

# Spektrum

DER WISSENSCHAFT

Gesellschaft 3.0

Auslaufmodell Familie

Wer sorgt 2030 für  
Kinder und Alte?



OKTOBER 2012

PROSTATAKREBS

Test zur Früherkennung  
in der Kritik

SUPERCOMPUTER

Wettrennen  
zum Exaflops-Rechner

GEHIRN

Einzigartig durch  
springende Gene

## Schrödingers Katze auf dem Prüfstand

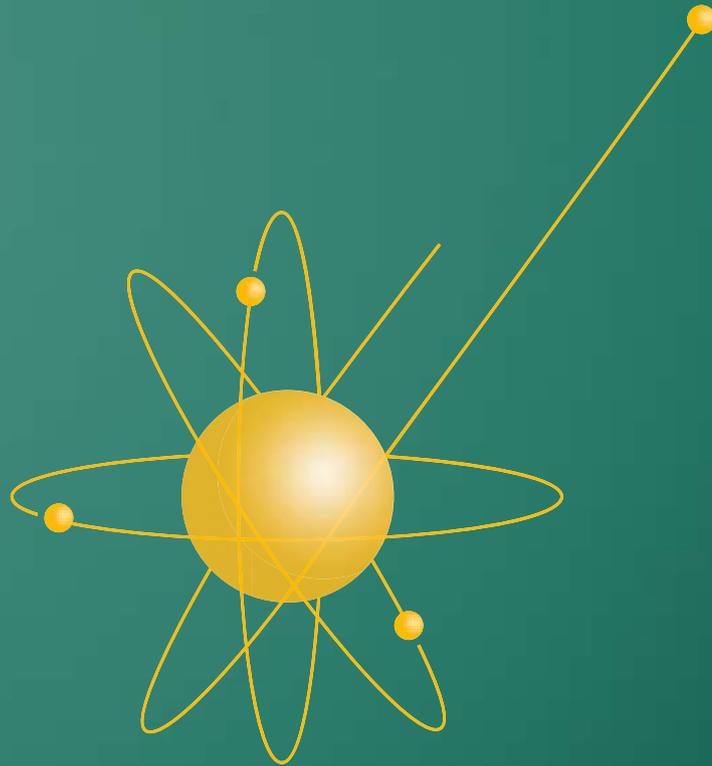
Physiker erforschen Quanteneigenschaften  
großer Objekte



$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\psi(t)\rangle = \hat{H} |\psi(t)\rangle$$

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





Grow Further.

## WORKSHOP FÜR NATURWISSENSCHAFTLER

**Verändern Sie die Welt. Zum Besseren.  
Vom 29. bis 30. November 2012 in Wien.**

Entdecken Sie die Bandbreite Ihrer Möglichkeiten. Und die Tragweite Ihres Handelns. Als Teil eines interdisziplinären Teams meistern Sie bei der weltweit führenden Strategieberatung nicht nur vielfältige ökonomische Herausforderungen. Sie übernehmen auch große soziale oder ökologische Verantwortung. Bei diesem Workshop lernen Sie beide Seiten kennen. Nutzen Sie Ihr naturwissenschaftliches Know-how bei einer Fallstudie zu relevanten Zukunftsthemen. Und diskutieren Sie im Stift Heiligenkreuz mit dem Abt und BCG darüber, wie sich Wirtschaft und Ethik in Einklang bringen lassen. Schließlich sollen Ihre Strategien ebenso wirtschaftlich wie auch gesellschaftlich tragfähig sein. Wir suchen herausragende Universitätsstudierende, Doktoranden und Professionals (w/m) aller naturwissenschaftlichen Fachrichtungen (u. a. Biologie, Chemie, Mathematik, Physik und Medizin). Bitte senden Sie Ihre Unterlagen bis zum 12. Oktober an Mirja Hentschel, E-Mail: [nawi-workshop@bcg.com](mailto:nawi-workshop@bcg.com). **Mehr unter [nawi-workshop.bcg.de](http://nawi-workshop.bcg.de)**

# BCG

THE BOSTON CONSULTING GROUP





Carsten Könneker  
Chefredakteur  
koenneker@spektrum.com

## Lebendig? Tot? Unsterblich!

Ob sie nun lebt oder nicht, das ist nicht mehr die Frage – als Gedankenexperiment ist Schrödingers Katze ohnehin längst unsterblich. Der österreichische Physiker hatte das berühmte Tier 1935 erschaffen. Es sollte einer missliebigen Interpretation der Quantenmechanik den Garaus machen, die seine Kollegen Max Born, Nils Bohr und Werner Heisenberg wenige Jahre zuvor entwickelt hatten, die so genannte Kopenhagener Deutung. Demnach wird jedes quantenmechanische System vollständig durch seine Wellenfunktion beschrieben. Für ein radioaktives Atom etwa lautet sie  $\Psi_{\text{Atom}} = c_{\text{nicht zerfallen}} \cdot \Psi_{\text{nicht zerfallen}} + c_{\text{zerfallen}} \cdot \Psi_{\text{zerfallen}}$ . Die Koeffizienten  $c$  enthalten dabei die Wahrscheinlichkeiten dafür, dass das Teilchen zu einem bestimmten Zeitpunkt zerfallen ist oder nicht. Die Kopenhagener Interpretation besagt nun: Solange niemand nachschaut, wie es um das Atom bestellt ist, befindet es sich in einem überlagerten Zustand; erst die Messung zwingt das Partikel gewissermaßen zu einer Entscheidung.

Die Vorstellung, dass der Akt des Experiments einen zuvor überlagerten Zustand von Möglichkeiten zur konkreten Wirklichkeit verkürzt, fand Erwin Schrödinger, der Vater der Wellenfunktion, geradezu absurd. Um seine halstarrigen Kollegen zur Einsicht zu bewegen, ersann er einen fiktiven Versuch, der das quantenmechanische System »radioaktives Atom« an ein makroskopisches System aus der Alltagswelt koppelt – ebenjene berühmte Katze. Durch eine »Höllmaschine«, so Schrödingers Formulierung, bestehend aus einem Geiger-Zählrohr, einem Hammer und einem »Kölbchen mit Blausäure«, das Ganze in einer von außen nicht einsehbaren Kiste installiert, verknüpfte er das Leben der Katze mit dem Zustand einer radioaktiven Substanz. Sobald ein Atom zerfällt, wird das Gift freigesetzt, und der Vierbeiner segnet das Zeitliche. Anders formuliert: Bis zum ersten Zerfall erfreut sich das Tier bester Gesundheit.

Schrödingers Katze gehorcht in dieser Anordnung der Wellenfunktion  $\Psi_{\text{Katze}} = c_{\text{lebendig}} \cdot \Psi_{\text{lebendig}} + c_{\text{tot}} \cdot \Psi_{\text{tot}}$ . Das Paradoxe daran: Solange niemand die Kiste öffnet und nachschaut, wie es mit dem Tier steht, ist es laut Kopenhagener Deutung sowohl lebendig als auch tot! Erst der Blick in die Kiste presst das System »Katze« unumkehrbar in einen der beiden Zustände. Und das, so Schrödingers Kritik, spottete ja wohl dem gesunden Menschenverstand. Die Kopenhagener Deutung könne folglich nicht zutreffen, auch nicht für die Mikrophysik.

Hatte Schrödinger Recht? Die meisten Physiker würden dies heute verneinen. Doch noch immer tüfteln sie an dem Problem, wie weit die seltsamen Gesetze der Quantenphysik auch in der Makrowelt gelten. Der 1961 verstorbene Nobelpreisträger würde sich wundern, wie pragmatisch seine Nachfolger dabei vorgehen. So prüfen sie aktuell verschiedene Erklärungen für den rätselhaften Kollaps der Wellenfunktion, und die Systeme, die sie dabei im Labor untersuchen, werden immer größer. Vielleicht ist es Schrödinger zu verdanken, dass gerade österreichische Forscher hierbei eine weltweite Vorreiterrolle einnehmen. Zwei der wichtigsten Vertreter, Markus Aspelmeyer und Markus Arndt von der Universität Wien, berichten ab S. 44 über den aktuellen Frontverlauf zwischen Mikro- und Makro-Quantenphysik.

Eine anregende Lektüre wünscht Ihr

Carsten Könneker

## AUTOREN IN DIESEM HEFT



Der PSA-Test kann helfen, ein Prostatakarzinom frühzeitig zu entdecken. Doch allzu oft führt er zu unnötigen Operationen mit erheblichem Nebenwirkungsrisiko, wie der Onkologe **Marc Garnick** auf S. 28 schreibt.



Die Neurologen **Fred H. Gage** (links) und **Alysson R. Muotri** sehen in springenden Genen, die noch im ausgewachsenen Gehirn Mutationen hervorrufen, einen Grund für die Anpassungsfähigkeit unseres Denkkorgans (S. 22).



Patchworkfamilie und Singlehaushalt – der Züricher Soziologe **Klaus Haberkern** fragt nach den Konsequenzen neuer Familienformen für die Betreuung von Kindern und Senioren (S. 68).

3 Editorial

6 Leserbrief/Impressum

8 Spektrogramm

Künstliches Perlmutter • Gewitter durchlöchern Ozonschicht • Frühe Menschen in Südostasien • Muttermilch hemmt Entzündungen • Das Weltall ist monoton • Frühes Insektenfossil gefunden

11 Bild des Monats

Türöffner für Krebszellen

12 Forschung aktuell

**Unerwartet energiereiche Gammablitze**

Der Pulsar im Krebsnebel sendet rätselhafte Signale.

**Vorgeburtlicher Gentest ohne Risiko**

Fötales Genom lässt sich aus Spuren im mütterlichen Blut sequenzieren.

**Prionen bei Pilzen**

Bei Hefen und Schlauchpilzen haben Prionproteine sinnvolle Funktionen.

SPRINGER'S EINWÜRFE

**Mit Higgs zum Mars?**

Großforschung unter Rechtfertigungsdruck

28



36



60



BIOLOGIE & MEDIZIN

▶ 22 Was jedes Gehirn einzigartig macht

*Fred H. Gage und Alysson R. Muotri*

Springende Gene erzeugen zufällige Mutationen in Hirnzellen und können so deren Funktion ändern.

▶ 28 Streit um die Prostatakrebs-Früherkennung

*Marc B. Garnick*

PSA-Screenings sollen Tumoren frühzeitig aufspüren. Doch sie führen laut Experten zu unnötigen Operationen.

36 Warum ist Luftanhalten so schwer?

*Michael J. Parkes*

Normalerweise hält man es nicht einmal eine Minute ohne Atemholen aus – aber nicht aus Sauerstoffmangel.

PHYSIK & ASTRONOMIE

SCHLICHTING!

56 Schielt der Mond?

*H. Joachim Schlichting*

Die Mondsichel weist stets exakt zur Sonne – sollte man meinen. Manchmal aber nicht! Was steckt dahinter?

INTERVIEW

60 Der LHC nach Higgs: Die Suche bleibt spannend

Jüngst wurde am weltgrößten Teilchenbeschleuniger ein neues Elementarteilchen gefunden. Über die Bedeutung des Funds und seine Folgen sprach »Spektrum« mit dem Teilchenphysiker Siegfried Bethke.

MENSCH & KULTUR

▶ 68 Vielfalt der Familie: Problem, Herausforderung, Chance

*Klaus Haberkern*

Neue Formen des Zusammenlebens stellen die bisherige Sozial- und Familienpolitik in Frage.



44

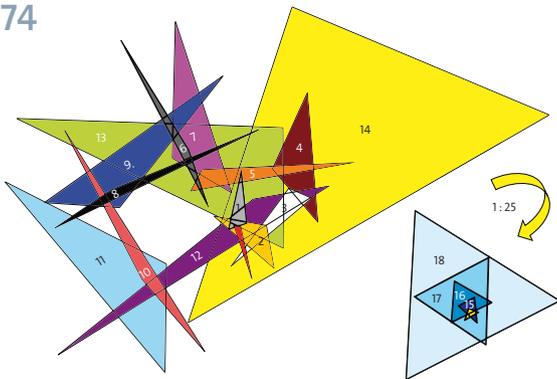
► TITELTHEMA

## Schrödingers Katze auf dem Prüfstand

Markus Aspelmeyer und Markus Arndt

Was geschieht mit den Paradoxien der Quantenphysik, wenn man immer ausgedehntere Objekte betrachtet? Neue Experimente mit Systemen großer Masse sollen jetzt helfen, dieses fundamentale Rätsel zu lösen.

