lappländische Kultur der Samen wird bei dieser Reise nicht zu kurz kommen.

Falls Sie länger bleiben wollen, beginnt in Kirkenes eine sechstägige Kreuzfahrt entlang der malerischen norwegischen Küste nach Bergen. Bei dieser faszinierenden Hurtigrutenkreuzfahrt steuern wir viele Küstenstationen an: Hammerfest, Tromsø, die Inselwelt der Lofoten, Bodø, Trondheim und Bergen.

Unser erfahrener Polarlichtspezialist Joachim Biefang betreut die Reise mit Vorträgen und laserunterstützten Führungen am Nordhimmel. Ein handliches Planetarium und ein Teleskop sind auch mit dabei.

**Hauptreise** 6. 3. – 15. 3. 2013:

Preis € 2060,- im DZ/HP

**Verlängerung** 15. 3. – 21. 3. 2013:

Preis € 1860,- im DZ/VP



## Genf

DIE SUCHE NACH DEM URSPRUNG DES UNIVERSUMS

Eingerahmt von den schneeweißen Gipfeln der Alpen und dem Spiegel des Genfer Sees, bietet Genf uns bei dieser viertägigen Kurzreise auch im Jahr 2012 die ideale Ausgangsposition für einen exklusiven Besuch beim CERN, der Europäischen Organisation für Kernforschung. Bei einer Sonderführung kommen wir in Genf dem wohl größten intellektuellen Abenteuer der modernen Forschung näher: der Suche nach dem Ursprung des Universums.

Zusätzlich haben wir am Anreisetag einen Vortrag zum Thema der Geschichte der Antimaterie und an einem weiteren Abend einen Vortrag eines erfahrenen CERN-Mitarbeiters zum Thema »Die Anfänge und die Arbeit am CERN« arrangiert. Ein fakultativer Ausflug zum Genfer See wird uns die Schönheit der Französischen Schweiz näherbringen. Auf dem Programm steht des Weiteren eine Rundfahrt zu den verschiedenen in Genf ansässigen Weltorganisationen (z. B. United Nations Office at Geneva, UNOG) sowie eine Besichtigung der UNO. Auf Grund der großen Nachfrage nach dieser Tour bieten wir sowohl einen Termin im Mai als auch einen im September zur Auswahl an. (Flüge sind nach Zürich, Basel oder Genf zubuchbar.)

**Geplante Termine mit Eigenanreise:**

im Mai und September 2013:

Preis € 620,- im DZ/HP



## Chile

LAND DER GROSSEN OBSERVATORIEN

Eine astronomische Erlebnisreise zu den größten Sternwarten der Welt – unter der fachkundigen Leitung von Joachim Biefang. Astronomisches Highlight ist der Besuch der weltbekannten Großobservatorien Las Campanas, La Silla und natürlich des Cerro Paranal mit seinen berühmten 8.2 m VLT-Teleskopen und Interferometrieanlage. Auch der Besuch der Montagestation des ALMA-Projekts ist eingeplant. Landschaftlich stehen vor allem die Atacama-Wüste und die fantastische Welt der hohen Anden auf dem Programm: San Pedro de Atacama, die große Salzkordilliere, der viertgrößte Salzsee der Welt, die Hochlandlagunen des Altiplano und El Tatio Geysire. Teleskopbeobachtungen am eindrucksvollen Himmel der südlichen Hemisphäre ergänzen dieses erlebnisreiche Reiseprogramm. In einer 7-tägigen Verlängerung geht es nach Südküste – in das wildromantische Patagonien mit Magellanstraße, Torres del Paine Nationalpark, Gletscherwelten und Pinguinkolonien.

**Hauptreise** 5. 2. – 20. 2. 2013:

Preis € 4.130,- im DZ/F,

**Verlängerung** 19. 2. – 26. 2. 2013:

Preis € 1.850,- im DZ/F

### INFOPAKET UND BUCHUNG ÜBER:

**Wittmann Travel**  
Urenfleet 6e  
21129 Hamburg  
Telefon: 040 851053-76  
Fax: 040 851053-77  
E-Mail: info@wittmann-travel.de



TITELTHEMA: KÜNSTLICHES GEHIRN

# Neurone & Co. – Imitieren mit Silizium

Um Computern das Denken beizubringen und obendrein das Gehirn besser zu verstehen, bauen Forscher es aus elektronischen Bausteinen nach. Ihre Devise lautet dabei: Emulation statt Simulation.

Von Karlheinz Meier

**W**er schon mal sein Notebook auf den Knien jonglierte, der weiß: Datenverarbeitung ist eine heiße Angelegenheit. Gut 40 Watt benötigt ein solcher Rechner im Betrieb – und gibt sie fast vollständig als Wärme wieder ab. Das ist etwa doppelt so viel, wie das menschliche Gehirn verbraucht, das seinen täglichen Energiebedarf aus zwei 200-Gramm-Bechern Fruchtjogurt decken könnte. Nun ist ihm zwar noch jeder Taschenrechner überlegen, wenn es gilt, große Zahlen mitei-

inander zu multiplizieren. Doch wenn in unerwarteten Situationen Entscheidungen getroffen werden müssen, macht selbst der modernste Hochleistungsrechner dem Gehirn nichts vor.

Versucht man, diese Fähigkeit mit digitalen Computern zu simulieren, wachsen die Anforderungen ins Gigantische. Ausgedrückt in der »Fruchtjogurt-Metrik«: Ein Hochleistungsrechner verbraucht leicht 100 Kilowatt, entsprechend 10 000 Bechern Jogurt an einem Tag – ein echtes Problem. Die Lösung finden wir in einer Form der Informationsverarbeitung, die sich auf ihre Anfänge besinnt: mit analogen statt digitalen Schaltkreisen. Auf diese Weise wollen Forscher die Biologie nachahmen, statt sie zu simulieren – mit Hilfe »neuromorpher Rechner«.

Ein menschliches Gehirn besteht aus mindestens 100 Milliarden räumlich organisierten Nervenzellen, die ein paar Mal pro Sekunde Informationen in ein Netzwerk aus rund einer Billiarde Verbindungen speisen. Seine Arbeitsweise ist das Resultat der Evolution auf der einen sowie von Lern- und Entwicklungsprozessen des Individuums auf der anderen Seite. Ein Prozessor hingegen basiert auf einem Siliziumchip mit definierten funktionellen Einheiten, die im Gigahertztakt einer zentralen Systemuhr Daten austauschen und dabei Programmcodes abarbeiten.

Dieser liegt ebenso wie alle Daten binär vor, das heißt in einer Sprache, die allein aus den Zahlen »0« und »1« besteht.

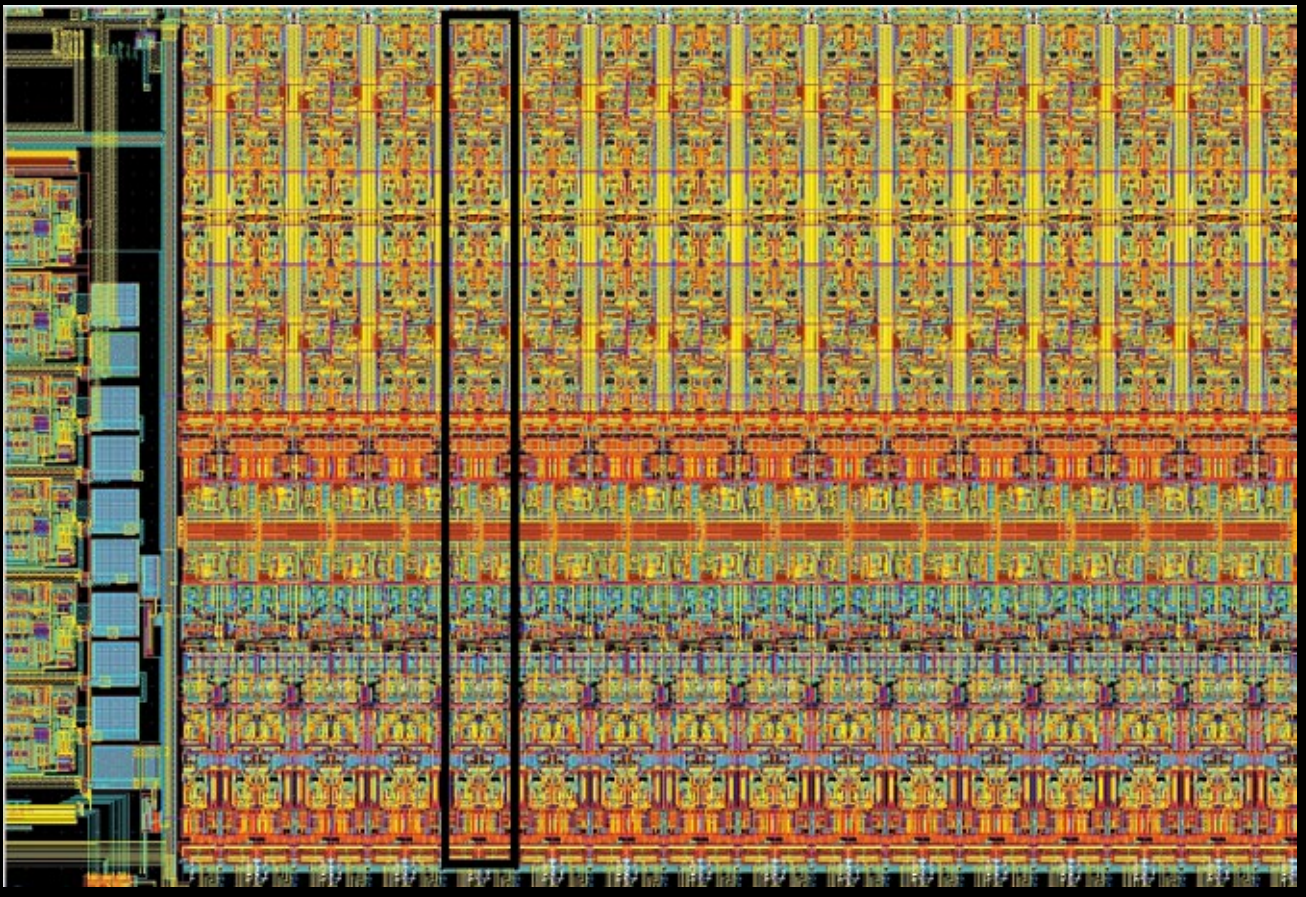
## AUF EINEN BLICK

### PHYSIKALISCHE MODELLE DES DENKENS

**1** »Elektronengehirne« heutiger Bauart stellen Berechnungen weit schneller an als biologische, sind aber bei **kognitiven Prozessen** wie der Entscheidungsfindung deutlich unterlegen.

**2** Die Computersimulation neuronaler Prozesse bildet mathematische Modelle dieser Abläufe als **digitale Schaltungsvorgänge** ab, ein energie- und zeitintensiver Umweg.

**3** Im Rahmen des Forschungsprojekts FACETS und seines Nachfolgers BrainScaleS versuchen Neurowissenschaftler und Physiker deshalb, mit Transistoren, Kondensatoren und Widerständen das Verhalten der Grundbausteine des Gehirns – Neurone und Synapsen – nachzuahmen. Ihre **Emulationsschaltungen** arbeiten bereits zehn Milliarden Mal energiesparender und eine Million Mal schneller als digitale.