74



MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

### 74 Dreiecksbeziehungen

Grégoire Nicollier

Aus einer schlichten Konstruktionsvorschrift wird ein chaotisches dynamisches System mit höchst überraschenden Eigenschaften.

ERDE & UMWELT

### 82 Ökosysteme erforschen

Robert M. Pringle

Die komplexe innere Dynamik von ökologischen Systemen ist am besten erkennbar, wenn sich einzelne ihrer Bestandteile verändern – durch Naturereignisse oder menschliche Eingriffe.

TECHNIK & COMPUTER

90



### ► 90 Neues aus der Supercomputer-Szene

Hans Günther Kruse

Wenn sich die Leistung der schnellsten Rechner wie geplant bis 2020 ver Hundertfachen soll, ist vor allem ihr Strombedarf zu senken. Dies und mehr war auf der Internationalen Supercomputer-Konferenz 2012 zu erfahren.

### 100 Rezensionen

M. Crichton und R. Preston: *Micro* • E. Balas: *Der Wille zur Freiheit* • F. zu Löwenstein: *Food Crash* • E. Weber: *Das kleine Buch der botanischen Wunder* • P. Wyse Jackson: *Paläontologie für Neugierige* • D. Röhrlich: *Urmeer* • G. L. Legendre: *Pasta und Design*

### 80 Wissenschaft im Rückblick

Vom Zwergsaurier zum Hochgeschwindigkeitszug

### 106 Vorschau

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



Projektionen der Einheitswürfel mit den Dimensionen 3 bis 12 in den gewöhnlichen dreidimensionalen Raum.

## Hyperkugeln – eine unendliche Geschichte

*Bryan Hayes erläuterte, dass eine Hyperkugel mit zunehmender Dimension einen immer kleineren Teil des sie eng umschließenden Würfels einnimmt. («Ein Abenteuer in n Dimensionen», August 2012, S. 52)*

**Gerrit Schmitz-Veltin, Bad Dürkheim:** Das Lesen des Artikels bereitet großes Vergnügen. Brian Hayes vermittelt sein eigenes Staunen über das Verschwinden einer Kugel in vielen Dimensionen an seine Leser. Ein zusätzliches Staunen

hat bei mir folgender Befund ausgelöst: Nimmt man nicht die »Einheitskugel« mit Radius  $r=1$  (Maximum des Volumens bei  $n=5$  Dimensionen), dann müssen die Volumina mit  $r^n$  multipliziert werden. Der grundsätzliche Verlauf – erst Anstieg, dann Anschmiegen an die Dimensionsachse mit Volumen null – bleibt erhalten. Aber selbst bei nur geringfügig anderen Radien liegen die Maxima bei anderen Dimensionen. Zum Beispiel für  $r=0,9$  bei  $n=4$ , für  $r=1,1$  bei  $n=7$ , für  $r=1,2$  bei  $n=8$ . Es wäre interessant zu erfahren, wie das vorstellungsmäßig zu verstehen ist.

**Antwort der Redaktion:** Da gibt es leider nichts zu verstehen. Bei der Wahl  $r=0,5$  verschwindet das Maximum sogar komplett (genauer: Es rückt über den linken Rand des Diagramms hinaus). Also läuft die Frage »Warum gerade bei  $n=5$ ?« auf die Frage nach der Wahl der »natürlichen« Volumeneinheit hinaus – und versinkt damit in den Sümpfen der Willkür. Handfest bleibt der Befund, dass das Verhältnis von Kugel- zu Würfelvolumen mit zunehmender Dimension verschwindend klein wird, und zwar für beliebige Werte von Radius der Kugel und Kantenlänge des Würfels – wenn man nur diese beiden Werte konstant hält.

**Eugen Bauhof, Nürnberg:** Dass das Volumen der  $n$ -dimensionalen Einheitskugel für  $n \rightarrow \infty$  gegen 0 strebt, hat uns der Autor des Artikels mitgeteilt. Daraus folgt, dass auch der Begrenzungsraum (die »Oberfläche«) der  $n$ -dimensionalen Einheitskugel gegen 0 strebt, wenn man die Anzahl der Dimensionen über alle Grenzen wachsen lässt.

Vor etwa zehn Jahren beschäftigte ich mich auch mit diesem Thema und kam zu ähnlichen Betrachtungen wie der Autor. Darüber hinaus addierte ich alle Begrenzungsräume der Einheitskugeln für alle geradzahigen  $n = 2, 4, 6, 8, \dots, \infty$ . Der Begrenzungsraum der Einheitskugel strebt für  $n \rightarrow \infty$  gegen 0. Für die unendliche Summe der Begrenzungsräume aller Einheitskugeln ergibt sich der Wert  $2\pi e^\pi$ . Das ist vermutlich auch nur eine Zahlenspielerei. Für die ungeradzahigen Dimensionen ist mir die Addition nicht gelungen. Vielleicht gelingt das einem der Leser.

**Oswin Aichholzer, Graz:** Hier kurz eine ergänzende Bemerkung zum Verhältnis Kugel zu Würfel. Was »passt« besser: die (Hyper-)Kugel in den (Hyper-)Würfel oder der (Hyper-)Würfel in die (Hyper-)Kugel? In der Ebene nimmt, wie im Artikel erwähnt, ein maximaler Kreis in einem Quadrat ungefähr 78,5 Prozent der

**Spektrum**  
DER WISSENSCHAFT

**Chefredakteur:** Dr. Carsten Könneker (v.i.S.d.P.)  
**Redaktionsleiter:** Dr. Hartwig Hanser (Monatshefte), Dr. Gerhard Trageser (Sonderhefte)  
**Redaktion:** Thilo Körkel, Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online-Koordinator), Dr. Frank Schubert, Dr. Adelheid Stahnke, Antje Findeklea (Bild des Monats); E-Mail: redaktion@spektrum.com  
**Ständiger Mitarbeiter:** Dr. Michael Springer  
**Editor-at-Large:** Dr. Reinhard Breuer  
**Art Direction:** Karsten Kramarczik  
**Layout:** Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Anke Heinzlmann, 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  
**Einzelverkauf:** Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744  
**Übersetzer:** An diesem Heft wirkten mit: Dr. Markus Fischer, Dr. Uschi Loos, Dr. Ilse Tüttler.

### Leser- und Bestellservice:

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

### Vertrieb und Abonnementverwaltung:

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn  
**Bezugspreise:** Einzelheft € 7,90 (D/A) / € 8,50 (L)/Sfr. 14,-; 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: Marienne Dölz; Anzeigenleitung: Patrick Priesmann, Tel. 0211 887-2315, Fax 0211 887-97-2315; verantwortl. Postfach 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.



Fläche des Quadrats ein. Ein maximales Quadrat in einem Kreis hingegen füllt nur etwa 63,7 Prozent der Fläche des Kreises aus. Ähnlich die Situation in 3-D, auch hier passt die Kugel mit 52,3 Prozent des Würfelvolumens besser als der Würfel mit nur 36,8 Prozent des Kugelvolumens. Das gilt bis zur Dimension 8. Ab dem 9-dimensionalen Raum verhält es sich plötzlich umgekehrt: Nun passt der Hyperwürfel besser in die Hyperkugel. Der Wechsel findet hier bei der gebrochenen Dimension 8,13... statt und zeigt damit ein ähnlich merkwürdiges Verhalten wie das Kugelvolumen selbst.

## Ethische Normen nicht allgemein gültig ableitbar

*Ludwig Siep diskutierte das Verbot der Patentierung embryonaler Stammzellen durch den Europäischen Gerichtshof. (»Patente auf Leben – ein umstrittenes Thema«, August 2012, S. 28)*

**Walter Weiss, Kassel:** Der Autor stellt in erfreulich nüchterner Weise die rechtliche Problematik dar. Ich möchte zusammenfassen (und ein wenig ergänzen):

- (1) Ein Gesetz, das diesen Komplex regeln soll, kann weder aus der Naturwissenschaft hergeleitet werden noch aus – gar nicht existierenden – »naturrechtlichen« Regeln noch auch aus religiösen Überzeugungen. Es muss in unseren westlichen Demokratien als Recht normativ gesetzt werden; die beteiligten Bürger müssen sich also, um es salopp zu sagen, mit allen möglichen persönlichen Argumenten zusammenraufen.
- (2) Dabei sollte nicht vergessen werden, dass die Religionen auch nichts anderes als menschliche Erfindungen und Vereinbarungen sind.
- (3) Wenn der Autor als vermeintlich mehr oder weniger objektiven Maßstab die Menschenwürde nennt, ist auch diese nichts anderes als eine – sehr wertvolle – menschliche Erfindung.
- (4) Also: Ein Gesetz, das regelt, welche menschlichen Zellen ab wann und in welchem Zustand/Zusammenhang rechtlich geschützt werden sollen, kann nur durch das erwähnte »Zusammenraufen« gefunden werden. So ist das ja

auch nach langen Geburtswehen mit der Regelung des Schwangerschaftsabbruchs praktiziert worden.

(5) Gerade diese Regelung des Schwangerschaftsabbruchs liefert aber noch ein zusätzliches Argument (das der Autor nur ganz nebenbei erwähnt) und eine zusätzliche Schranke: Ein Gesetz, das die menschlichen Zellen in dem erwähnten Umfang schützen soll, darf natürlich nicht hinter bereits installierte und mit sehr viel Mühe gefundene Regelungen reichen, darf diese also nicht etwa torpedieren – was in den politischen Debatten ständig versucht wird, woraus der Anschein entsteht, fundamental eingestellte Gläubige wollten auf diese Weise die mühsam – im Interesse der Menschenwürde! – gefundenen bereits vorliegende Regelungen wieder aufheben.

### Antwort des Autors Prof. Ludwig Siep:

Im Allgemeinen bin ich mit Herrn Weiss einverstanden. Allerdings spielen bei den normativen Setzungen vor allem auch die rechtlichen Traditionen und Lernprozesse eine Rolle. Sie spiegeln oft tief greifende kollektive Erfahrungen wider (etwa mit den Totalitarismen des 20. Jahrhunderts). Wenn Normen gemeinschaftlich beschlossen werden, heißt das nicht, dass sie bloße Kompromisse von Meinungen und Interessen sind. Falls es sich um Errungenschaften wie die Grundrechte oder auch die Überzeugungs- und Forschungsfreiheit handelt, kann man sie durchaus als irreversibel bezeichnen.

## Errata

*»Lithium-Luft-Akku besteht Praxistest«, Spektrum, September 2012, S. 9*

Das Lösungsmittel für den neuartigen Lithium-Luft-Akku enthält statt Lithiumchlorat das beständigere Lithiumperchlorat.

*»Ein Abenteuer in n Dimensionen«, August 2012, S. 52*

Auf S. 57, Ende des vorletzten Absatzes, muss es heißen: »Das Volumen der  $n$ -Kugel ist gleich  $2\pi r^2/n$  [nicht  $2\pi r^{2/n}$ ] mal dem Volumen der  $(n-2)$ -Kugel.« Friedrich Tarczynski aus Gaweinstal

FOLGEN SIE UNS  
IM INTERNET



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



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



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



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

(Österreich) hat uns auf den Fehler aufmerksam gemacht.

*»Das ikosidodekaedrische Prismatohexakosihekonikosachoron«, Juni 2012, S. 60*

In der Bildunterschrift zum Bild auf S. 62 oben sind bei den beiden letzten der fünf abgebildeten Körper die Namen verwechselt worden. 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 hat den Fehler bemerkt.

*»Graphen aus dem Chemielabor«, August 2012, S. 82*

Die Cyclodehydrierung von Hexaphenylbenzol erfolgt durch Entzug von Elektronen an einer Anode und nicht, wie es im Artikel heißt, durch Zufuhr von Elektronen an einer Kathode.

## BRIEFE AN DIE REDAKTION

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

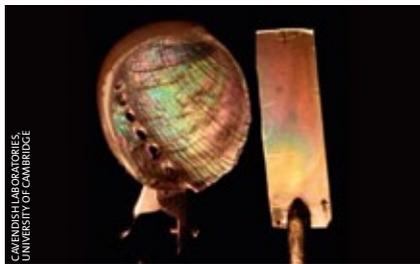
Spektrum der Wissenschaft  
Leserbriefe / Sigrid Spies  
Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg  
E-Mail: [leserbriefe@spektrum.com](mailto:leserbriefe@spektrum.com)

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

## CHEMIE

## Glanz aus dem Labor

Perlmutter ist ein schillerndes Biomineral, das Weichtiere (Mollusken) auf der Innenseite ihrer Schalen bilden. Zu finden ist es etwa in den Gehäusen von Perlmuscheln und Krebelschnecken. Da es hart, aber zugleich elastisch ist, verhindert es die Ausbreitung von Rissen in der Schale. Über Jahrhunderte hinweg schmückten Menschen sich und ihre Alltagsgegenstände mit dem irisierenden Material; die Polynesier zahlten gar damit. Einer Forschergruppe um Ullrich Steiner von der University of Cambridge ist es jetzt



gelingen, einen ganz ähnlich aufgebauten Stoff künstlich herzustellen.

Natürliches Perlmutter besteht aus Kalziumkarbonat und organischer Materie – hauptsächlich Chitin und vermutlich Kollagen. Diese bildet eine Art Netzwerk, eine Matrix. Darin eingebettet liegen mikrometergroße Plättchen aus Kalziumkarbonat. In der Summe entsteht ein Verbundmaterial, das stoß- und bruchfest ist und dank seiner geschuppten Oberfläche das Licht in allen Regenbogenfarben zurückwirft.

Um diese Struktur nachzuahmen, erzeugten die Forscher einen porösen Kunststoffilm auf einem Objektträger. Diesen tauchten sie unter Kohlendi-

Das künstliche Perlmutter (rechts) schillert so prächtig wie das natürliche (links) und hat auch sonst ähnliche Eigenschaften.

oxidatmosphäre in eine Lösung, die Kalziumionen enthielt. Dort entstand auf dem Film eine glasartige (amorphe) Schicht aus Kalziumkarbonat, die in feuchtem Milieu zu dem Mineral Kalzit kristallisierte. Indem die Wissenschaftler diesen Zyklus mehrfach wiederholten, erhielten sie eine Schichtstruktur aus 400 Nanometer dicken Kalzitplättchen und 30 Nanometer starken Kunststoffschichten.

Das künstliche Perlmutter hat ähnliche mechanische Eigenschaften wie das Original aus der Natur und schillert auch genauso. Die Forscher schreiben, dass der Herstellungsprozess keine hohen Temperaturen erfordere, relativ wenig Zeit beanspruche und sich für die Fertigung harter Oberflächenbeschichtungen aus billigen Ausgangsmaterialien eigne.

*Nature Communications 3, Artikelnummer 966, 2012*

## METEOROLOGIE

## Gewitter durchlöchern Ozonschicht

Große Gewitterwolken enthalten bis zu mehrere Millionen Tonnen Wasser. Ein Team um James Anderson von der Harvard University hat nun gezeigt, dass sie den Dampf bis in 20 Kilometer Höhe transportieren können – und damit bis in die Ozonschicht hinein. Dabei stützen sich die Wissenschaftler auf Messungen an sommerlichen Gewittern über den USA, die in den zurückliegenden Jahren mit NASA-Forschungsflugzeugen durchgeführt wurden.

Den Forschern zufolge beschleunigt der Wasserdampf den Abbau der Ozonschicht; denn er fördert die Umwandlung von dreiatomigem Ozon in zweiatomigen Luftsauerstoff unter Beteiligung von Chlor- und Bromverbindungen. Typischerweise enthält die ungestörte Stratosphäre etwa 5 ppm (»parts per million«, millionstel Teile)

Wasser. Durch Wasserdampfkonvektion in Gewitterwolken könne dieser Wert auf das Drei- bis Vierfache ansteigen, schreiben Anderson und sein Team. Bei derart hohem Wassergehalt setze der Ozonabbau auch in gemäßigten Breiten ein. Infolgedessen gehe die stratosphärische Ozonkonzentration nach einem Gewitter teils um mehr als 20 Prozent zurück.

So entstehen lokale Ozonlöcher, die wohl bis zu 100 Kilometer Durchmesser erreichen. Weil sie vermehrt solare UV-Strahlung durchlassen, steigt am Boden das Risiko von Hautkrebs. Die Forscher warnen davor, dass sich lokale Ozonlöcher infolge des Klimawandels künftig häufiger bilden werden, solange der Chlor- und Bromgehalt in der Atmosphäre nicht wieder auf vorindustrielles Niveau abgesunken ist. Denn die steigenden Temperaturen



Gewitterwolken können sich zu bedrohlichen Ungetümen auftürmen. Ihr Einfluss reicht bis in die Stratosphäre hinauf.

sorgen für zunehmende Verdunstung und mehr Dampf in der Atmosphäre. Steigt die erhitzte, feuchte Luft bei Gewittern auf, kondensiert das Wasser unter Wärmeabgabe. Das verstärkt den Aufwärtssog und befördert zusätzlich Dampf in die Stratosphäre.

*Science 337, S. 835–839, 2012*

## Moderner Mensch kam schon früh nach Südostasien

Vor drei Jahren waren Archäologen in der Höhle Tam Pa Ling in Laos bereits auf Bruchstücke eines menschlichen Schädels gestoßen. Nun haben Forscher um Fabrice Demeter von der Universität Paul Sabatier in Toulouse (Frankreich) nachgewiesen, dass die Knochen, die sie auf rund 63 000 Jahre datierten, von einem modernen *Homo sapiens* stammen. Die Altersbestimmung erfolgte mit der Uran-Thorium-Methode am gut erhaltenen Stirnbein.

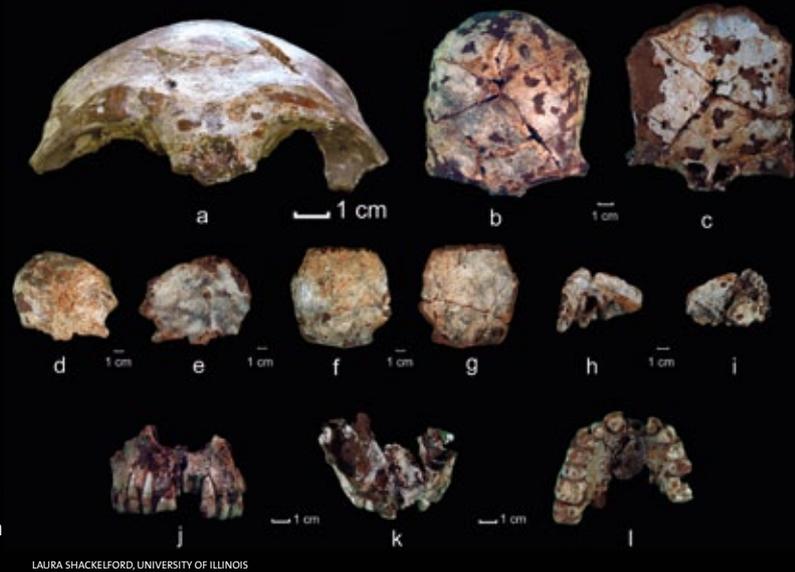
Zusätzlich zum Schädel selbst datierten die Forscher auch die umgebenden Bodenschichten mit Hilfe von Isotopen- und Lumineszenzanalysen. Dabei kamen sie auf ein Alter zwischen 46 000 und 51 000 Jahren. Die Wissenschaftler vermuten, dass der Schädel ursprünglich vor dem Höhleneingang lag und erst später ins Innere gespült wurde.

Die Knochenstücke wären somit die ältesten Fossilien eines eindeutig modernen *Homo sapiens* in Südostasien.

**Obwohl schon zehntausende Jahre alt, zeigen die Schädelstücke aus der Tam-Pa-Ling-Höhle eindeutig Merkmale von anatomisch modernen Menschen; so haben sie keinen Überaugenwulst.**

Sie würden bestätigen, worauf genetische Analysen schon länger hindeuten: dass nämlich die ersten anatomisch modernen Menschen schon vor mehr als 60 000 Jahren nach Südostasien einwanderten.

*PNAS 10.1073/pnas.1208104109, 2012*



LAURA SHACKELFORD, UNIVERSITY OF ILLINOIS

## Muttermilch hemmt Entzündungen

Immunzellen in der Muttermilch dämpfen Entzündungsreaktionen bei den Säuglingen. Das haben Yihong Wan von der University of Texas und ihre Kollegen herausgefunden. Eine entscheidende Rolle spielt hierbei das Rezeptorprotein VLDLR, wie die Forscher in Experimenten mit Mäusen feststellten.

Wurden Mäusejunge von Weibchen gesäugt, die kein funktionierendes Rezeptorprotein herstellen konnten, dann enthielt ihr Blut eine bis zu vierfach erhöhte Menge an entzündungsfördernden Substanzen. Einer dieser Stoffe, der »plättchenaktivierende Faktor« (PAT), wird von dem Enzym PAFAH abgebaut. Neugeborene Mäuse können das Enzym noch nicht

selbst produzieren und bekommen es über die Muttermilch – in Form von mütterlichen Immunzellen, die PAFAH herstellen. Ohne funktionierende VLDLR-Proteine produzieren diese Abwehrzellen in der Milch das Enzym



FOTOLIA / ANDREAS KOCH

**Muttermilch ist nahrhaft und fördert die Abwehrkräfte. Zudem dämpft sie Entzündungsreaktionen im Körper der Babys, zumindest bei Mäusen.**

jedoch nicht. Die damit gesäugten Mäusejungen wogen weniger als ihre Altersgenossen, litten unter Blutarmut und Haarausfall.

Wan und ihr Team vermuten, dass aktivierte VLDLR-Proteine über mehrere Zwischenschritte die Produktion des Enzyms PAFAH ankurbeln. Dies würde erklären, warum Mäuseweibchen mit defektem VLDLR-Gen kein PAFAH an ihre Jungen weitergeben können. Da sich Mutationen in diesem Gen bei Nagetieren und Menschen vielfach ähnlich auswirken, glauben die Forscher, dass ihre Befunde zumindest teilweise auf den Menschen übertragbar sind.

*Nature Communications 3, Artikelnummer 1008, 2012*

KOSMOLOGIE

# Monotones Weltall

Das Universum ist in großem Maßstab betrachtet glatt und strukturlos. Zu diesem Ergebnis kommen Astronomen um Morag Scrimgeour von der University of Western Australia in Perth. Sie bestätigen damit, dass die gängigen Theorien der Kosmologie in dieser Hinsicht von korrekten Voraussetzungen ausgehen.

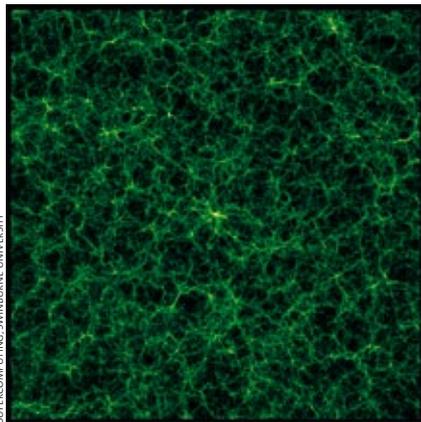
Die Forscher untersuchten die großräumige Verteilung von Galaxien. Dabei stützten sie sich auf Daten des WiggleZ-Surveys, einer spektroskopischen Himmelsdurchmusterung, bei der etwa 240 000 Galaxien vermessen worden waren. Das Ergebnis der Analyse: Auf Größenskalen oberhalb von etwa 350 Millionen Lichtjahren ist die Materie annähernd gleich verteilt. Das stimmt mit den Annahmen überein, auf denen das Standardmodell der Kosmologie beruht. Ihnen zufolge ist das Universum im Großen und Ganzen homogen und isotrop, also überall und in jeder Richtung gleich beschaffen.