UNIVERSITÄT HEIDELBERG / KIRCHHOFF-INSTITUT FÜR PHYSIK

Das lässt sich durch zwei Zustände eines Schalters technisch umsetzen. 1854 formulierte der britische Mathematiker George Boole (1815–1864) die Regeln und Verknüpfungen einer binären Algebra. Der amerikanische Mathematiker und Elektrotechniker Claude Shannon (1916–2001) zeigte 1937, dass Schalter tatsächlich geeignet sind, mit dieser zu rechnen. Ein Jahr zuvor hatte der britische Logiker Alan Turing (1912–1954) bewiesen, dass eine Maschine jedes mathematische Problem lösen kann, das sich als Algorithmus, also als eine Abfolge symbolischer Befehle, formulieren lässt (siehe Spektrum der Wissenschaft 6/2012, S. 80). Schließlich entwickelte der Physiker John von Neumann (1923–1958) die nach ihm benannte Computerarchitektur, bei der ein gespeicherter Algorithmus in Form eines Programms digitale Daten in einem Rechenwerk verarbeitet.

### Das Gehirn läuft niemals heiß

Mit dem Transistor stand bald ein elektrisch steuerbarer Schalter bereit. Dem amerikanischen Ingenieur und Nobelpreisträger Jack Kilby (1923–2005) von Texas Instruments gelang es 1958, diese mit anderen Bauelementen in »integrierten Schaltungen« unterzubringen – den Chips. Bis heute nimmt die Integrationsdichte rasant zu. Laut Gordon Moore, Mitbegründer von Intel, soll sich die Zahl der Transistoren auf einem Chip alle 18 Monate verdoppeln. Das geht freilich auf Kosten der Größe jedes einzelnen. Ein moderner Intel-I7-

So genannte neuromorphe Chips ahmen die natürlichen Abläufe im Gehirn mit elektronischen Bauelementen nach. Wie komplex die Aufgabe ist, illustriert diese computergestützte Entwurfszeichnung eines Chips der jüngsten Generation: Ein in Silizium gefertigtes Neuron mit einer Länge von 150 Mikrometern entspricht dem hervorgehobenen rechteckigen Bereich. Einzelne Transistoren sind etwa 180 Nanometer lang.

Chip vereint auf 250 Quadratmillimetern bereits etwa eine Milliarde Transistoren.

Dass diese Reise nicht unbegrenzt weitergehen kann, wissen Ingenieure und Wissenschaftler seit Langem. Schon heute repräsentieren Transistoren Nanotechnologie. Weiteres Schrumpfen bewegte sich in den Dimensionsbereich atomarer Strukturen hinein. Damit aber würde die Wahrscheinlichkeit für Produktionsfehler steigen. Schon wenige defekte Transistoren unter einer Milliarde können einen Chip jedoch funktionsunfähig machen.

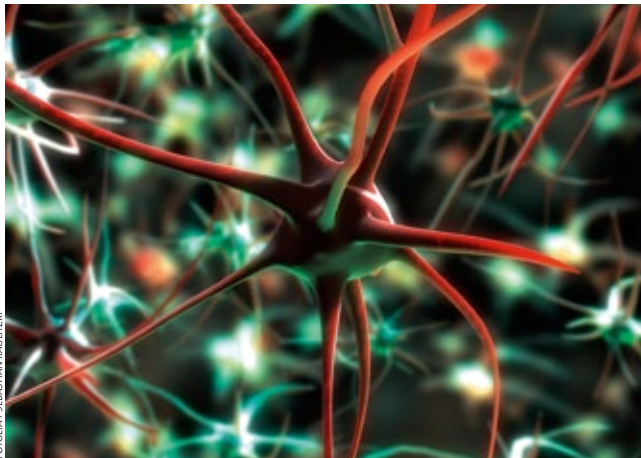
Obendrein dient die wachsende Integrationsdichte meist auch zur Steigerung der Taktzyklen, mit denen aber der Energieverbrauch wächst. Darum bilden zwei bis drei Gigahertz eine Art magische Grenze.

Es ist offensichtlich, dass die biologischen Mechanismen der Informationsverarbeitung anders organisiert sein müssen, denn unser zentrales Nervensystem läuft niemals heiß,

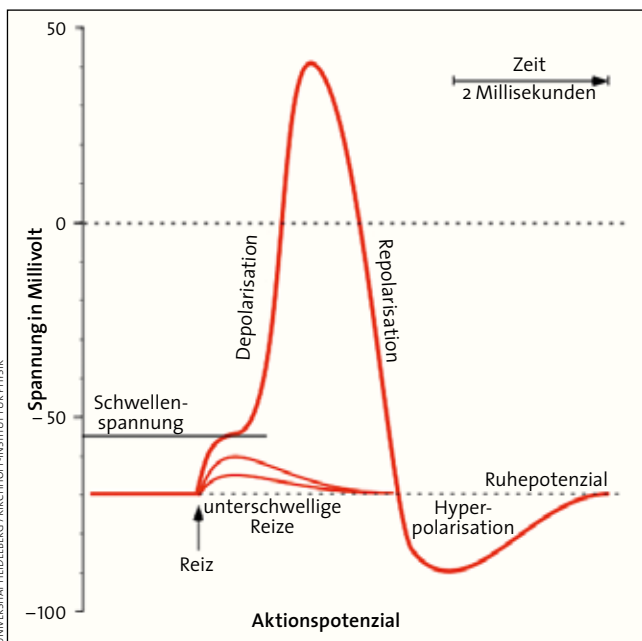


und mögen wir noch so viel grübeln. Aber wie? Bereits Ende des 19. Jahrhunderts untersuchte der spanische Mediziner Santiago Felipe Ramón y Cajal (1852–1934) Hirnschnitte mittels der so genannten Golgi-Färbetechnik und erkannte, dass dieses Gewebe aus einem engmaschigen Netzwerk von Zellen aufgebaut ist. Diese »Neurone« kommunizieren unter anderem über elektrische Signale, die auf Nervenbahnen durch das Gehirn reisen.

Die Membran eines Neurons dient dabei als ein zentrales Schaltungselement: Sie isoliert die Zelle, hat jedoch eine Vielzahl selektiver Kanäle für bestimmte geladene Atome. Zwischen dem Innenraum und der Außenwelt besteht norma-



FOTOLIA / SEBASTIAN KALITZKI



UNIVERSITÄT HEIDELBERG / KIRCHHOF-INSTITUT FÜR PHYSIK

Neurone sind die Grundbausteine des Gehirns. Ankommende elektrische Signale können, sofern sie einen Schwellenwert überschreiten, die Spannung der Zellmembran innerhalb weniger Millisekunden massiv steigern und schließlich sogar vorübergehend umpolen. Dieser pulsartige Standardverlauf wird Aktionspotenzial oder auch Spike genannt. Er ist die Basis der Kommunikation zwischen natürlichen Neuronen wie zwischen ihren elektronischen Pendants.

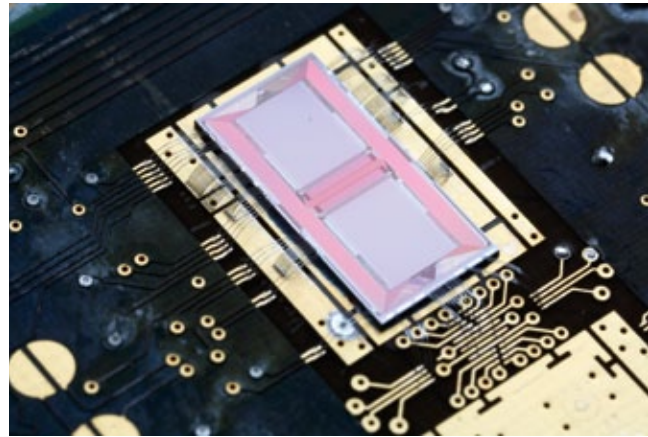
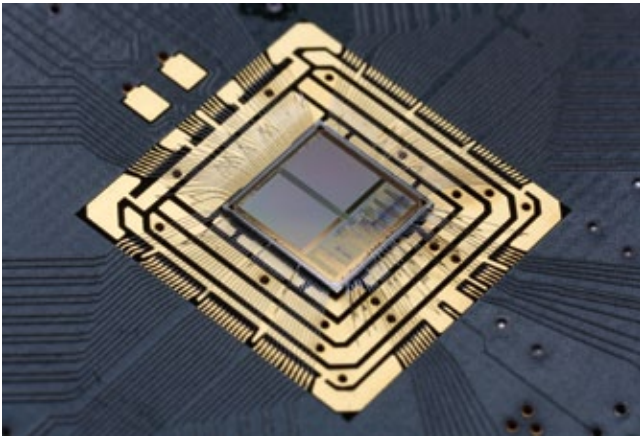
lerweise eine Spannung von minus 70 Millivolt. Treffen dort elektrische Signale anderer Neurone ein, über dünne Fasern zugeleitet, kann sie einen Schwellenwert von etwa minus 55 Millivolt erreichen. Dann schnell auf fast plus 50 Millivolt hoch und fällt anschließend steil unter den Ruhespannungswert ab, um sich dann wieder auf diesen einzupegeln (siehe Grafik unten). All dies geschieht in wenigen Millisekunden, weshalb ein solches »Aktionspotenzial« auch als »Spike« (Nadelimpuls) bezeichnet wird. Aus der Sicht des Informationstheoretikers folgt dieser Vorgang einem »Alles-oder-nichts-Gesetz«: Unabhängig von der Vorgeschichte der Zelle sehen alle Spikes weitgehend gleich aus.

Synapsen schließlich sind die Kopplungsstellen zwischen Neuronen und den Leitungen, über die sich Aktionspotenziale ausbreiten. Neurotransmitter genannte Moleküle übernehmen hier den Signaltransfer, die Information wird vorübergehend chemisch umkodiert. Zudem ist dieser Transfer gerichtet: vom Axon (präsynaptische Seite) zum Dendriten (postsynaptische Seite). Laut Messungen muss das resultierende elektrische Signal, das schließlich eine Neuronenmembran erreicht, nicht identisch mit dem ursprünglichen sein. Die Synapse kann dieses vielmehr verstärken, aber auch dämpfen oder gar unterdrücken. Über einen längeren Zeitraum kann sich dabei eine »synaptische Plastizität« ergeben, die das neuronale Netz bei Lernprozessen neu organisiert.

Im Vergleich zu den Nanosekundertaktyklen eines Prozessors liegen die Zeitkonstanten solcher Vorgänge im Gehirn im Millisekundenbereich, also eine Million Mal langsamer. Das ist geradezu ein Schnecken tempo, erklärt aber teilweise den geringen Energieverbrauch. Zum Ausgleich arbeiten die Millionen Neurone hochgradig parallel, was nicht nur komplexe Verschaltungsmöglichkeiten bietet, sondern auch die Empfindlichkeit gegenüber lokalen Fehlfunktionen verringert. Selbst millionenfacher Neuronenverlust durch Unfall oder Krankheit lässt sich oft in Maßen tolerieren. Hier haben die Hardwareentwickler gelernt: Kaum ein Notebook, das heutzutage nicht mindestens zwei Rechnerkerne gleichzeitig nutzt; in Supercomputern verrichten bis zu eine Million ihren Dienst.