Für kleinere Maßstäbe gilt das offenkundig nicht: Lokale Materieverdichtungen bringen Galaxien, Sterne

und Planeten hervor, die Galaxien schließen sich zu Haufen zusammen und diese wiederum zu Superhaufen. Die Superhaufen sind aber die größten erkennbaren Strukturen im All; noch größere scheint es nicht zu geben.

Damit widersprechen die Forscher theoretischen Ansätzen, wonach das Universum eine fraktale Materieverteilung aufweist, also die selbstähnliche Fortsetzung von Strukturen auf immer größeren Längenskalen. Träfe dies zu, so hätte das große Auswirkungen auf die Kosmologie – zum Beispiel müsste man die beschleunigte Ausdehnung des Universums dann mit anderen Modellen erklären.

*Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 425, S. 116–134, 2012*



GREG POOLE CENTRE FOR ASTROPHYSICS AND SUPERCOMPUTING, SWINBURNE UNIVERSITY

Das Universum in großem Maßstab: Ausschnitt aus einer Simulation.



MEHR WISSEN BEI  
Spektrum.de



Aktuelle Spektrogramme finden Sie täglich unter

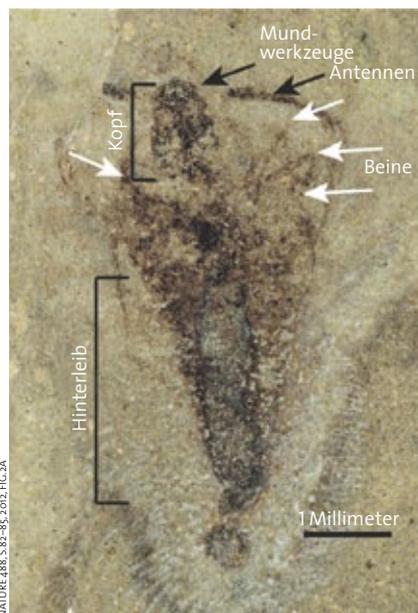
[www.spektrum.de/spektrogramm](http://www.spektrum.de/spektrogramm)

BIOLOGIE

# Frühes Fossil beleuchtet die Evolution der Insekten

In einem belgischen Steinbruch haben Wissenschaftler möglicherweise das bislang älteste geflügelte Insekt gefunden. Wie die Forscher um Romain Garrouste vom Muséum National d'Histoire Naturelle in Paris vermuten, entspricht das wenige Millimeter lange Fossil von *Strudiella devonica* dem Nymphenstadium eines fliegenden Kerbtiers, das vor rund 370 Millionen Jahren lebte. Der Fund fällt mitten in die »Hexapoden-Lücke«, einen Zeitraum ohne nennenswerte Insektenfossilien, in dem sich wahrscheinlich die Tierwelt der Karbonwälder entwickelte. Die Entdeckung stellt Hypothesen einer verzögerten Insekten-evolution in Frage und deutet darauf hin, dass entsprechende Tierreste schlicht noch nicht gefunden wurden.

Die frühesten – noch flügellosen – Kerbtiere sind im Devon nachweisbar



Fossil des mutmaßlichen Fluginsekts *Strudiella devonica*. Sogar die Beine sind zu erkennen, wenn auch undeutlich.

(416 bis 360 Millionen Jahre vor heute). Daran schließt sich ein Zeitraum von 60 Millionen Jahren an, in dem fast keine Insektenfossilien vorkommen. Erst nach dieser Lücke, in etwa 325 Millionen Jahre alten Gesteinen aus dem Karbon, tauchen plötzlich Überbleibsel von geflügelten Sechsheinern in enormer Vielfalt auf.

Wie es zu diesem Formenreichtum gekommen war und von welchen Vorfahren die Insekten im Karbon abstammten, beantwortet auch der neue Fund nicht. Allerdings lässt er die Hexapoden-Lücke in neuem Licht erscheinen. Die Vermutung, ein niedriger Sauerstoffanteil in der Atmosphäre habe die Entwicklung geflügelter Insekten bis ins Karbon hinein gebremst, erscheint nun zweifelhaft.

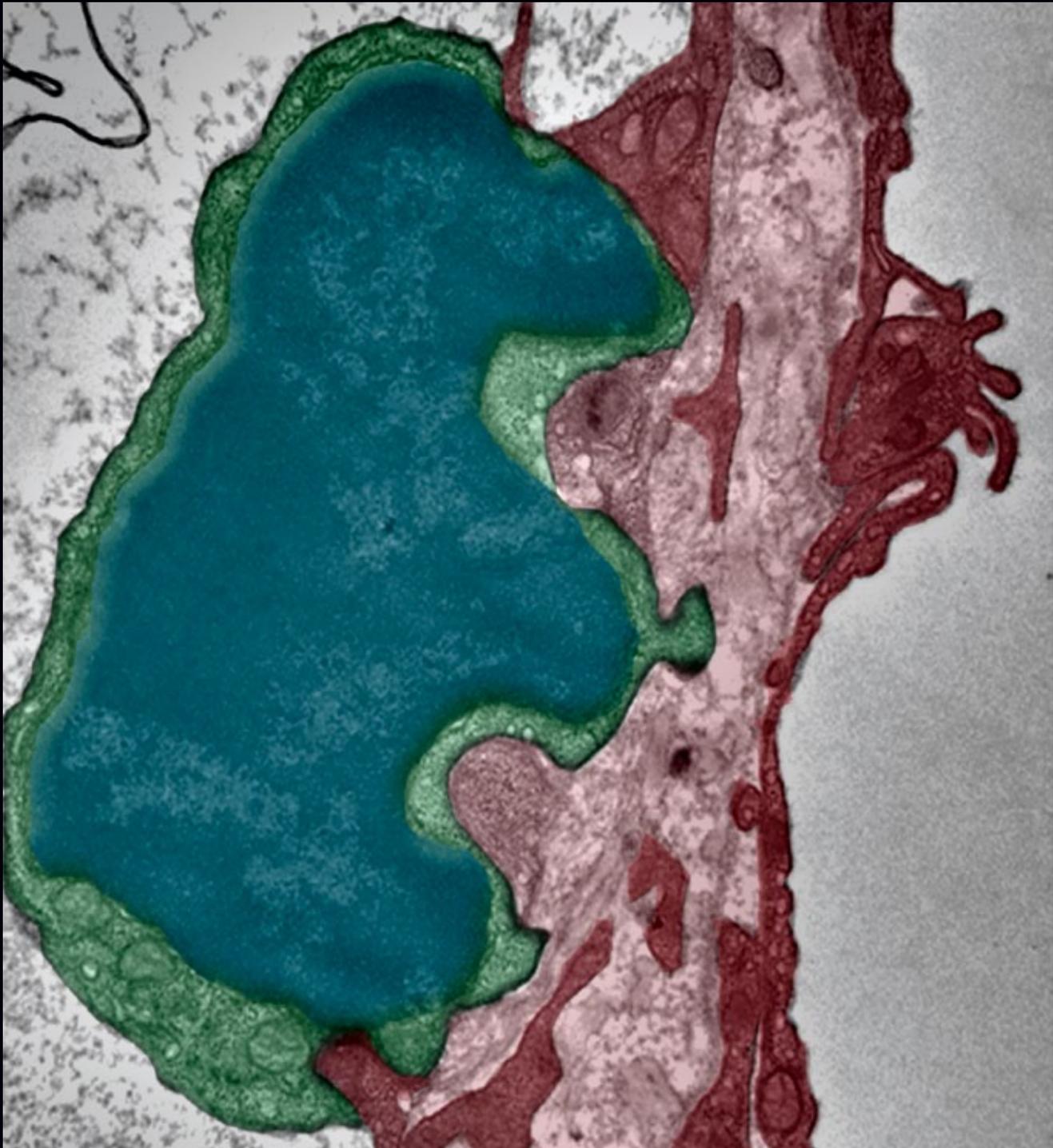
*Nature 448, S. 82–85, 2012*

## TÜRÖFFNER FÜR KREBSZELLEN

Die überwiegende Mehrheit der Krebskranken stirbt nicht am Primärtumor, sondern an den Folgen von Tochtergeschwülsten (Metastasen). Diese entstehen, wenn in der Blutbahn kursierende entartete Zellen in andere Organe eindringen. Schweizer Forscher konnten nun nachweisen, dass ihnen dabei ein Pfortner auf der Innenwand (dem Endothel) der Blutgefäße hilft. Dieser Rezeptor wird von einem tumoreigenen Botenstoff aktiviert und

schleust, wie auf dieser nachträglich eingefärbten elektronenmikroskopischen Aufnahme zu sehen ist, eine Krebszelle (blaugrün) zwischen den Endothelzellen einer Blutkapillare (rostrot) hindurch, indem er deren Zusammenhalt lockert. Seine Aufgabe im gesunden Körper ist noch unbekannt, wahrscheinlich beeinflusst er bei Immunreaktionen die Durchlässigkeit der Blutgefäße.

*Cancer Cell 22, S. 91–105, 2012*



# Unerwartet energiereiche Gammablitz aus dem Krebsnebel

Der Krebsnebel ist der meistuntersuchte Überrest einer Supernova, doch im Gammalicht betrachtet bietet er noch überraschende Erkenntnisse. Als Forscher den rotierenden Neutronenstern im Zentrum des Nebels, einen Pulsar, ins Visier nahmen, stellten sie fest, dass gängige Modelle der Teilchenbeschleunigung durch Pulsare auf den Prüfstand gehören.

VON RAZMIK MIRZOYAN

Der Pulsar im Herzen des Krebsnebels, ein extrem kompakter Neutronenstern, misst nur wenige Kilometer und dreht sich 30-mal pro Sekunde um die eigene Achse. Sein Magnetfeld ist eine Billion Mal stärker als das der Erde, seine Dichte entspricht der eines Atomkerns. Neben energieärmerer elektromagnetischer Strahlung sendet er ununterbrochen geladene Teilchen aus, hauptsächlich Elektronen und Positronen, die im extrem starken Magnetfeld des Himmelskörpers auf hohe Energien beschleunigt werden.

Im Prinzip sind die sich anschließenden Vorgänge gut bekannt. Weil beschleunigte Ladungsträger stets elektromagnetische Wellen emittieren, entsteht Strahlung hoher Energie. Der Stern sendet diese so genannte Gammastrahlung, in Lichtkegeln gebündelt, entlang seiner Magnetfeldachse in beide Richtungen aus. Da diese aber nicht mit der Drehachse übereinstimmt, rotieren die beiden Kegel durch das All. Ist der Himmelskörper zufällig so im Raum orientiert, dass einer der Kegel dabei die Erde überstreicht, registrieren Beobachter ein periodisches Aufleuchten.

Nun allerdings müssen die Theoretiker nacharbeiten. Denn wie neue Daten aus dem Krebsnebel zeigen (*Astronomy & Astrophysics* 540, A69, 2012), können sie die Entstehung der Gammastrahlung mit ihren Modellen noch nicht besonders gut erklären.