Letztere fungieren als Arbeitspferde bei Computersimulationen – dem dritten Weg der Naturwissenschaft neben Experiment und Theoriebildung. Insbesondere lässt sich damit das Verhalten von Vielteilchensystemen studieren, vom Kristallgitter bis zum Universum, von der Wettervorhersage bis zur Klimaprognose. Meist sind die Komponenten des fraglichen Systems sowie deren Wechselwirkungen untereinander gut bekannt und durch mathematische Gleichungen beschreibbar. Ein Simulationsmodell – letztlich eine Vielzahl verknüpfter Formeln – wird dann unter bestimmten Anfangsbedingungen durchgerechnet, die den jeweiligen Fragestellungen entsprechen. Durch Abgleich mit Beobachtungen und experimentellen Werten lässt sich das Modell verbessern; mitunter ergeben sich sogar Hinweise auf unbekannte Faktoren. Ein Beispiel für solches »reverse engineering« liefern Astrophysiker, die aus den Abweichungen ihrer Simulationen





BEIDE FOTOS: UNIVERSITÄT HEIDELBERG / KIRCHHOFF-INSTITUT FÜR PHYSIK

**Generationswechsel:** Auf dem neuromorphen Chip des FACETS-Projekts (links) wurden etwa 100 000 Synapsen, jede etwa zehn mal zehn Mikrometer groß, in zwei Feldern (graue Flächen) elektronisch realisiert. Rechts davon befindet sich eine digitale Kontrolllogik, der schmale Streifen dazwischen enthält rund 400 Neurone. Der Chip aus dem BrainScale5-Projekt (rechts) enthält bereits 125 000 Synapsen, die sich über 512 Membranschaltkreise verknüpfen lassen. Daraus resultieren Neurone mit bis zu 16 000 synaptischen Eingängen, die sich plastisch verhalten, also lernfähig sind. Auch hier sind die Synapsen in zwei Feldern organisiert, zwischen denen die Neurone liegen (siehe auch Bild S. 99). 400 solcher Chips sind auf einem Wafer integriert. Golden erscheinen jeweils die elektrischen Kontakte.

des Universums auf die Eigenschaften dunkler Materie schließen, die sich bislang der direkten Beobachtung entzieht.

Auch für die Eigenschaften und die Dynamik von Neuronen und Synapsen gibt es mathematische Modelle, die Forscher direkt aus neurobiologischen Daten abgeleitet haben. Den bislang ambitioniertesten Versuch, einen neuronalen Schaltkreis zu simulieren, unternimmt derzeit der Neurowissenschaftler Henry Markram von der Schweizer École Polytechnique Fédérale de Lausanne mit seinem Team auf einem IBM BlueGene/P mit 16 384 Rechenkernen. Er hat in den letzten Jahren ein detailliertes Modell einer kortikalen Säule der Ratte entwickelt (siehe den Beitrag ab S. 82) und plant nun, es auf große Systeme zu erweitern.

Eine solche Säule ist im Prinzip ein ungeheurer Schaltkreis, der sich durch alle sechs Schichten der Großhirnrinde erstreckt und etwa 10 000 Neurone und 100 Millionen synaptische Verbindungen umfasst. Dabei nutzt die Forschergruppe in bisher nicht gekanntem Umfang experimentelle Daten, sei es aus der Genetik oder aus der Zellbiologie.

### 120 Millionen Becher Jogurt pro Sekunde

Bei allen Erfolgen hat Markrams Vorgehensweise jedoch einen Nachteil: Für die Simulation einer Sekunde Lebenszeit benötigt der BlueGene/P zirka 100 Sekunden. Bei einer elektrischen Leistung von 100 Kilowatt kostet das – in die vorne erwähnte anschauliche Währung umgerechnet – zwölf Becher Fruchtjogurt. Das menschliche Gehirn ist etwa zehn Millionen Mal größer als die hier simulierte kortikale Säule. Eine Sekunde Lebenszeit auf diesem Supercomputer durchzurechnen, würde demnach den Energieinhalt von 120 Millionen Bechern kosten statt der vom biologischen Vorbild pro

Sekunde verbrauchten fünf Milligramm Fruchtjogurt! Im Vergleich zum Säugergehirn wäre der – in dieser Größe freilich heute noch hypothetische – BlueGene/P ein Energiefresser und obendrein 100-mal langsamer.

Woher kommt dieser gewaltige Unterschied? Die Antwort auf diese Frage findet sich im Umweg über die Digitaltechnik. So modelliert man beispielsweise den zeitlichen Verlauf der Membranspannung eines Neurons mathematisch durch eine Exponentialfunktion. Diese Idealisierung der Wirklichkeit muss für den Digitalcomputer, der nur mit 0 und 1 hantieren kann, durch numerische Näherungsverfahren ersetzt werden. Diese erfordern sehr viele kleine Rechenschritte und Speicherzugriffe. Da Rechenwerk und Speicher in der Von-Neumann-Architektur voneinander getrennt sind, werden also Unmengen an Daten auf dem Chip hin- und hergeschoben. Und das kostet Energie.

Biologische Schaltkreise funktionieren offensichtlich völlig anders. Trotz des Alles-oder-nichts-Prinzips der Spikes, das eine binäre Datenverarbeitung nahelegt, entsprechen diese offenbar nicht den Gesetzen boolescher Algebra. Alternativ zur Simulation bietet es sich deshalb an, das Gehirn zu »emulieren«. Darunter versteht man die direkte Abbildung eines Systems auf ein physikalisches Modell. Dergleichen war in den 1950er und 1960er Jahren ein beliebtes Mittel. So diente ein Raster aus einstellbaren Kondensatoren, Widerständen und Verstärkern zur Emulation der Flugbahnen von Elementarteilchen im Magnetsystem eines Teilchenbeschleunigers. Weil die aufkommende Digitaltechnik aber so viel flexibler und universeller einsetzbar war, verloren »analoge Rechner« an Bedeutung. Neuerdings erleben sie durch synthetische Quantensysteme eine Renaissance: Einige we-

nige Ionen oder Atome werden durch allerlei physikalische Kniffe zu einem synthetischen Vielteilchensystem, an dem man kontrolliert Experimente durchführen kann – weit besser als an einem »echten« Vielteilchensystem oder in einer Simulation, denn auch hier ist die Berechnung auf Supercomputern extrem zeit- und energieaufwändig.

Die Idee eines physikalischen Modells neuronaler Schaltkreise brachte der amerikanische Physiker Carver Mead 1989 ins Spiel. Seine »neuromorphe Elektronik« nutzt die physikalischen Eigenschaften elektronischer Bauelemente für die Emulation biologischer Komponenten. Beispiel Transistor: In der Digitaltechnik wird er als Schalter eingesetzt, der bei entsprechender Polung der angelegten Spannung jeden Stromfluss unterbindet. Tatsächlich aber ist dieser nichtleitende Transistor eine Idealisierung: Es gibt immer einen – freilich geringen – Stromfluss. Dieser wächst exponentiell mit der angelegten Steuerspannung.

Die von Meads Arbeitsgruppe und anderen Forschern realisierten Schaltungen konnten einige Charakteristika biologischer Systeme emulieren und verbrauchten dabei weniger Leistung als Computersimulationen, wobei die Natur immer noch effizienter war. Immerhin liefen die Systeme sozusagen in biologischer Echtzeit – eine Sekunde Lebenszeit entsprach auch einer Sekunde Rechenzeit. Sie waren aber lediglich für Netzwerke aus einigen hundert Neuronen ausgelegt. Eine Skalierung auf biologisch relevante Größenordnungen –

schon die Taufeliege verfügt über 1000-mal so viele – oder gar auf die 100 Milliarden Neurone des menschlichen Gehirns ist freilich unmöglich: Die Elektronik würde zu voluminös, vor allem aber werden die sich ausbreitenden analogen Signale in großen Netzen undeutlich. Auch wurden wichtige Eigenschaften des natürlichen Vorbilds wie die Fähigkeit zu lernen nicht implementiert.

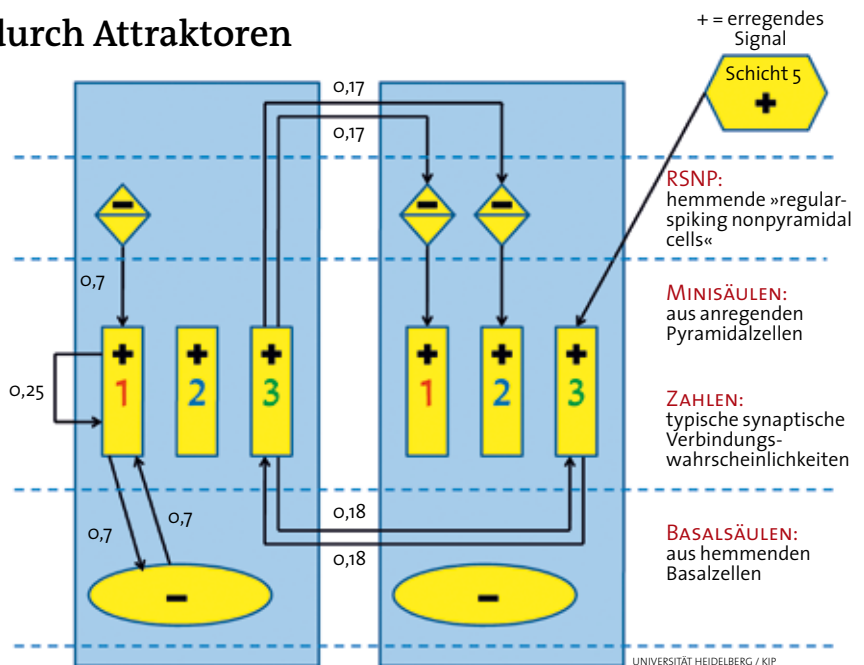
Seit 2005 fördert die Europäische Kommission im Rahmen ihres Programms »Future and Emerging Technologies (FET)« die Entwicklung eines neuromorphen Computers, dessen Architektur ganz und gar auf dem Wissen der Neurobiologen basiert. Das von mir konzipierte und koordinierte Projekt trug den Namen FACETS als Akronym für seinen wissenschaftlichen Ansatz: »Fast Analog Computing with Emergent Transient States« – Schnelligkeit sowie die Umsetzung dynamischer Prozesse in neuronalen Netzwerken waren die Hauptziele der beteiligten Forscher. Seit 2011 läuft unser Anschlussprojekt BrainScaleS.

Die Hardwarearchitektur setzt von vornherein auf Skalierbarkeit, verwendet also modulare Grundbausteine aus Transistoren, Kondensatoren und Widerständen, um Neurone und Synapsen zu emulieren, aus denen neuronale Schaltkreise bestehen. Im Unterschied zu anderen neuromorphen Modellen erfolgt die Kommunikation zwischen den Modulen über idealisierte Aktionspotenziale. Auch wenn sich natürliche Spikes nicht nach den Regeln der booleschen Algebra ver-

## Entscheidungsfindung durch Attraktoren

Die schematische Darstellung zeigt eine »Winner-takes-all«-Schaltung, ein Neuronennetzwerk, wie es vermutlich in der Hirnrinde unter verschiedenen Möglichkeiten eine auswählt. Die von Anders Lansners Team an der KTH Stockholm entwickelte Architektur kann mit neuromorphen Chips zur Entscheidungsfindung eingesetzt werden. Sie besteht aus emulierten Pyramidenzellen, einem erregenden Neuronentyp, sowie zwei hemmenden Zelltypen: den so genannten »regular-spiking nonpyramidal cells« (RSNP) und den Basalzellen. Deren Aufgabe ist es, die Aktivität der Pyramidenzellen wieder einzudämmen. Die Entscheidungsfindung vollzieht sich im Wechselspiel zwischen Erregung und Hemmung.

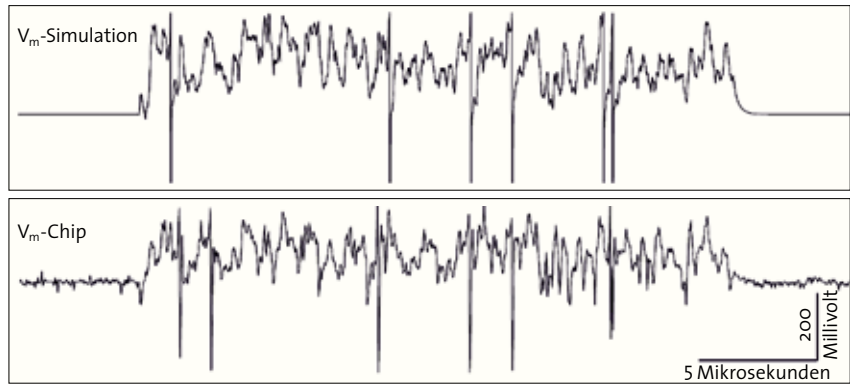
Das Schema zeigt die Schichten zwei und drei der insgesamt sechs Zellschichten des Kortex. Die Pyramidalzellen sind zu »Minisäulen« beziehungsweise Attraktoren verschaltet, je drei davon wieder zu »Hypersäulen«. Attraktoren versuchen einerseits durch Aussenden von Spike-Serien ihren



Einfluss in anderen Hypersäulen zu verstärken, andererseits den der anderen durch hemmende Verbindungen zu unterdrücken. Im emulierten Netzwerk sorgen statistische Fluktuationen für Dynamik, am Ende setzt sich ein Attraktor durch.



BEIDE ABILDUNGEN: UNIVERSITÄT HEIDELBERG / KIRCHHOFF-INSTITUT FÜR PHYSIK



Die am Heidelberger Kirchhoff-Institut für Physik aufgebaute »Hybrid Multiscale Facility« (links) ist ein Hybrid aus einem neuromorphen System und einem klassischen Computercluster. Sie erzeugt 50 Millionen plastische synaptische Verbindungen unter bis zu 200 000 Neuronen (das Wafersystem befindet sich in dem achteckigen Kühlkörper). Mit dieser Apparatur lassen sich auch die Ergebnisse von Simulation und Emulation vergleichen (oben): Auf einen Reiz reagiert ein Neuron, indem es eine Salve von Aktionspotenzialen in zufälliger Abfolge erzeugt. Die beiden Verfahren ergeben zwar ähnliche Antwortkurven, aber durchaus auch Unterschiede. So wie es in der Natur der Fall ist, beginnt und endet beispielsweise die Kurve des physikalischen Modells (untere Grafik) nicht exakt mit dem Ruhewert, sondern variiert unablässig.

halten, nutzt FACETS ihren binären Charakter, um sie digital zu realisieren. Dabei werden Erzeugung und Weiterleitung aber nicht – wie beim Computer – von einer Systemuhr gesteuert. Weil Information hier zum einen analog in Form eines emulierten Membranpotenzials, zum anderen digital als Spike vorliegt, sprechen Experten von einer »mixed-signal«-Technologie. Fundamental verschieden von der konventionellen Digitaltechnologie sind dabei die kontinuierlich, statt in kleinen Schritten ablaufenden emulierten Prozesse und die fehlende Synchronisierung durch eine externe Uhr.

Der Entwurf von Neuronen und Synapsen berücksichtigt jüngste Ergebnisse neurobiologischer Forschung, insbesondere das »adaptive exponential integrate-and-fire model« der Gruppe von Wulfram Gerstner, ebenfalls an der École Polytechnique Fédérale de Lausanne. Das kurz AdEx genannte Modell beschreibt das Verhalten eines Neurons der Großhirnrinde mit zwei mathematischen Gleichungen: Die erste stellt die Dynamik des Aktionspotenzials dar und enthält einen Aktivierungsterm mit einer exponentiellen Spannungsabhängigkeit. Diese Spannung ist mit einer zweiten Gleichung gekoppelt, die Adaptionsmechanismen beschreibt. Nach einem Spike wird das Neuron wieder in den Ausgangszustand zurückgesetzt. Dieses Modell kann diverse neuronale Aktivierungsmuster darstellen, auch das als »bursting« bezeichnete Feuern von Spikes in Gruppen – dieser Effekt verstärkt die Reaktion des postsynaptischen und damit den Einfluss des präsynaptischen Neurons. FACETS übersetzt die Gleichungen in entsprechende analoge elektronische Schaltungen.

Wichtig ist auch die Beobachtung von Markram und Misha Tsodyks vom israelischen Weizman-Institut aus dem Jahr 1997, wonach eine kurzzeitige, starke Stimulation auf präsyn-

aptischer Seite entweder zu einer Abschwächung oder Erhöhung des Ausgangssignals führt – Synapsen können sogar als Kausalitätsdetektoren fungieren: Feuert die präsynaptische Zelle kurz vor der postsynaptischen, wird die Verbindung gestärkt. Dieses als »spike-timing-dependend-plasticity« bezeichnete Phänomen ist wichtig für Lernprozesse in neuronalen Schaltkreisen und wird deshalb auch bei FACETS emuliert.

### 10 000-mal schneller als das Gehirn

Da es keine steuernde Uhr wie bei einem digitalen Computer gibt, bestimmen die individuellen Zeitkonstanten der elektronischen Komponenten die Geschwindigkeiten der Abläufe im Schaltkreis. So liegt die Zeit für die Be- und Entladung einer Membran bei nur zehn Nanosekunden.

Freilich müssen alle Zeitkonstanten im Netzwerk konsistent sein. Die Membran, die postsynaptischen Potenziale und die emulierten Plastizitätsmechanismen dürfen in ihrer Dynamik relativ zueinander nicht von den Verhältnissen beim biologischen Vorbild abweichen. Insgesamt aber ist die FACETS-Implementierung sogar etwa 10 000-mal schneller als dieses. Das erlaubt es, nicht nur eine Sekunde Hirnaktivität, sondern auch länger dauernde Prozesse zu emulieren: Während eine Synapse ankommende Signale innerhalb von Millisekunden als Ursache oder Wirkung klassifiziert, nehmen Lern- und Entwicklungsprozesse Tage bis Monate in Anspruch; die Evolution unserer kognitiven Ausstattung benötigte bekanntlich Zehntausende von Jahren. Simulationen auf Hochleistungsrechnern wie dem BlueGene/P benötigen aber drei Monate Rechenzeit, um einen biologischen Tag abzuwickeln. Keine Chance also, beispielsweise ein numerisches Großexperiment viele tausend Mal zu wiederholen,



um Parameter zu optimieren und neue Erkenntnisse zu gewinnen. FACETS hingegen emuliert einen biologischen Tag in nur zehn Sekunden.

Wie lässt sich ein neuromorpher Rechner in Silizium umsetzen? Da ein Neuron 10 000 oder mehr Signaleingänge haben kann, dominieren Synapsen und deren Verbindungen zwangsläufig die Fläche eines Chips. Beim Schaltungsentwurf galt es also, eine hohe Dichte von Kontaktstellen zu schaffen und diese Elemente mit den Neuronen zu verbinden. Man erreicht das zum Beispiel durch Schalter in Kreuzungspunkten elektrischer Leitungen («cross-bar-switch») oder so genannte Multiplexer, die Leitungen in einem Netzwerk bündeln und Informationen gezielt weiterschalten.

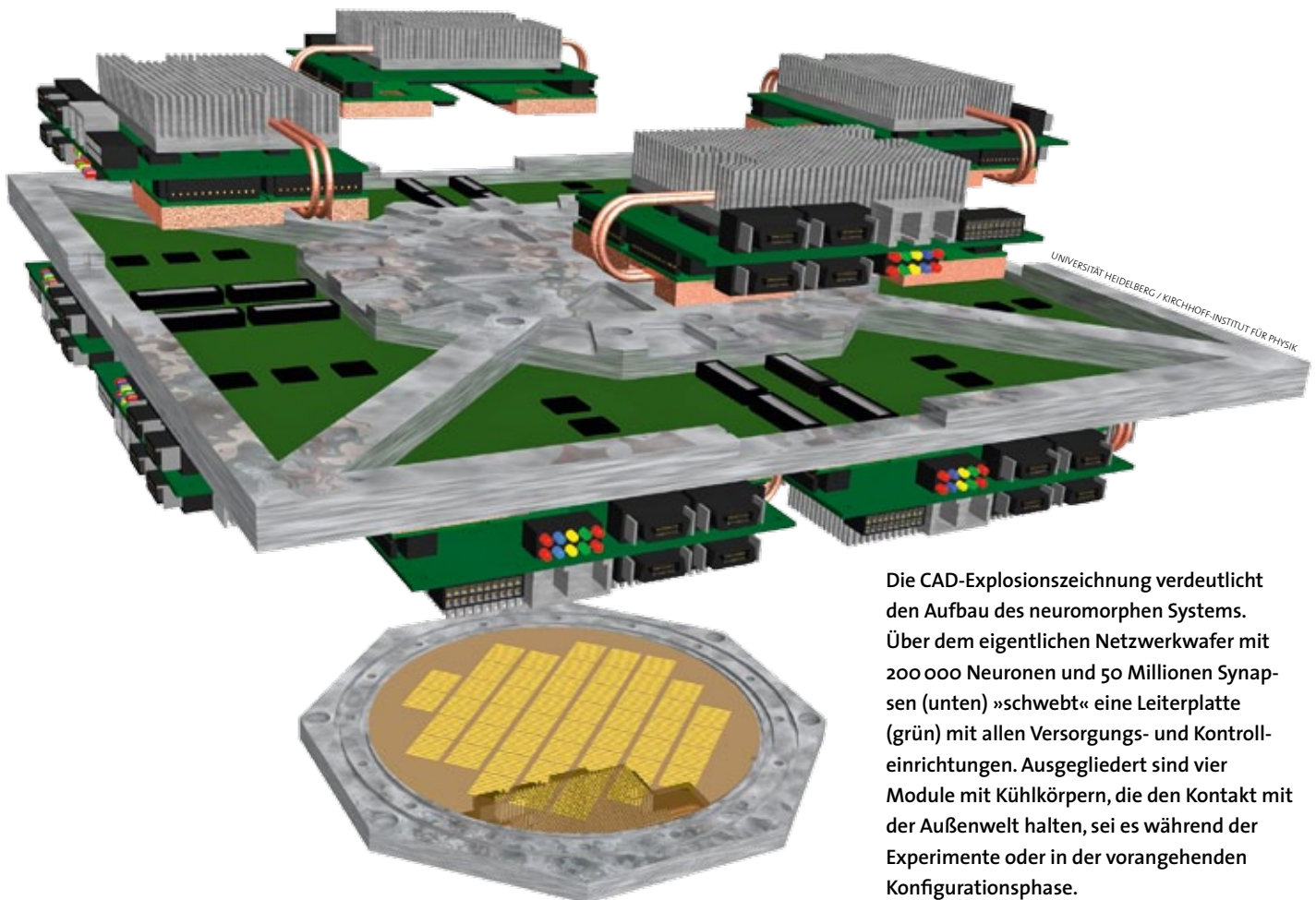
Ein konventioneller Siliziumchip misst zwischen einigen Millimetern und einem Zentimeter Kantenlänge; er wird in großer Zahl aus einem Wafer hergestellt, einer Siliziumscheibe von 20 Zentimeter Durchmesser. Solch ein Chip bietet aber nur Platz für gut 100 Neurone und einige 100 000 Synapsen. Das FACETS-Team entschied daher bald, komplette Wafer zu verwenden. Das erforderte eine Anpassung in der Fertigungstechnik, denn die normalerweise darauf angelegten Schaltungen sind untereinander nicht elektrisch verbunden – solche in der Mitte des Wafers zu kontaktieren, ist schwierig. Gemeinsam mit dem Fraunhofer-Institut für