Der Krebsnebel ist der Überrest eines in 6300 Lichtjahren Entfernung explodierten Sterns, einer Supernova, und das meistuntersuchte Objekt seiner Art. Es

gibt nur wenige andere, die sich näher an der Erde befinden. Dass er jetzt doch überraschend Neues zu bieten hat, ist der Entwicklung leistungsfähiger Tscherenkow-Teleskope zu verdanken. Sie vermessen den Himmel im Gammalicht, der energiereichsten elektromagnetischen Strahlung überhaupt. Instrumente wie MAGIC auf der Kanareninsel La Palma, VERITAS im US-Bundesstaat Arizona oder H.E.S.S. in Namibia haben das noch junge Forschungsfeld der Gammastrahlungsastronomie in den letzten Jahren enorm vorangetrieben. Mit ihrer Hilfe beobachten Forscher weltweit, darunter unsere Arbeitsgruppe am Max-Planck-Institut für Physik in München, mittlerweile auch den Krebsnebel bei höchsten Energien. Im Verlauf unserer Messungen, die einen Bereich von bis zu einigen hundert Gigaelektronvolt (GeV) abdecken, haben wir allerdings viel energiereichere Gammastrahlung gefunden, als der Pulsar gängigen Modellen zufolge aussenden sollte. Bisherige Vorstellungen davon, wie die kompakten Objekte geladene Teilchen beschleunigen, sind dadurch in Frage gestellt.

Mit einem Spiegeldurchmesser von jeweils 17 Metern zählen die beiden MAGIC-Teleskope (Major Atmospheric Gamma Imaging Cherenkov) zu den größten Messinstrumenten für kosmische Gammastrahlung auf der Welt. MAGIC-I wurde 2002 bis 2004 gebaut, zu seinem Betrieb haben sich mehr als 150 Forscher aus Deutschland, Italien, Spanien, der Schweiz, Polen, Finnland, Bulgarien und Armenien zusammenschlossen; mittlerweile sind auch kroatische und japanische Wissenschaftler

hingekommen. Sein Standort auf La Palma ist das Observatorio Roque de Los Muchachos in 2200 Meter Höhe über dem Meeresspiegel.

Das zweite MAGIC-Teleskop errichteten wir 2009. Abgesehen von Verbesserungen wie größeren Spiegelementen und empfindlicheren Photovervielfachern in der Kamera ist es ein Klon von MAGIC-I. Die 85 Meter voneinander entfernten Instrumente arbeiten im Koinzidenz- oder Stereomodus, beobachten also gleichzeitig dasselbe Objekt. Im Energiebereich von 25 bis 200 Gigaelektronvolt besitzt das Teleskoppaar die höchste Empfindlichkeit aller Gammateleskope weltweit.

## Todesstoß für die gängige Theorie durch neue Pulsardaten

Während einer 22-stündigen Beobachtung des Krebsnebelpulsars im Jahr 2008 maß unser Münchner MAGIC-I-Team zum ersten Mal eindeutig ein pulsierendes Gammasignal mit einer Energie von mehr als 25 Gigaelektronvolt. Diese Entdeckung veröffentlichten wir im November 2008 in der Fachzeitschrift »Science«. Sie schloss die gängigste Theorie für die Emissionen des Krebspulsars aus: das Polarcap-Modell. Es besagt unter anderem, dass die Gammastrahlung maximal 20 bis 30 Kilometer über der Oberfläche des Pulsars entsteht – doch dann dürfte sie nur bis etwa 6 GeV messbar sein. Unsere Daten zeigten jedoch ein Energiespektrum, das sogar bis etwa 60 GeV und darüber hinaus reicht.

Anfangs mit einem, später mit beiden Teleskopen setzten wir die Beobach-

tungen fort. Takayuki Saito, einer unserer Doktoranden, analysierte Daten, die MAGIC-I zwischen 2009 und 2010 aufgenommen hatte. In seiner Dissertation berichtete er anschließend, dass das Spektrum sogar bis 100 GeV reicht und noch darüber hinausgeht. Seine Untersuchung stieß auf große Resonanz in Astronomenkreisen – ganz offenbar war das letzte Wort in Sachen Krebsnebel pulsar noch nicht gesprochen.

Unabhängig davon wertete Gianluca Giavitto Stereodaten von MAGIC aus und bestätigte Saitos Resultate. Giavitto ist Doktorand am IFAE (Institut de Física d'Altes Energies), dem Institut für Hochenergiephysik an der Universität Barcelona. Gemeinsam mit Stefan Klepser, der ebenfalls am IFAE arbeitet, fand er später sogar ein noch stärkeres Signal, erstaunlicherweise bei einer abermals höheren Energie. Unser Team beschloss daher, die verwendeten Ana-

lyseverfahren noch zu verfeinern. So würden wir das pulsierende Gamma-signal des Pulsars, das etwa 100-mal schwächer ist als die kontinuierliche Gammastrahlung aus dem Nebel, auch noch bei höheren Energien erkennen.

Doch bevor wir die Ergebnisse veröffentlichten konnten, erlebten wir eine Überraschung – die Konkurrenz war uns zuvorgekommen! Im Mai 2011 berichtete Nepomuk Otte auf einer Konferenz in Rom von Krebspulsarmessungen von 120 bis etwa 250 GeV. Er hatte sie mit VERITAS durchgeführt, dem aus vier Teleskopen bestehenden Very Energetic Radiation Imaging Telescope Array System in Arizona. Vor drei Jahren war Otte dorthin gewechselt, nachdem er in unserer Münchner Arbeitsgruppe seine Promotion abgeschlossen hatte.

Aber auch wir hatten ein starkes Signal entdeckt, das sogar bis 400 GeV reichte. Dabei stießen wir zudem auf

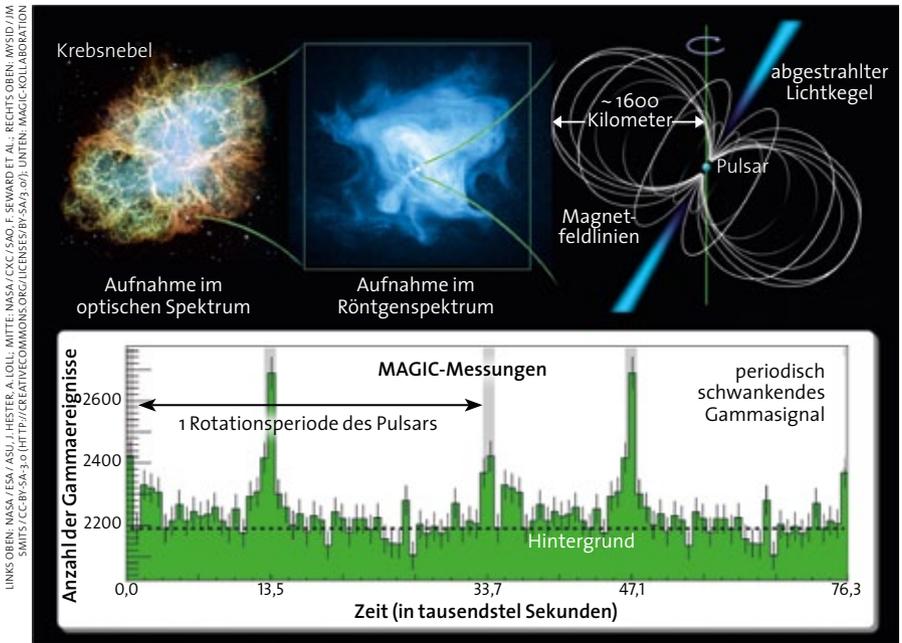
ein sehr interessantes Detail. Beim Krebspulsar messen Astronomen stets eine Art Doppelpuls – offenbar besitzt der Pulsarstrahl eine Substruktur. Die beiden Aufleuchtphasen sind im Energiebereich um 25 GeV etwa gleich stark. Wir haben jedoch herausgefunden, dass bei einigen hundert GeV der zweite Impuls den ersten sehr deutlich dominiert. Noch haben wir für dieses Phänomen keine zufrieden stellende Erklärung, doch kann es uns sicher weitere Erkenntnisse über die Physik des Pulsars liefern.

Die Messung von Gammastrahlung so hoher Energie ist nicht einfach. Wenn Gammaphotonen – oder auch geladene kosmische Partikel – in die Erdatmosphäre eindringen, lösen sie Schauer sekundärer Elementarteilchen aus, hauptsächlich Elektronen und Positronen. Diese bewegen sich schneller durch die Luft als Licht und lassen dadurch das charakteristische bläuliche Tscherenkowlicht entstehen, das für milliardstel Sekunden aufleuchtet. Wegen ihrer kurzen Dauer bleiben die Lichtblitze für das menschliche Auge

**Mit ihren jeweils 17 Meter messenden Hauptspiegeln gehören die beiden MAGIC-Teleskope auf der kanarischen Insel La Palma zu den größten Luftschauer-Tscherenkow-Teleskopen weltweit. Sie arbeiten im Stereomodus, peilen also stets dasselbe Objekt an.**



ROBERT WAGNER, MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR PHYSIK, MÜNCHEN



Der Krebsnebel (optische Aufnahme links) ist der bestuntersuchte Überrest einer Supernova. In seinem Zentrum rotiert ein Neutronenstern, ein so genannter Pulsar, 30-mal pro Sekunde um sich selbst. Neben einem »Wind« geladener Teilchen (Mitte, im Röntgenlicht gesehen) emittiert er in Richtung seines Magnetfelds auch elektromagnetische Strahlung. Sie wird in Form zweier Lichtkegel abgestrahlt, die ebenfalls durch das All rotieren (rechts). Einer der Kegel überstreicht dabei regelmäßig die Erde, so dass Astronomen ein periodisch schwankendes Signal messen. MAGIC registriert die Gammastrahlungsanteile dieser Pulse (Diagramm).

zwar unsichtbar. MAGIC aber kann das Licht mit seiner großen Spiegelfläche sammeln und, ähnlich wie das Objektiv eines Fotoapparats, die Form der Teilchenschauer auf eine Kamera in der Fokalebene projizieren.

**Teleskope registrieren selbst einzelne Photonen**

Diese Kamera muss extrem kurze Belichtungszeiten erlauben und benötigt folglich eine sehr hohe Lichtempfindlichkeit. Denn ein typisches Gammaquant mit einer Energie von 50 Giga-elektronvolt, das auf die Atmosphäre trifft, lässt – auf die Erdoberfläche projiziert – gerade einmal fünf Tscherenkow-Photonen pro Quadratmeter entstehen. Zum Vergleich: Selbst wenn sich ein menschliches Auge stundenlang an die Dunkelheit gewöhnt hat, benötigt es eine Dichte von mindestens 200000 Photonen pro Quadratmeter, um ein Signal gerade eben noch wahrzunehmen.

Auch spezielle Bildverarbeitungssoftware ist nötig. Denn auf 5000 Schauer, die durch geladene Teilchen ausgelöst wurden, kommt typischerweise nur ein einziger, der von einem Gammaphoton herrührt. Die Algorithmen müssen diese seltenen Fälle anhand der Form der Tscherenkowblitze identifizieren.

Die jüngsten Daten verlangen nach neuen Theorien. Diese müssen erklä-

ren, wie ein Pulsar Teilchen auf so hohe Energien beschleunigt, dass sie die beobachtete Gammastrahlung aussenden. Ideen gibt es bereits. Kouichi Hirotani von der Academia Sinica des taiwanesischen Institute of Astronomy and Astrophysics hält die hochenergetischen Gammastrahlen für das Resultat eines Streuprozesses.

Gestreut werden dabei nicht die direkt vom Pulsar ausgehenden Elektronen und Positronen, sondern ihre Abkömmlinge der zweiten und dritten Generation. Diese entstehen in bis zu 1500 Kilometer Höhe über der Oberfläche des Sterns durch die so genannte Paarbildung, bei der energiereiche Gammaquanten in Wechselwirkung mit Röntgenstrahlung oder extrem starken Magnetfeldern treten. Anschließend interagieren die Teilchen mit Photonen. Dabei kommt es zum inversen Comptoneffekt: Weil die Partikel so viel Energie besitzen, geben sie einen Teil davon an die Photonen ab und verwandeln sie in energiereiche Gammaquanten.

Einen anderen Vorschlag machen Felix Aharonian vom Institute for Advanced Studies in Dublin und seine Koautoren Sergey Bogovalov und Dmitry Khangulyan. Demnach entstehen die Gammaphotonen möglicherweise, wenn beschleunigte Teilchen aus der Pulsarwindregion, 100-mal weiter ent-

fernt als Hirotanis Modell dies annimmt, an Röntgenstrahlung gestreut werden, die aus der Magnetosphäre des Pulsars stammt.