Zuverlässigkeit und Mikrointegration in Moritzburg lösten wir das Problem durch eine zusätzliche, den gesamten Wafer überdeckende Metallschicht. Dass keine Möglichkeit besteht, die unvermeidlichen Produktionsfehler durch Aussortieren der defekten Chips zu lösen, war hingegen unproblematisch: Anders als digitale Schaltungen sind die elektronischen fehlertolerant. Ein paar emulierte Synapsen mehr oder weniger – wie in der Biologie spielt das auch hier keine Rolle.

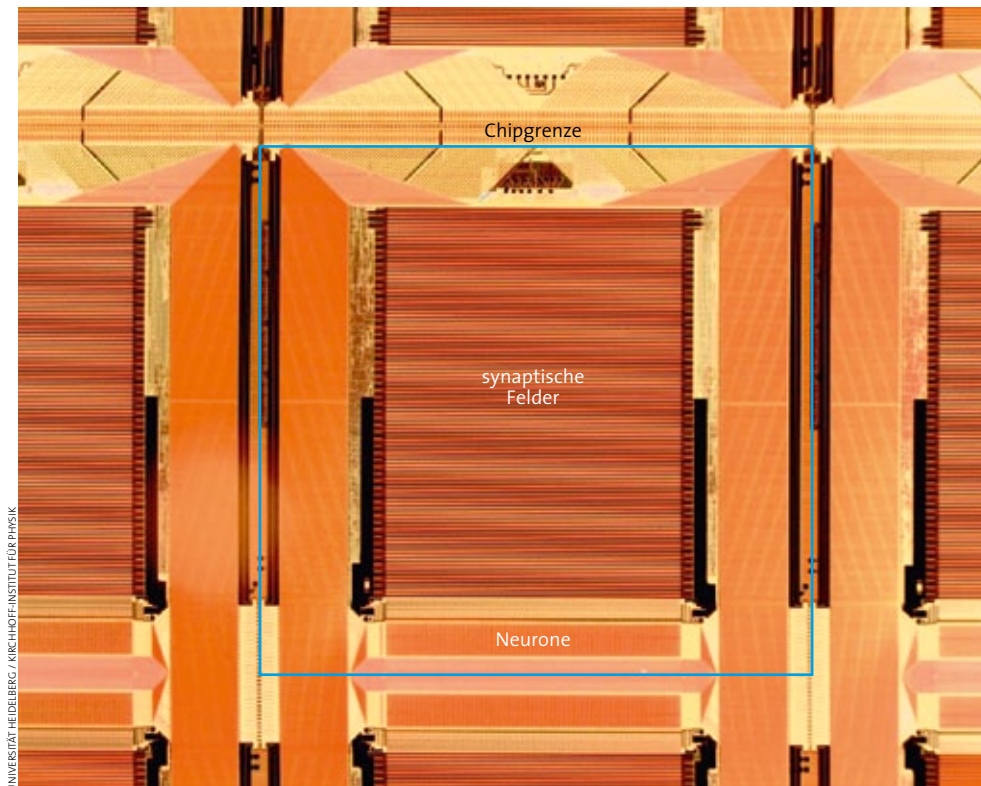
### »Wer mit wem?« fein justieren

Der aktuelle Netzwerkwafer umfasst etwa 200 000 Neurone, die durch 50 Millionen lernfähige Synapsen miteinander verbunden werden können. Eine einzelne Synapse hat eine Seitenlänge von zehn Mikrometern. Entscheidend bei diesem System ist, dass sich die Eigenschaften der Modelle der Neurone und Synapsen fein justieren lassen. Auch die Struktur des Verbindungsnetzwerks – also das »Wer mit wem?« – kann nach Belieben gestaltet werden. Bei laufendem Betrieb fließen auf dem Wafer mehr als zehn Terabit pro Sekunde; etwa genauso groß ist der Datenaustausch mit der Außenwelt – vergleichbar einem Experiment des Beschleunigers Large Hadron Collider (LHC) in Genf.

Mit diesem System lassen sich beispielsweise kognitive Mechanismen der Entscheidungsfindung untersuchen, um-



Die CAD-Explosionszeichnung verdeutlicht den Aufbau des neuromorphen Systems. Über dem eigentlichen Netzwerkwafer mit 200 000 Neuronen und 50 Millionen Synapsen (unten) »schwebt« eine Leiterplatte (grün) mit allen Versorgungs- und Kontroll-einrichtungen. Ausgegliedert sind vier Module mit Kühlkörpern, die den Kontakt mit der Außenwelt halten, sei es während der Experimente oder in der vorangehenden Konfigurationsphase.



Die Mikroskopaufnahme zeigt die Hälfte eines Chips von insgesamt 384 auf einem BrainScaleS-Netzwerkwafer. Man erkennt das Feld der 224 mal 256 plastischen Synapsen sowie einen Streifen mit 256 Neuronenschaltkreisen. Alle umliegenden Strukturen dienen dem Versenden und Empfangen von Spikes.

gekehrt aber auch die gewonnenen Erkenntnisse nutzen, um einen Entscheidungsprozess zu unterstützen. Wie kann das Gehirn etwa aus ähnlich klingenden Schallereignissen Wörter verstehen? Eine Möglichkeit sind so genannte Attraktornetze (siehe Kasten S. 96): Gruppen von Neuronen repräsentieren dabei mögliche Deutungen von Eingangssignalen. Indem sie einerseits Informationen weitergeben, andererseits ihre »Konkurrenten« hemmen, entsteht ein Wettbewerb, bei dem sich schließlich eine Gruppe durchsetzt. In unseren Versuchen damit machte es nichts aus, wenn bis zu einem Fünftel der synaptischen Verbindungen ausfielen – das System erwies sich als sehr fehlertolerant.

Ist dies nun aber auch, verglichen mit unserem Gehirn, ein effizientes System? Der Wafer verbraucht für die synaptischen Vorgänge bis zu ein Kilowatt, das scheint viel. Die erforderliche Energie, ein einzelnes Aktionspotenzial zu erzeugen und im Netzwerk zu verteilen, beträgt aber nur etwa 0,1 Nanojoule. Das Gehirn erledigt diese Aufgabe immer noch um den Faktor 10 000 besser (zehn Femtojoule), aber FACETS ist bereits zehn Milliarden Mal effizienter als der BlueGene/P-Rechner (ein Joule) mit einem zugegebenermaßen präziseren Modell.

Seit 2011 wird FACETS mit dem BrainScaleS-Projekt fortgeführt. Hier wollen wir neuromorphe und digitale Computer zu Hybridsystemen kombinieren. Letztere stellen dabei beispielsweise die Eingangsdaten zur Verfügung und fassen die emulierten Ergebnisse der Elektronik zusammen, um sie in eine zu den Messungen der Neurobiologie kompatible Form zu bringen. Eine weitere ganz entscheidende Funktion der

Hybridsysteme ist die Durchführung so genannter »closed-loop«-Experimente, in denen das neuromorphe System mit einer virtuellen Umgebung wechselwirkt. So lassen sich Lern- und Entwicklungsprozesse emulieren. Bis neuromorphe Computer die Komplexität ganzer Gehirnareale erreichen, wird noch einige Zeit ins Land gehen – kleinere Systeme könnten aber bald auch für kommerzielle Anwendungen zur Verfügung stehen. ~

#### DER AUTOR



Der Physiker **Karlheinz Meier** lehrt und forscht am Kirchhoff-Institut für Physik der Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg. Er ist Koordinator des BrainScaleS-Projekts und Kodirektor des geplanten Europäischen HBP-Flagship-Projekts.

#### QUELLEN

- Brüderle, D. et al.:** A Comprehensive Workflow for General-Purpose Neural Modeling with Highly Configurable Neuromorphic Hardware Systems. In: *Biological Cybernetics* 104(4–5), S. 263–296, 2011
- Indiveri, G. et al.:** Neuromorphic Silicon Neuron Circuits. In: *Frontiers in Neuromorphic Engineering* 10.3389/fnins.2011.00073
- Mead, C.:** *Analog VLSI and Neural Systems*. Addison Wesley Publishing Company, Boston 1989

#### WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1157707](http://www.spektrum.de/artikel/1157707)



Brian Greene

**Die verborgene Wirklichkeit**

Paralleluniversen und die Gesetze des Kosmos

Aus dem Englischen von Sebastian Vogel.

Siedler, München 2012. 448 S., € 24,99

ASTRONOMIE

## Im Wunderland der Kosmologen

Brian Greene führt uns in schwindelnde Höhen der Theorie, wo Universen wie Brotscheiben herumschweben oder sich schneller vermehren als die Karnickel.

Laut Wittgenstein sollte die Welt »alles« sein, »was der Fall ist«, die »Gesamtheit der Tatsachen, nicht der Dinge«. Aber selbst wenn man immer wüsste, was so alles der Fall ist, müsste man bei Brian Greenes neuestem Buch in tiefstes Grübeln verfallen. Da geht es andauernd um »alles«, aber nun ist es das Universum und mehr, nämlich das Multiversum mit all seinen, womöglich unendlich vielen Paralleluniversen.

Und die sind nicht etwa irgendwann einmal entstanden, denn schließlich kennt man im Megamultiweltall keine globale Zeit, in der sich für jede Universumsgeburt Vergangenheit von Zukunft unterscheiden ließe. Vielmehr könnte »inflationäre Expansion«, so Greene, »in weit entfernten Bereichen auch gerade jetzt ein Universum nach dem anderen hervorbringen«.

Um das zu verdauen, hilft es vielleicht, zwischen Wirklichkeit und Realität zu unterscheiden. Erstere ist eine Sonderform der Realität; sie betrifft die Dinge, die »eine Wirkung haben oder ausüben« können. So sind Zahlen zwar Teil der Realität, aber nicht der Wirklichkeit. Und das »wirkliche« Universum wäre dann eben nur unser eigenes, kein anderes paralleles.

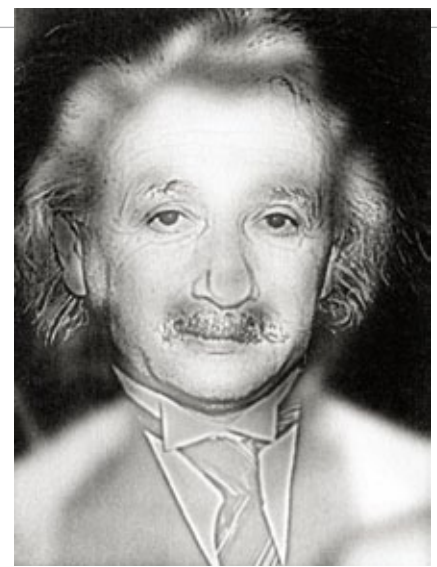
Solche Vorbetrachtungen sind vielleicht nötig, um dem theoretischen Physiker von der Columbia University in seinem Buch folgen zu können. Brian Greene ist einer der führenden Erforscher der Stringtheorie, Buchautor (»Das elegante Universum«, siehe Spektrum der Wissenschaft 8/2000, S. 106),

prominenter Wissenschaftskommunikator, Mitbegründer des World Science Festivals in New York und im US-Fernsehen präsent wie einst der Astronom und Sciencefiction-Autor Carl Sagan.

Was an einem Universum elegant sein soll, liegt sicher im Auge seines Betrachters – der Menschheit natürlich. Wenn man heute Kosmologen und Teilchenastrophysikern lauscht, sieht es merkwürdig bis bizarr aus. Es ist das Verdienst dieses Buchs, alle Gedanken, Modelle und Thesen zum Thema Multiversen einmal systematisch zusammenzutragen, logisch aufzubereiten – und dann zu hinterfragen, was das noch alles mit Naturwissenschaft zu tun hat. Greenes These: Paralleluniversen können – unter bestimmten Voraussetzungen – »eindeutig zum Forschungsgebiet der Naturwissenschaft gehören«.

Das ist beruhigend, könnten doch einem Nichteingeweihten Zweifel kommen, wenn der Theoretiker uns durch satte neun Varianten von Multiversen führt. Leider nimmt der Grad an Verdaulichkeit mit zunehmender Variantenummer deutlich ab. Einige seien hier aufgeführt.

Brian Greene startet eigentlich ganz unparallel, nämlich in unserem eigenen Universum. Wenn dieses, wie es heute aussieht, räumlich unendlich groß ist, dann muss alles, was hier und jetzt der Fall ist, im Prinzip auch woanders nochmals existieren, sogar unendlich oft – sozusagen als Parallelwelten innerhalb unseres Universums. Das klingt etwas absurd; aber so sind nun mal die Ge-



Eine Stringtheorie geht so bruchlos in die andere über wie auf diesem Bild Albert Einstein (aus der Nähe betrachtet) in Marilyn Monroe (aus großer Entfernung).

setze der Wahrscheinlichkeit, wenn sie mit dem Unendlichen kollidieren.

Im nächsten Schritt wird es dann schon ernster: Unser heutiges Quasi-Standardmodell des Universums hat zwar eine hyperschnelle (»inflationäre«) Anfangsphase; aber die muss keineswegs einmalig sein. »In weit entfernten Bereichen«, so Greene, »könnte inflationäre Expansion ... ein Universum nach dem anderen« hervorbringen. Auch die Stringtheorie, die alle Naturkräfte in einem Teilchenphysikmodell vereinen soll, hat ihr Multikosmos-Szenario. Nur nennt sich dieses »Branwelt«. In einem abstrakten höherdimensionalen Raum schweben verschiedene Universen wie Brotscheiben herum und kollidieren auch mal miteinander. Das klingt schon heftig; aber der Urknall würde gerade zu einem Zusammenstoß zweier Branwelten passen. Alternativ verweisen Stringtheoretiker dreist auf  $10^{500}$  mögliche Varianten unterschiedlicher Universen, die sie sich in einer grandiosen »Landschaft« wie dem Alpenvorland vorstellen. Demnach hausen wir mit unserer Welt in einem Seitental.

Natürlich darf auch der Urvater dieser Diskussion nicht fehlen: Hugh Everett III. Der amerikanische Theoretiker postulierte 1957, dass wegen der Gesetze der Quantenmechanik bei jeder indivi-



duellen Messung nicht ein bestimmter unter allen überlagerten Zuständen eines Systems realisiert werde, sondern alle – jede Realisierung in einer anderen Welt. Ununterbrochen würden so neue Welten hervorgebracht – eine ziemlich opulente Weise, sich aus dem Problem des »Kollaps der Wellenfunktion« herauszuwinden. Die ist zwar logisch konsistent, will aber dennoch keinem so richtig schmecken, denn die These ist nicht falsifizierbar und führt daher nicht wirklich weiter.

Nein, Brian Greene will den Leser nicht von irgendetwas überzeugen. Aber die Indizien würden sich seiner Meinung nach doch häufen, treibe man nur die Mathematik an ihre Extreme. Das wirft die erwähnte Frage auf, was das noch mit Naturwissenschaft zu tun hat, deren Kredo und Basis schließlich Beobachtungen und Messungen darstellen und nicht sciencefiction-artige Metatheorien. Da hilft auch die Überzeugung nicht, dass »die Mathematik eng mit dem Gewebe der Wirklichkeit verflochten« sei, oder gar die kühne These »Mathematik ist die Wirklichkeit«.

Eine experimentelle Überprüfung ist, so gibt auch Greene zu, derzeit nicht möglich, die Chance dafür »könnte sich mit neuen Forschungsvorhaben allerdings deutlich verbessern«.

Das ist das Prinzip Hoffnung, das gerade Kosmologen beflügelt, wenn sie mal wieder ein neues Raumteleskop anschaffen und das scheinbar Unmögliche messen wollen. Brian Greene plädiert dafür, sich nicht auf Ideen zu beschränken, die man »jetzt oder in naher Zukunft« überprüfen könne. Vielmehr zieht er die Grenze bei Einfällen, die niemals Experimenten oder Beobachtungen ausgesetzt werden können.

Insofern hält der Theoretiker bei aller Sympathie für kosmologische Spekulationen die Balance als Naturforscher. Ein tolles Buch des amerikanischen Theoretikers, das einen auch nach der Lektüre noch lange nicht in Ruhe lässt.

**Reinhard Breuer**

Der Autor ist Astrophysiker, Editor-at-large bei »Spektrum der Wissenschaft« und Bewohner dieses Universums.



Paul Krugman

**Vergesst die Krise!**

Warum wir jetzt Geld ausgeben müssen

Aus dem Englischen von Jürgen Neubauer.

Campus, Frankfurt am Main 2012. 272 S., € 24,99

WIRTSCHAFTSWISSENSCHAFT

## Keynes für Anfänger

Ein prominenter Ökonom hat für die gegenwärtige Finanzkrise nichts weiter zu bieten als ein altes und ungeeignetes Rezept.

Das kann doch eigentlich nicht wahr sein! Paul Krugman ist ein überaus origineller Mensch, Träger des Wirtschaftsnobelpreises (Spektrum der Wissenschaft 12/2008, S. 18) und wichtiger politischer Kolumnist in den USA, bekannt dafür, gern querzudenken und dicht an der Aktualität zu arbeiten. Und der hat in einem ganzen Buch zu einem

höchst aktuellen Thema nicht mehr zu sagen als den einen Satz, der schon auf dem Umschlag steht? Doch, es ist wahr. Wer eine fundierte oder zumindest eine interessante Meinung zur aktuellen europäischen Staatsschuldenkrise erwartet, wird aus zwei Gründen enttäuscht: Krugman bezieht sich fast ausschließlich auf die aktuelle Wachstums-



Internationale Fachmesse

■ Ideen ■ Erfindungen ■ Neuheiten

1.-4. Nov. 2012

Die No. 1  
im Kontakt zur  
Erfindung!



● **Neue Ideen für den Markt.**

Die iENA 2012 Nürnberg ist der internationale Markt für Ideen, Erfindungen und Neuheiten.

● **Wichtig für alle,** die Erfindungen und Neuheiten verwerten und Top-Kontakte zu Erfindern suchen.

● **iENA-Symposium**

Freitag, 2. Nov. 2012, 10-13 Uhr  
„Innovationsmanagement – von der kreativen Idee bis hin zum marktreifen Produkt.“  
(Teilnahme im Eintritt enthalten)

● **Fachberatung und Information**

Messe Nürnberg · Halle 12



International  
Federation of  
Inventors'  
Associations



In Kooperation mit:  
FINANCIAL TIMES  
DEUTSCHLAND



www.halle13.net



Veranstalter/Organisation  
AFAG Messen und Ausstellungen GmbH  
Projektmanagement iENA 2012  
Messezentrum 1, 90471 Nürnberg  
☎ 09 11 - 9 88 33 - 570  
☎ 09 11 - 9 88 33 - 579

iena@afag.de · www.iena.de



Sabine Paul

**PaläoPower. Das Wissen der Evolution nutzen für Ernährung, Gesundheit und Genuss**

C.H. Beck, München 2012. 301 S., € 12,95

»Bewegt euch viel an der frischen Luft und esst wie eure Vorfahren aus der Altsteinzeit.« Diese These vertritt die promovierte Molekular- und Evolutionsbiologin Sabine Paul in dem von ihr gegründeten »Paläopower-Institut für evolutionäre Strategien« in Frankfurt am Main – und in diesem handlichen Ratgeberbuch, leicht verständlich und mitunter zu stark vereinfacht. Die Produkte der modernen, intensivierten Landwirtschaft könnten uns nicht das ausgewogene Nahrungsspektrum bieten, das unser Organismus von seiner Evolutionsgeschichte her benötigt. Fehlernährung sei eine Wurzel vieler Zivilisationsleiden, von Diabetes und Übergewicht bis hin zu kindlichen Lernstörungen. Neu ist das meiste nicht; immerhin waren mir einzelne Zusammenhänge nicht bekannt. Aber Paul hätte berücksichtigen sollen, dass sich die Menschen seit der neolithischen Revolution auch genetisch verändert haben. So vertragen die meisten Europäer heute Milchprodukte und Getreide. ADELHEID STAHNKE



Mary Roach

**Die fabelhafte Welt der Leichen**

Aus dem Englischen von Michaela Grabinger. riva, München 2012. 352 S., € 19,99

So unbekümmert nassforsch wie der (auf einen Film anspielende) Titel ist das gesamte Buch. Mary Roach erzählt in munterem Plauderton, was für fantastische Dinge man mit Leichen anstellen kann, um Wissenschaft und Technik, oder was sich dafür ausgibt, voranzubringen. Den Einwand, derlei Tun sei »respektlos« – pietätlos wäre wohl treffender –, lässt sie nicht gelten. Schließlich könne es Toten, die nichts mehr spüren, egal sein, was mit ihnen geschieht. Warum sollten sie sich also nicht noch nützlich machen? Es mag ja sein, dass die Crashtests, deren Ergebnisse die Journalistin mit makabrer Lust am Schaurigen beschreibt, sogar helfen, Menschenleben zu retten. Aber man kann auch etwas dezenter darüber berichten. Einen morbiden Voyeurismus zu befriedigen, scheint jedoch verkaufsträchtig zu sein. Warum sonst hat der Verlag das bereits 2005 bei dva erschienene Buch jetzt neu herausgebracht? GERHARD TRAGESER