Ob diese Theorien zutreffen, können letztlich nur weitere Messungen entscheiden. Hin zu höheren Energien – Aharonian und seine Kollegen sagen beispielsweise ein Maximum von 500 GeV voraus – wird die Analyse aber zunehmend schwieriger. Denn das pulsierende Signal verliert an Intensität, während sich die kontinuierliche Hintergrundstrahlung verstärkt.

Interessant wäre auch ein Vergleich mit anderen Pulsaren. Doch diese sind in der Regel weiter entfernt als der Krebsnebel. Um auch ihre Gammesignale messen zu können, braucht man neben einwandfrei funktionierenden und hochempfindlichen Großteleskopen daher viel Beobachtungszeit, Geduld – und vielleicht auch ein bisschen Glück. MAGIC jedenfalls ist in Bestform, seit Herbst 2012 arbeitet es sogar mit einer noch lichtstärkeren Kamera. Wir sind daher zuversichtlich, bald mit neuen Entdeckungen und Überraschungen aufwarten zu können.

**Razmik Mirzoyan** ist promovierter Physiker und stellvertretender Sprecher der internationalen MAGIC-Kollaboration sowie MAGIC-Projektleiter am Max-Planck-Institut für Physik.

# Vorgeburtlicher Gentest ohne Risiko

Gleich zwei Forscherteams ist es gelungen, das Genom ungeborener Kinder mit Hilfe von Fragmenten fötaler DNA im mütterlichen Blut zu sequenzieren. Dadurch lassen sich Anlagen für genetisch bedingte Krankheiten künftig nachweisen, ohne Mutter oder Kind zu gefährden.

VON MAREN EMMERICH

Wenn werdende Eltern herausfinden wollen, ob ihr Kind von einer Chromosomenstörung oder einer genetisch bedingten Stoffwechselerkrankung betroffen ist, haben sie bisher die Wahl zwischen zwei Untersuchungsmethoden. Bei der Chorionzottenbiopsie entnimmt der Arzt Bestandteile der Plazenta, um so an fötale Zellen zu gelangen. Diese lassen sich alternativ auch aus dem Fruchtwasser gewinnen, was bei der Amniozentese geschieht. Hierfür muss zunächst die Fruchtblase mit einer Nadel angestochen werden.

Dabei handelt es sich um invasive Methoden, welche die Wahrscheinlichkeit einer Fehlgeburt erhöhen. Deshalb greifen Mediziner nur bei Risikoschwangerschaften darauf zurück, etwa wenn Ultraschallbilder auf Fehlbildungen hinweisen. Eine Ausnahme bildet die Trisomie 21 (Downsyndrom), bei der Chromosom 21 drei- statt zweifach vorhanden ist. Hierauf lässt sich das Genom eines Fötus bereits mit einem nichtinvasiven Test untersuchen, der in Deutschland Ende August dieses Jahres auf den Markt kam und für den die Schwangere nur einige Milliliter Blut abgeben muss. Künftig könnten ähnliche Tests noch weitaus mehr über genetisch bedingte Krankheiten ungeborener Kinder verraten. Mittlerweile haben Forscher nämlich einen Weg gefunden, das komplette Genom eines Fötus aus den DNA-Fragmenten zu sequenzieren, die er im Blut der Mutter hinterlässt.

Im Plasma, also dem nicht zellulären Anteil des Bluts, schwimmen begrenzte Mengen an DNA frei herum. Bei Schwangeren stammen durchschnitt-

lich 13 Prozent davon vom Fötus. Um diese diagnostisch nutzen zu können, hatten Wissenschaftler eine wesentliche Hürde zu überwinden: Sie mussten einen Weg finden, zuverlässig zu unterscheiden, welche Erbgutstückchen von der Mutter und welche von ihrem Kind stammen. Wenn es um große, zusammenhängende DNA-Fragmente geht, ist dies noch verhältnismäßig einfach: Besitzt das Ungeborene beispielsweise eine Kopie von Chromosom 21 zu viel, dann ist dieses auch im mütterlichen Plasma im Verhältnis zu allen anderen Chromosomen überrepräsentiert – was der neue Trisomietest zur Diagnose nutzt. Um jedoch Mutationen innerhalb einzelner fötaler Gene aufzuspüren, mussten sich die Forscher ausgefeiltere Strategien ausdenken,

Jacob Kitzman und Kollegen von der University of Washington in Seattle zogen zusätzlich die aus Speichel gewonnene DNA des Vaters heran (*Science Translational Medicine* 137, 137ra76, 2012). Von der Frau, die in der 19. Woche schwanger war, nahmen sie eine Blutprobe. Aus den darin enthaltenen Zellen isolierten sie Erbmateriale, das allein von ihr selbst stammte. Im Plasma dagegen befand sich zusätzlich DNA des Fötus.

Mit Hilfe dieser Proben sequenzieren die Forscher sowohl das Genom beider Eltern als auch die DNA im Blutplasma der Frau. Genvarianten, die hier selten, bei Mutter und Vater aber überhaupt nicht vorkamen, konnten die Wissenschaftler dem Fötus zuschreiben. Auf diese Weise identifizierten sie 39 Punktmutationen, also Veränderungen einzelner Nukleotidbausteine, in

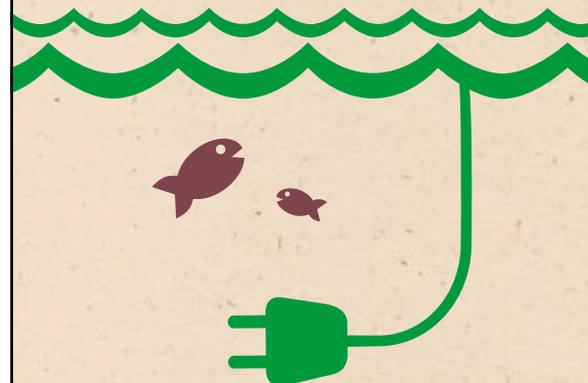


Natur  
Energie  
Plus

## 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!



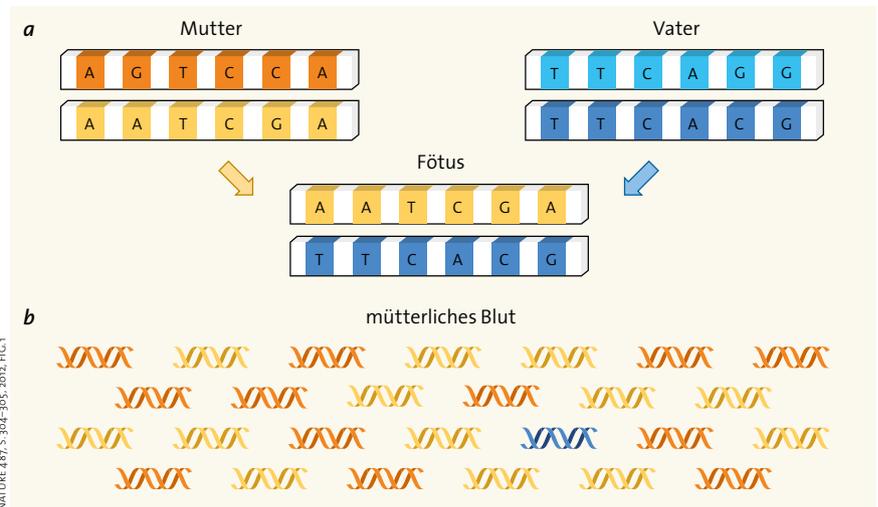
dessen DNA. Als sie das Erbgut des Kindes nach seiner Geburt zur Kontrolle erneut analysierten, kamen sie auf 44 Mutationen. Insgesamt erwiesen sich die Ergebnisse der ersten Sequenzierung zu 98,1 Prozent als korrekt.

Das zeigt, dass sich Defekte im fötalen Erbgut mit einem DNA-Test prinzipiell ähnlich zuverlässig vorhersagen lassen wie durch invasive Untersuchungsmethoden. Dass dies auch schon in einem früheren Stadium der Schwangerschaft funktioniert, wiesen die Forscher nach, indem sie das Experiment mit einer zweiten Familie wiederholten, in der sich die Frau in der 9. Woche befand.

**Ohne den Vater geht es auch**

Noch eleganter ging eine Gruppe um Steven Quake von der Stanford University (Kalifornien) vor. Die Wissenschaftler sequenzierten das Genom zweier Föten, ohne dafür DNA-Proben von deren Vätern zu verwenden (*Nature* 320, S. 320, 2012). Ihr Trick: Sie schauten, wie häufig die einzelnen Versionen jedes Genomabschnitts – die so genannten Haplotypen – im Blutplasma der Mutter vorlagen. Da der Mensch über einen doppelten Chromosomensatz verfügt, hat er auch zwei Haplotypen von jedem Stückchen DNA. Beide sind selbstverständlich im Blut der Frau vorhanden. Einen von ihnen hat aber auch ihr Kind geerbt, weshalb er etwas häufiger vorkommen sollte als der andere. Der zweite Haplotyp des Fötus stammt dagegen von seinem Vater. Mit der DNA des Ungeborenen gelangen hiervon ebenfalls geringe Mengen in den Blutkreislauf der Frau, wo sie den dritten Haplotyp bilden, der allerdings nur in relativ geringer Konzentration vorliegt.

Die Forscher sequenzierten alle Genomabschnitte aus dem Blut von zwei Schwangeren durchschnittlich 52,7-mal. Diese Redundanz erlaubte es ihnen festzustellen, welcher der drei Haplotypen dort am seltensten und welcher am häufigsten vorkam. Hieraus konnten die Forscher die genetische Ausstattung der Kinder ableiten. In einem Fall litt die werdende Mutter unter dem DiGeorge-Syndrom – eine der beiden Kopien ihres



Von jedem Genomabschnitt hat ein Fötus je eine Version von Mutter und Vater. Da etwa 13 Prozent der freien DNA im Blut einer Schwangeren vom Kind stammen, zirkulieren dort drei verschiedene solcher Haplotypen. Der, den die Mutter an ihr Kind weitergegeben hat, ist am stärksten vertreten (gelb). Am zweithäufigsten sind Genvarianten, die im mütterlichen Erbgut, nicht aber in dem des Fötus vorkommen (orange). Der dritte und seltenste Haplotyp besteht aus den Genomabschnitten, die das Kind vom Vater geerbt hat (dunkelblau). Diese Häufigkeitsunterschiede haben Forscher ausgenutzt, um fötale DNA im Blut der Mutter zu identifizieren und zu sequenzieren.

22. Chromosoms enthielt weniger Gene als normal. Mit Hilfe des DNA-Tests, den die Forscher in allen drei Schwangerschaftstrimestern wiederholten, konnten sie nachweisen, dass die Frau die verkürzte Version des Chromosoms an ihr Kind weitergegeben hatte.

Eine derart exzessive Genomanalyse erforderte den Einsatz modernster Sequenzierverfahren. Nur dadurch blieben Zeitaufwand und Kosten in einem vertretbaren Rahmen. Dennoch wäre es viel zu teuer, mit den geschilderten Methoden reihenweise fötale Genome auf jede einzelne Mutation hin zu testen. Quake und sein Team prüften die Möglichkeit, an Stelle des gesamten Genoms nur jene zwei Prozent zu sequenzieren, die Bauanleitungen für Proteine enthalten. Wie sich herausstellte, reicht auch eine Sequenzierung dieses relativ kleinen Anteils aus, um die vom Fötus stammenden Genvarianten auszumachen und zu analysieren.

Von solchen Machbarkeitsstudien bis zu praktisch einsetzbaren Bluttests auf die verschiedensten Erbkrankheiten bei Ungeborenen scheint der Weg also nicht mehr allzu weit. Natürlich wer-

den sich Wissenschaft, Politik und Gesellschaft dann auch mit den ethischen Fragen auseinandersetzen müssen, die derlei Möglichkeiten aufwerfen. Bei dem neuen Trisomietest ist die Diskussion bereits voll im Gange (*Kommentar auf www.spektrum.de vom 11. 07. 2012*).