Adam Hart-Davis

**Das Buch der Zeit**

Aus dem Englischen von Michael Haupt und Anna Schleitzer. Primus, Darmstadt 2012. 256 S., € 29,90

Ein Buch über ein wahrhaft alltägliches und dennoch außerordentlich komplexes Phänomen: die Zeit. Adam Hart-Davis lässt dazu Vertreter diverser Epochen und Kulturen ebenso zu Wort kommen wie Wissenschaftler heutiger Disziplinen. Gibt es etwas anderes als die Gegenwart, und was geschähe mit der Zeit, wenn man sich mit annähernder Lichtgeschwindigkeit bewegen würde? Mit Fragen wie diesen und vielen unterhaltsamen Beispielen versteht es der Autor, die vorgestellten Konzepte aufs Anschaulichste zu erläutern. Die mit Liebe zum Detail gestalteten Illustrationen und prägnanten Grafiken tragen dazu ebenso bei wie der eingängige Erzählstil. Ohne zu sehr in Einzelheiten abzudriften, präsentiert Davis ein umfassendes und kurzweiliges Buch, nach dessen Lektüre man das Verstehen der Zeit wahrscheinlich um einiges bewusster wahrnehmen wird. ARNE BAUDACH



Henning Aabel (Hg.)

**Unser Technikerbe. 350 Denkmäler und Zeugen deutscher Technikkultur**

Bucher, München 2012. 284 S., € 29,95

Was versteht man unter »Technikerbe«? Na klar: die Zeche Zollverein, ein eindrucksvolles und ansehnliches Denkmal einer ehemals bedeutenden Technik, die sich überlebt hat. Eine Linsenschleiferei, ein Textilmuseum – es gibt erstaunlich viele ehemals berühmte Firmen, deren Anlagen nach der Insolvenz zum Museum umfunktioniert wurden. Das Deutsche Museum findet zu Recht mehrseitige Erwähnung. Aber noch in Betrieb befindliche Denkmäler? Die Wuppertaler Schwebebahn – na gut, alt ist sie ja. Der Mannheimer Wasserturm? Die Schwarzenbachtalsperre? Die Kochertalbrücke? Ein bisschen Gewalt haben die Autoren bei dieser Zusammenstellung schon angewandt, um auf die 350 Stück zu kommen. Entsprechend karg geraten die Erläuterungen zu jedem einzelnen Objekt. Aber für einen Ausflug mit technikbegeisterten Kindern ist das Buch ein guter Reiseführer. CHRISTOPH PÖPPE

schwäche in den USA und nur ganz am Rande auf die Krise in der Europäischen Währungsunion; vor allem aber sind die Kerninhalte alles andere als neu.

Der Autor verfiert die These von John Maynard Keynes (1883–1946), dass in Situationen wie der gegenwärtigen in den Vereinigten Staaten eine entschiedene Steigerung der Staatsausgaben geboten ist. Die Idee ist allgemein bekannt und im Prinzip so simpel, wie sie klingt: Wenn, wie momentan, die eigene Konjunktur lahmt und auch die internationale Wirtschaft nicht so brummt, dass sie reichlich inländische Produkte abnimmt, soll der Staat als Nachfrager einspringen und schuldenfinanziert die Konjunktur ankurbeln. Nach der keynesianischen Theorie wird mit dieser Initialzündung die Sache zum Selbstläufer: Es entstehen Arbeitsplätze, und die Steuereinnahmen steigen, so dass der Staat seine Schulden nach kurzer Zeit wieder zurückzahlen könnte (wenn er wollte; aber ob er sollte, das gehört nicht

so zwingend zur Theorie). Wenn er dabei sogar sinnvolle Güter und Dienstleistungen nachfragt, etwa Investitionen in Infrastruktur oder Bildung, lohnt sich das Ganze doppelt, weil das die Leistungsfähigkeit der Wirtschaft erhöht und dadurch zusätzlicher Wohlstand entsteht. Schlägt das Experiment fehl und der Konjunkturmotor springt nicht richtig an, war der Impuls wohl nicht stark genug. Genau so hat Keynes es dargestellt, so steht es in den Lehrbüchern und war schon zigmal in den Zeitungen zu lesen. Und genau dieser Argumentation folgt Krugman in dem Buch.

Der Gedanke ist in bestimmten wirtschaftlichen Konstellationen – wie in der weltweiten Rezession 2008/09 – genau richtig und sollte auch meiner Meinung nach häufiger erwogen und umgesetzt werden. Allerdings gibt es Situationen, in denen keynesianische Ausgabenpolitik völlig verkehrt oder gar unmöglich ist. Krugman deutet

selbst ein Beispiel an, nämlich Griechenland, das zur Zeit gar keine Schulden mehr aufnehmen kann, weil diesem Staat niemand mehr zu vernünftigen Zinsen Geld leiht. Auch in Krugmans Denken gibt es also Grenzen einer keynesianischen Ausgabenpolitik. Es wäre interessant gewesen, diese Grenzen näher beschrieben zu bekommen, aber das leistet das Buch nicht.

Krugman vereinfacht die Dinge so weit, dass es langweilig wird – schlimm genug; aber manchmal kommen dabei sogar Aussagen heraus, die er hoffentlich nicht so gemeint hat. So kann man einige Passagen des Buchs als Aufforderung verstehen, den Folgen der übermäßigen Kreditvergabe in den Jahren bis 2008 und der daraus entstandenen Immobilienblase wiederum mit kreditfinanzierten Staatsausgaben zu begegnen – nach dem Motto »Der Aufschwung in der Blasenökonomie war doch so schön, lasst uns eine neue aufpusten«. Den Einwand, dass es nicht

ANZEIGE

# Unabhängige Deutsche Universitätszeitung

## Wissenschaft weiterdenken



Holen Sie sich alle wichtigen Infos  
aus Hochschule und Wissenschaft:

[duz.de](http://duz.de)

[duz-wissenschaftskarriere.de](http://duz-wissenschaftskarriere.de)

**Hintergrundinfos · Nachrichten · Empfehlungen und die besten Jobs**  
für Nachwuchswissenschaftler, Fach- und Führungskräfte aus Hochschule und Wissenschaft



langfristig gut gehen kann, einfach immer noch mehr Staatskredite aufzunehmen, wischt er mit dem Hinweis vom Tisch, das sei nur eine Moralfabel von verhärmteten Spaßbremsen, die zur Selbstkasteiung neigen, wenn es ihnen mal gut gegangen ist. Als Prototyp nennt er hier mehrfach Wolfgang Schäuble. Die Beispiele Griechenland und Spanien zeigen jedoch sehr deutlich, dass man ein bisschen differenzierter an die Sache herangehen sollte.

Um diese Theorie und den Appell zum Geldausgeben herum erzählt Krugman vor allem, wie es zu der Rezession in den Vereinigten Staaten kam: eine Mischung von amerikanischer Geschichtsschreibung und Generalabrechnung mit den wirtschaftlichen Autoritäten, die bisweilen hart an Verschwörungstheorien grenzt. Dennoch finden sich hier die interessantesten Passagen. Krugman macht vor allem die fortschreitende Deregulierung des US-amerikanischen Bankensystems für die Hauspreisblase und den damit verbundenen Zusammenbruch der Lehman-Bank verantwortlich. Die Lockerung der

Regeln eröffnete nämlich neue Geschäftsmöglichkeiten, welche die »Renditeerwartungen« – man könnte sie auch einfach als »Gier« bezeichnen – von Bankern und Anlegern anfachten. Da höhere Rendite aber immer mit höherem Risiko verbunden ist, wurde das Bankgeschäft weltweit immer mehr zum Tanz auf dem Vulkan. Auch wenn es vielleicht noch weitere Ursachen für die weltweite Rezession 2008/09 gibt: So auf den Punkt gebracht liest man die Mitschuld der Politik und der Lobbyarbeit von Deregulierungsbefürwortern selten. Hier legt Krugman den Finger in eine ziemlich hässliche Wunde.

Und wie liest sich der »Weckruf des Wirtschaftsnobelpreisträgers«, wie das Buch auf der Titelseite angepriesen wird? Der Stil ist irritierend. Krugman spricht völlig ironiefrei über die »Vertreter der richtigen Lösung«, die von den »Vertretern der falschen Lösungen« bekämpft wurden. So einfach ist für ihn die Aufteilung der Menschheit. Auch Weltbank und Internationaler Währungsfonds, die Notenbanken und die allermeisten Professoren-Kollegen sind

nach Ansicht von Krugman zu dumm oder korrumpiert, um die Zusammenhänge zu sehen. Leider hat der Autor offenbar auch von seinen Lesern keine sehr hohe Meinung. Jedenfalls glaubt er, alles im Ton der »Sendung mit der Maus« erklären zu müssen, und wiederholt seine Kernaussagen ständig.

Vielleicht sollte man in dem Buch nicht eine rationale und fundierte Argumentation suchen, sondern es einfach als politisches Plädoyer verstehen. Als Rede eines Politikers, der etwas geschwätzig für die Erhöhung der Staatsausgaben wirbt, ist es gar nicht so schlecht. Polemik, scharfe Schüsse gegen die Gegner, nette Anekdoten, bunte Metaphern, all das wird geboten, nicht aber eine ernst gemeinte, differenzierte Analyse oder gar eine halbwegs wissenschaftliche Auseinandersetzung mit dem Für und Wider der Theorie.

---

#### Hiltrud Nehls

Die Rezensentin ist promovierte Wirtschaftswissenschaftlerin und arbeitet bei der NRW.Bank, der Förderbank des Landes Nordrhein-Westfalen, als Länderrisiko-Analystin.



Steven S. Pinker

#### Gewalt

*Eine neue Geschichte der Menschheit*

Aus dem Englischen von Sebastian Vogel. S. Fischer, Frankfurt am Main 2011. 1211 Seiten, € 26,80

PSYCHOLOGIE

## Wir leben in einer Idylle – und merken es nicht

Nur eine Verzerrung unserer Wahrnehmung hindert uns zu erkennen, dass es uns in Bezug auf Mord und Totschlag besser geht als jemals zuvor.

Bei der Allgegenwart von Terror, Folter, Mord und Krieg in den Medien mag man die Hauptthese dieses Buchs kaum glauben: Steven Pinker, Psychologe an der Harvard University und bisher vor allem mit Büchern zur Sprach-

forschung bekanntgeworden (Spektrum der Wissenschaft 4/1998, S. 122, 5/1999, S. 150, und 2/2003, S. 91), behauptet, dass wir heute in der friedlichsten Epoche seit Menschengedenken leben und die Wahrscheinlichkeit, durch einen Ge-

waltakt zu sterben, so gering ist wie nie zuvor. Folter oder Sklaverei sind in vielen Staaten offiziell abgeschafft, Alltagsgewalt ist weit gehend aus der Öffentlichkeit verschwunden, und ihre Ausübung wird im Allgemeinen geächtet.