Jenseits jeglicher ethischen Problematik brächte eine routinemäßige Sequenzierung der DNA Ungeborener aber auch einige klare Vorteile: So könnte man Krankheiten, die ein Fötus ohne Behandlung nicht oder nur schwer überlebt, künftig schon vom ersten oder zweiten Trimester einer Schwangerschaft an im Mutterleib therapieren. Auch Stoffwechselstörungen wie zum Beispiel verschiedene Nahrungsmittelunverträglichkeiten, bei denen Gegenmaßnahmen schon unmittelbar nach der Geburt hilfreich sind, ließen sich von Anfang an effektiv behandeln. Und durch Chorionzottenbiopsie oder Amniozentese verursachte Fehlgeburten würden endgültig der Vergangenheit angehören.

**Dr. Maren Emmerich** ist Biologin und Wissenschaftsautorin in Heidelberg und München.

# Prionen bei Pilzen

Prionen erlangten Berühmtheit als Krankheitserreger bei Wirbeltieren, die nach Änderung ihrer Form das Gehirn zerstören. Aber auch bei Pilzen kommen solche umgestalteten Proteine vor – und zwar offenbar vielfältig und mit hilfreichen Aufgaben.

VON JOHANNES SANDER

Jedes Protein in einer Zelle besitzt eine spezifische räumliche Struktur, die seine normale Funktion bedingt. Doch einige – so genannte Prionproteine oder Prionen – können sich in eine ungewöhnliche Form falten, in der sie ihre ursprüngliche Bedeutung verlieren.

Diese tendieren dazu, sich zu stäbchen- oder plaqueförmigen Aggregaten und Filamenten (Amyloiden) zusammenzulagern. Anfangs entstehen die anomal gefalteten Proteine wohl meist einfach durch Zufall. Doch das Besondere an ihnen ist: Die Prionenstruktur wirkt auf andere gleiche Proteine ansteckend, so dass diese auch die anomale Form annehmen. Hat also der Prozess einmal begonnen, setzt er sich kaskadenartig fort.

Entdeckt und bekannt wurden Prionen im Zusammenhang mit neurodegenerativen Erkrankungen wie der Rinderseuche BSE oder dem Creutzfeldt-Jakob-Syndrom bei Menschen. Hierbei tragen die auffälligen Moleküle offensichtlich zur Zerstörung von Hirngewebe bei. Ob sie auch an der Alzheimerdemenz beteiligt sind, wie neuere Tierstudien andeuten, ist noch strittig.

Weniger bekannt ist, dass derart umgeformte und sich zu Amyloiden zusammenlagernde Proteine auch bei Pilzen auftreten. Tatsächlich fanden Forscher in den letzten Jahren Prionen unter anderem bei Hefen und Schlauchpilzen. Verblüffenderweise scheinen diese dem betreffenden Organismus oft gar nicht zu schaden – im Gegenteil.

Manche von ihnen sorgen zum Beispiel dafür, dass nur Myzelien verwandter Pilzstämme fusionieren können und in einem nichtsexuellen Prozess genetisches Material miteinander austauschen. Andere fördern sogar evolutionäre Anpassungen, indem sie unter harten Bedingungen die Durchsetzung von genetischen Mutationen erleichtern.

## Waffe gegen Fremdheit

Viele Pilze bilden in ihrem Substrat ein ausgedehntes Myzel, ein Geflecht aus Zellfäden. Manchmal fusionieren die Myzelien zweier Organismen zu so genannten Heterokaryen. Dann enthalten die dem neuen Myzel entspringenden Zellen zwei oder mehr Zellkerne, die sich genetisch unterscheiden. Aller-

ANZEIGE

EMBL



European Molecular Biology Laboratory

## Career Opportunities

- PhD Students
- Postdocs
- Independent scientists



[www.embl.org/jobs](http://www.embl.org/jobs)



dings gelangen bei solch einer Fusion unter Umständen auch Viren, die einen von den Ursprungsorganismen befallen hatten, mit in das neue Myzel. Aber zahlreiche Pilze verstehen sich gegen die Infektionsgefahr zu wehren. Sie verfügen über Mechanismen, dank derer nur Myzelfusionen bestimmter Pilzstämme möglich sind.

Eine derartige Waffe stellt das HET-s-System dar (die Abkürzung steht für Heterokaryon), das am besten bei dem Schlauchpilz *Podospora anserina* un-

tersucht ist (*Proceedings of the National Academy of Sciences USA 109, S. 10432, 2012*). Hier können nur Stämme miteinander fusionieren, die HET-s-Proteine bilden. Es handelt sich dabei um regelrechte Prionproteine: Sie können in eine anomale Form umschlagen (siehe Bild S. 21) und sich dann zu Filamenten zusammenlagern, die dem Pilz allerdings nicht schaden. Nun erzeugen manche Pilzmyzelien aber die Variante HET-S, bei der keine Prionenfilamente entstehen. Kommen Myzelien eines

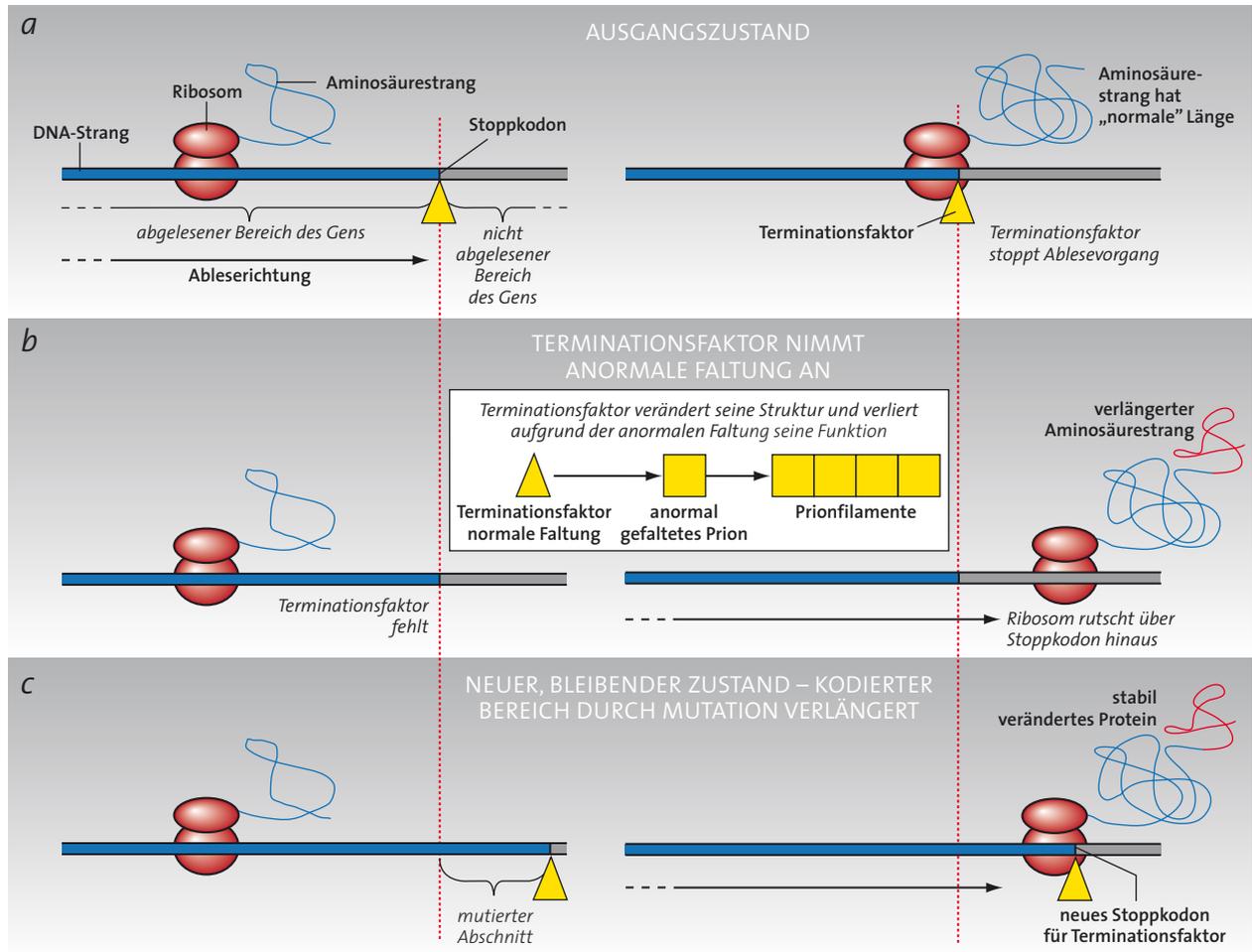
HET-s- und eines HET-S-Stamms zusammen, verhindert das nicht nur die Filamentbildung, sondern die Fusionsstelle stirbt sogar ab. Deswegen fusionieren nur ähnliche, in der Regel wohl verwandte Stämme miteinander, so dass Umweltressourcen, die einer der Organismen erschließt, im gemeinsamen Myzel beiden zugutekommen.

Ein weiteres Pilz-Prion, das seinem Besitzer nützt, ist der Translations-Terminationsfaktor Sup35. Dieses Protein weisen Hefen der Gattung *Saccharomy-*

## Evolutionsschub für Pilze

Normalerweise hält ein als **Terminationsfaktor** bezeichnetes Protein den Ablesvorgang am Gen an einem Stoppkodon an (a). Schlägt seine Struktur jedoch in die anomale Form des Prions um, so geht diese Funktion verloren: Der Eiweißfaden wird länger (b). Manchmal besitzt das verlängerte Protein günstige

Eigenschaften, denn der bisher nicht abgelesene Bereich des Gens konnte unbehelligt Mutationen anhäufen. Mutiert nun das Stoppkodon in eine Anweisung für eine Aminosäure, so bleibt das neue Protein erhalten – auch nachdem das Prion wieder zur Struktur des Terminationsfaktors zurückgekehrt ist (c).



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / BUSKE-GRAFIK

# DAS ENTSCHEIDENDE IN EINER APP!



**NEU:  
DIE FOCUS  
MAGAZIN APP**  
**GRATIS FÜR  
ABONNENTEN**



Jetzt den digitalen FOCUS kaufen oder als Abonnent des FOCUS Magazins gratis downloaden.

Exklusive Inhalte, spektakuläre Bilder, hoher Nutzwert: Erleben Sie Deutschlands großes Nachrichtenmagazin neu auf dem Tablet – bequem und schnell schon sonntags ab 8 Uhr. Einfach QR-Code scannen oder direkt auf [www.focus.de/magazin/digital](http://www.focus.de/magazin/digital)



Das Entscheidende im

**FOCUS**

## Mit Higgs zum Mars?

### Großforschung unter Rechtfertigungsdruck

**D**er Sommer bescherte den Naturforschern zwei spektakuläre Erfolge auf ganz unterschiedlichen Gebieten. In der Elementarteilchenphysik wurde – »mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit« – das Higgs-Boson nachgewiesen, und der Marssonde Curiosity gelang eine Bilderbuchlandung auf dem Roten Planeten.

Meine Freunde, die mich als wissenschaftsaffin kennen, konfrontierten mich entsprechend häufig mit der Frage, was das Higgs eigentlich sei und warum seine Entdeckung die Physiker so begeistere. Nachdem ich wie üblich die Higgs-Teilchen mit rabiaten Fans bei einer Filmpremiere verglichen hatte, durch die sich die Stars – andere Elementarteilchen – mühsam einen Weg bahnen müssen und so Masse gewinnen, kam sofort die nächste Frage: Und wozu braucht man das? – Ähm ...

Auch das Kunststück, ein Gerät von der Größe eines Kleinwagens sanft auf dem Mars abzusetzen, provozierte den Einwand, die dafür verbrauchten Dollarmilliarden dienten doch nur dazu, mit einem sündteuren Modellauto auf einer staubtrockenen Steinwüste umherzukurven. Sollte man mit dem Geld nicht besser dringende Probleme auf der Erde lösen?