Pinker hat Ergebnisse aus den verschiedensten Disziplinen zusammengetragen, darunter Geschichts- und Sozialwissenschaften, Evolutionsbiologie, Kriminologie, Psychologie und Philosophie. Sein Gewaltbegriff ist, wie heute üblich, denkbar weit und schließt Mord, Körperverletzung, Diskriminierung und die subtile häusliche Gewalt ebenso ein wie Kriege, Terrorismus, Genozid, Sklaverei und Folter. Seine historischen Erläuterungen beziehen sich auf die unterschiedlichen Formen von Gewalt ebenso wie auf deren Wahrnehmung und Bewertung in Moral, Kunst und Alltag.

Nach der staatstheoretischen Idee, die der englische Philosoph Thomas Hobbes (1588–1679) in seinem Werk

Alle rezensierten Bücher können Sie in unserem Science-Shop bestellen

direkt bei: [www.science-shop.de](http://www.science-shop.de)  
per E-Mail: [shop@wissenschaft-online.de](mailto:shop@wissenschaft-online.de)  
telefonisch: 06221 9126-841  
per Fax: 06221 9126-869

»Leviathan« darlegte, zügeln erst Autorität, Gesetze und Herrschaft die natürliche Gewaltbereitschaft des Menschen. An die Stelle dieser drei alten Kräfte setzt Pinker vier neue: Vertrauen in die Macht des demokratischen Staates, Menschenrechte, Kapitalismus und die Verbreitung von Wissen durch Buchdruck und Internet.

Neben den historischen Zusammenhängen untersucht Pinker auch die biologischen und psychologischen Prozesse der menschlichen Aggression. Um seine These von der allgemeinen Abnahme der Gewalt zu belegen, vergleicht der Autor Opferzahlen aus verschiedenen Epochen miteinander. Ausführlich und gut verständlich legt er die Geschichte der Gewalt ebenso dar wie die ideologischen und politischen Hintergründe der jeweiligen Ära, von unseren tierischen Vorfahren bis zum aktuellen Tagesgeschehen.

Insgesamt bestätigen die Ergebnisse Pinkers These für die letzten Jahrhun-

derte. So ist etwa die Anzahl der Kriegstoten, gemessen an der jeweiligen Gesamtbevölkerung, stark gesunken, ebenso wie die allgemeine Mordrate oder die Anzahl der erfolgreichen Terroranschläge mit Todesopfern.

Eine derartig umfassende und interdisziplinäre Betrachtung des Phänomens Gewalt bringt Probleme mit sich. Die Auswahl der Quellen ist schwierig; das Buch erweckt vor allem bei den historischen Beispielen den Eindruck, der Autor habe sich zu Lasten der Friedensepochen auf die gewalttätigen Phasen konzentriert. Zahlen werden umso unzuverlässiger, je weiter man in der Vergangenheit zurückblickt. So gehen bereits die Schätzungen für die Opfer der Hexenverfolgung weit auseinander, und historisch-literarischen Quellen wie der Ilias oder der Bibel ist eigentlich kaum noch zu trauen.

Ebenso wie die Zahlen schwanken auch die Begrifflichkeiten. Die Definition zentraler Termini wie Gewalt, Mord oder Krieg leistet Pinker nicht selbst, sondern übernimmt sie aus der jeweiligen Quelle.

In seiner Darstellung konzentriert sich der Autor auffällig, aber nicht unerwartet, auf die USA, so als wolle er die spezielle Situation dort erklären. Dabei

spart er nicht mit Kritik am System seines Landes. Auch bei den historischen Vergleichen stellt er gerne Europa und die USA einander gegenüber.

Philosophisch folgt er einigen sehr abendländisch geprägten Annahmen: Die Kultur entwickelt sich grundsätzlich zum Besseren, alle Gesellschaften sind im Prinzip miteinander vergleichbar. Wertesysteme, Staatsphilosophien oder Moralkodizes, die nicht einem christlich-abendländischen Hintergrund entspringen, behandelt er nur am Rande.

Alles in allem gelingt Pinker die umfassende Betrachtung eines extrem schwierigen Themas in seiner ganzen Tiefe. Er präsentiert eine große Materialfülle, ohne jedoch die wissenschaftliche Distanz und den moralischen Blick zu verlieren. Manchmal drängt sich eine naturwissenschaftlich-mathematische Betrachtungsweise zu sehr in den Vordergrund.

Ein faszinierendes und spannendes Buch, das zum Nachdenken und Diskutieren einlädt wie kaum ein anderes.

#### Robin Gerst

Der Rezensent ist Archäologe und forscht derzeit über Kriege in der Vorgeschichte; er lebt in Hannover.

ANZEIGE

[www.fischerverlage.de](http://www.fischerverlage.de)



## Was die ältesten Sterne über uns und das Universum erzählen

Anna Frebel, junger Shooting-Star der Astrophysik, hat den ältesten bislang bekannten Stern gefunden und damit einen wichtigen Schlüssel zum Verständnis des gesamten Universums. Ein faszinierender Blick in die Tiefe des Alls und der Zeit. Ein lebensnaher und aktueller Bericht darüber, wie Naturwissenschaft heute betrieben wird.

352 Seiten, gebunden, € (D)19,99 **Ein Buch von S. FISCHER**



Anna Frebel



AUF DER SUCHE NACH DEN  
**ÄLTESTEN  
STERNEN**

S. FISCHER

## Ist Schrödingers Katze ein Quantenobjekt?

Ist sie nun tot oder lebendig – oder gar beides? Das Thema beschäftigt Forscher schon seit über 70 Jahren. Dahinter verbirgt sich die Frage, ob die Quantenphysik auch für die makroskopische Welt gilt. Neue Experimente mit Systemen großer Masse liefern inzwischen Hinweise zur Klärung dieses Rätsels.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / DANIELA LEITNER

### Die Prostatakrebs-Debatte

Hunderttausende Männer leiden nach unnötigen Behandlungen an massiven Nebenwirkungen: Schadet die Früherkennung hier mehr, als sie nutzt? Der Mediziner Marc B. Garnick spricht sich dafür aus, bei der Diagnose »Prostatakrebs« nicht sofort zu therapieren, sondern erst einmal abzuwarten.

### Problematische Vielfalt

Die klassische Familie hat durch neue Formen des Zusammenlebens Konkurrenz bekommen. Sozial- und Familienpolitik orientieren sich aber nach wie vor an der traditionellen Institution der Ehe. Gerade hinsichtlich der in Kindheit und Alter anfallenden Betreuungsaufgaben wächst der Handlungsbedarf.



ROBERT COX

### Komplexe Ökosysteme

Das Zusammenspiel zwischen Organismen und ihrer Umwelt wird noch viel zu wenig verstanden. Ökologen entwerfen trickreiche Eingriffe, etwa um die Bedeutung großer Säugetiere für einen Lebensraum zu ergründen.



MATTHEW JANE

### Warum Luft anhalten schwer ist

Der Kohlendioxid- oder Sauerstoffgehalt im Blut bestimmt nicht allein, wie schnell ein Taucher wieder nach Luft schnappen muss. Vor allem ein vom Zwerchfell ausgesendetes Signal ist für das Zeitlimit maßgeblich.

### 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](http://www.spektrum.com/newsletter)



# DIE VORTEILE EINES ABONNEMENTS

So vielfältig wie unser Magazin!



- 1** Zwölf Ausgaben zum Preis von nur € 84,- inkl. Versand Inland (statt € 94,80 im Einzelkauf); für Schüler, Studenten und Azubis auf Nachweis sogar nur € 69,90
- 2** 2 in 1: Sie erhalten nicht nur die Printausgabe, sondern können auch schon drei Tage vor dem Erstverkaufstag auf die Digitalausgabe zugreifen!
- 3** Kostenloser Zugriff auf das Onlineheftarchiv von **Spektrum der Wissenschaft** mit fast 9000 Artikeln
- 4** Bonusartikel und Gratisdownloads ausgesuchter Sonderhefte im Internet
- 5** Verbilligter Erwerb des Produkts des Monats



Produkt im September

Mikroskop »Bresser Visiomar«

- 6** Zusätzlich für Ihre Abobestellung erhalten Sie ein Präsent Ihrer Wahl!

Weitere Präsente finden Sie im Internet ...



Der **loopshopper L** von **Reisenthel** verbindet Eleganz beim Einkaufen mit viel Funktion: Zwei äußere Stecktaschen sowie eine innere mit Reißverschluss. Der Korb ist auf Grund der gepolsterten Aluminiumgriffe sicher und bequem zu tragen. Fassungsvermögen: 25 l



Die **DVD »Das Wunder des Lebens«** von Lennart Nilsson dokumentiert die abenteuerliche Entstehung eines Menschen. In bis zu 2000-facher Vergrößerung werden die dramatischen Abschnitte der Entstehung bis hin zur Geburt eines Babys gezeigt. Zirka 45 Minuten Laufzeit



»Das kleine Buch der Stringtheorie«  
Die Stringtheorie gilt als eine »Theorie für alles«, mit der sich sämtliche Grundkräfte der Natur beschreiben lassen. Man erhofft sich von ihr die Formulierung einer einheitlichen Theorie für Schwerkraft und Quantenmechanik.

Dieses und zusätzliche Aboangebote wie **Geschenkabo**, **Miniabo** oder **Leser-werben-Leser-Abos** finden Sie unter:

[www.spektrum.de/abo](http://www.spektrum.de/abo)

**Spektrum**  
DER WISSENSCHAFT  
WISSENSCHAFT AUS ERSTER HAND



online: [spektrum.de/abo](http://spektrum.de/abo)



E-Mail: [service@spektrum.com](mailto:service@spektrum.com)



Tel.: +49 6221 9126-743



Fax: +49 6221 9126-751



**AcademiaNet** ist ein einzigartiger Service für Entscheidungsträger aus Wissenschaft und Industrie, ebenso wie für Journalisten und Veranstalter von Tagungen und Kongressen. Hier finden Sie hochqualifizierte Akademikerinnen, die neben ihren hervorragenden fachlichen Qualifikationen auch noch Führungserfahrung und Managementfähigkeiten vorweisen können.

**AcademiaNet**, das europäische Rechercheportal für herausragende Wissenschaftlerinnen bietet:

- Profile hochqualifizierter Akademikerinnen aller Fachrichtungen – ausgewählt von Vertretern renommierter Wissenschaftsorganisationen und Industrieverbänden
- Individuelle Suchmöglichkeiten nach Fachrichtungen, Arbeitsgebieten und weiteren Kriterien
- Aktuelle redaktionelle Beiträge zum Thema »Frauen in der Wissenschaft«

Robert Bosch **Stiftung**

**Spektrum**  
DER WISSENSCHAFT

**nature**

Eine Initiative der Robert Bosch Stiftung in Zusammenarbeit mit Spektrum der Wissenschaft und der nature publishing group

[www.academia-net.org](http://www.academia-net.org)