Derlei Fragen und Einwände brachten mich in Erklärungsnot. Ich stotterte etwas von wissenschaftlicher Neugier als Wert an sich und versuchte den Large Hadron Collider mit mittelalterlichen Kathedralen zu vergleichen, deren Bau doch auch dokumentiere, dass der Mensch über sich hinausstrebe. Aber meine Gesprächspartner blieben dabei: Angesichts der herrschenden Wirtschaftskrise seien gigantische Teilchenschleudern und kostspielige Marsflüge ein fragwürdiger Luxus.

Erst als ich mich auf die Möglichkeit berief, dass sogar aus der anwendungsfürtesten Grundlagenforschung eines Tages nützliche Alltagsgeräte hervorgehen können, gaben sich die Kritiker achselzuckend halbwegs zufrieden. Vielleicht, so spekulierte einer, werde aus dem Higgs-Boson bald ein Antrieb für billige Marsraketen hervorgehen – und das Gespräch endete in allgemeinem Gelächter.

Doch das Problem, wie teure Grundlagenforschung angesichts knapper Kassen zu rechtfertigen ist, lässt sich nicht so einfach beiseiteschieben. Es gibt ein abschreckendes Beispiel, was geschehen kann, wenn der schnöde Mammon störend ins Spiel kommt: In den USA wurde 1993 der Bau des Superconducting Super Collider (SSC) abgebrochen, obwohl bereits für zwei Milliarden Dollar ein gewaltiger Tunnel gegraben worden war. Darum versucht die Weltraumbehörde NASA derzeit zweifelt, ihre teuren Missionen – auch die zum Mars – in der Öffentlichkeit mit dem populären Interesse an außerirdischem Leben zu rechtfertigen.

Das ist ein hochriskantes Spiel. Denn die junge Astrobiologie kämpft mit dem Verdacht, sie sei nur aus der Taufe gehoben worden, um für die Weltraumforschung Stimmung zu machen (*siehe auch Nature 488, S. 160, 2012*). Vorschnell glaubten Experten 1996, in einem Marsmeteoriten Lebensspuren entdeckt zu haben. Die haben sich unterdessen ebenso als Schimäre erwiesen wie eine exotische DNA auf Arsenbasis, die auf alternative Lebensformen hingewiesen hätte.

Wer die Erforschung des Weltraums allzu einseitig mit der Hoffnung auf die baldige Entdeckung außerirdischen Lebens rechtfertigt, riskiert Enttäuschungen und infolgedessen erst recht Budgetkürzungen. Besser bleibt es – wie bei der Jagd nach fundamentalen Teilchen – beim ehrlichen Bekenntnis zur Neugier, die ja auch der neuen Marssonde ihren Namen lieh. Als jüngsten Beleg für diese zutiefst menschliche Eigenschaft überraschte mich soeben meine elfjährige Enkelin vor dem Einschlafen mit ihrem größten Reisewunsch: Sie würde zu gern einmal auf dem Jupitermond Europa stehen.



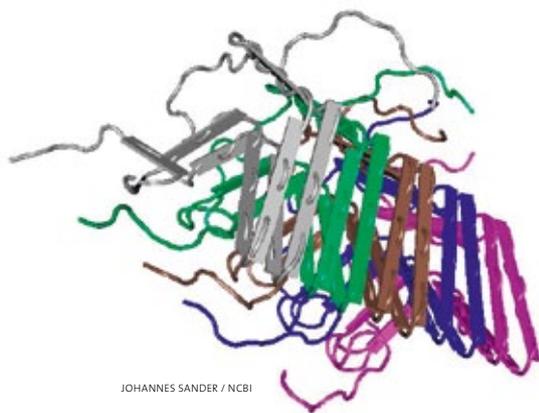
Michael Springer

ces auf, darunter die Bäckerhefe. Ein normal gefaltetes Sup35-Protein stoppt die Translation der Erbinformation in Proteine – also das Übersetzen der Nukleotidsequenzen der Boten-RNA in eine Abfolge von Aminosäuren – an der jeweils richtigen Stelle: nämlich dort, wo der Strang aus Nukleotiden ein so genanntes Nonsense- oder Stoppkodon aufweist (siehe Kasten S. 18, a).

Leiden Hefezellen unter Stress, steigt die Wahrscheinlichkeit, dass Sup35 in die Prionform umschlägt (Kasten S. 18, b). Weil ihnen dieser Terminationsfaktor nun fehlt, stellen sie übermäßig lange Aminosäuresequenzen her – und damit unter Umständen Proteine mit anderen Eigenschaften. Oft dürfte das nachteilig sein, kann aber manchmal auch einen Vorteil bedeuten – zumal unter schwierigen Umweltverhältnissen, die neue Anpassungen herausfordern. Überdies ist der Abschnitt hinter einem Stoppkodon oft genetisch deutlich variabler als der davor – weil dieser Bereich normalerweise wenig Selektionsdruck erfährt, wohingegen der Abschnitt davor stets die Proteinfunktion zu gewährleisten hat. Mutationen hinter dem Stoppkodon werden deswegen selten wieder ausgemerzt.

Einige der unter Stress gebildeten verlängerten Proteine könnten den Hefen helfen, die neue schwierige Situation besser zu meistern. Und nicht nur das: Die Pilze gewinnen auch Zeit, bis vielleicht Mutationen ein Stoppkodon in ein kodierendes Element für eine Aminosäure verwandeln. Dann wird eine zunächst unter Sonderbedingungen nur »probeweise« aufgetretene Merkmalsänderung genetisch fixiert (Kasten S. 18, c). Das erinnert an Lamarcks Theorie von der Vererbung erworbener Eigenschaften: Zuerst wird etwas Neues ausprobiert und im Erfolgsfall dann fest im Erbgut verankert.

Bemerkenswerterweise verbleibt umgewandeltes Sup35 nicht unbedingt in der Prionform. Wenn zum Beispiel die schwierige Umweltsituation aufhört, kann es sich in den funktionalen Terminationsfaktor zurückverwandeln. Dann stellt sich für den betreffenden Hefestamm weit gehend wieder der



JOHANNES SANDER / NCBI

Die Domänen für die Amyloidfaltung von fünf Het-s-Proteinen bilden miteinander ein kurzes Filamentstück.

Ausgangszustand ein – abgesehen von Genen mit zwischenzeitlich mutiertem Stoppkodon. Und weil die Umwandlung von Sup35 in die Prionform nur in einem Teil der Population erfolgt, bleibt der Stamm insgesamt vielseitig genug für andere neue Herausforderungen.

Seit Forscher Phänomene wie diese entdeckten, rätseln sie, ob sie damit häufigen und wesentlichen Erscheinungen in der Natur auf der Spur sind oder ob es sich um seltene Randereignisse handelt, vielleicht sogar nur um Laboreffekte an gezüchteten Pilzkulturen. Das hat nun ein Team um Randal Halfmann und Susan Lindquist vom Whitehead Institute in Cambridge (Massachusetts) untersucht (*Nature* 482, S. 363, 2012). Sie prüften fast 700 verschiedene Wildstämme der Hefegattung *Saccharomyces* auf Prionen und deren Bedeutung. Diese Hefen stammten aus ganz unterschiedlichen Lebensräumen, zum Beispiel von Früchten, etwa diversen Weintraubensorten, oder aus Bodenproben verschiedenster geografischer Herkunft; einige waren aber auch kommerziell genutzte Stämme.

Wie die Forscher herausfanden, sind aus dem Labor bekannte Hefepriionen wie Sup 35 bei den Wildstämmen weit verbreitet und helfen ihnen tatsächlich in vielfältiger Weise, zu überleben sowie sich an neue, schwierige Umweltbedingungen auch genetisch rasch anzupassen. Zugleich entdeckte das Team rund zwei Dutzend weitere neue Prion-

proteine von ähnlicher Bedeutung. Die Wissenschaftler machten sich zu Nutze, dass sich die meisten dieser Prionen nur in Anwesenheit eines bestimmten Hitzeschockproteins dauerhaft erhalten, das die Zellen bei Stress herstellen. Dieses Protein konnten sie mit Hilfe einer Chemikalie ausschalten. Prompt verloren die Hefezellen ihre vielseitige Anpassungsfähigkeit an neue Umwelten. Mit der Möglichkeit, Prionen zu bilden, wuchs dagegen die genetische Vielfalt, und sogar in ihrer natürlichen ökologischen Nische hatten die Stämme einen Wachstumsvorteil.

Die Durchschlagskraft dieses bisher übersehenen Evolutionsmechanismus erstaunt: Etwa 40 Prozent der mit Prionenhilfe aufgetretenen neuen Eigenschaften waren für die Hefezellen vorteilhaft. Bei klassischen genetischen Mutationen ist die Erfolgsrate sehr viel geringer. Halfmann und Lindquist vermuten deswegen, dass es sich um ein seit Langem bewährtes, von Selektionskräften optimiertes Anpassungssystem handelt.

Ob die neuen Erkenntnisse auch Einsichten zu menschlichen Prionenerkrankungen bringen werden, lässt sich zurzeit noch schwer abschätzen. Immerhin fanden sich bereits Hinweise, dass Amyloide wohl auch zum Speichern von Peptidhormonen dienen können. Und wahrscheinlich tritt ein Prion nicht nur in der einen anormalen Proteinform auf, sondern in vielerlei Stämmen und Subtypen von jeweils etwas anderer Raumstruktur. Die einzelnen Versionen scheinen unterschiedlich infektiös und toxisch zu sein – was vielleicht den oftmals sehr verzögerten Ausbruch einer Erkrankung bedingen könnte. Womöglich sind manche Formen ungefährlich oder sogar wünschenswert.

Bisher wurden Prionen allerdings nur bei Wirbeltieren und Pilzen gefunden. Jetzt gilt es herauszufinden, ob sie auch noch bei anderen Organismengruppen vorkommen.

**Dr. Johannes Sander** ist Biologe mit Schwerpunkt Botanik, Molekular- und Mikrobiologie. Er arbeitet als Wissenschaftsautor in Halver.



rororo

Dr. med. ECKART von HIRSCHHAUSEN

# Lachen über Niveau



5 Mio. Leser könnten irren – lesen Sie selbst

€ 14,99 (D)/€ 15,50 (A)/sFr. 21,90 (UVP)

«Die Liebe: ein Thema, so unerschöpflich wie ein Teller Brühe – für jemanden, der nur eine Gabel hat.»

Dr. med. Eckart von Hirschhausen

# Was jedes Gehirn einzigartig macht

Warum entwickeln eineiige Zwillinge trotz identischen Erbguts unterschiedliche Persönlichkeiten? Neben Umwelteinflüssen sind dafür springende Gene verantwortlich. Sie fügen sich zufällig irgendwo in den DNA-Strang ein und beeinflussen so die Arbeitsweise der Nervenzellen im Gehirn.

Von Fred H. Gage und Alysson R. Muotri

Unser Gehirn enthält rund 100 Milliarden Nervenzellen, die Netzwerke mit einigen hundert Billionen Verknüpfungen bilden. Dieses neuronale Verschaltungsmuster variiert von Mensch zu Mensch, was zu Unterschieden im Denken, Lernen und Verhalten sowie in der Anfälligkeit für psychiatrische Erkrankungen führt.

Warum gleicht kein Gehirn dem anderen? Eine Rolle spielt zweifellos der spezielle Genmix, den wir von unseren Eltern geerbt haben. Doch auch eineiige Zwillinge unterscheiden sich merklich in ihren geistigen Leistungen und Verhaltensweisen. Ebenso weichen genetisch identische Zuchtmäuse in Lernfähigkeit, Ängstlichkeit und Anfälligkeit für Stress voneinander ab. Wieso?

Einen Teil der Erklärung liefern die im Lauf des Lebens gesammelten Erfahrungen. Sie können beispielsweise die Beständigkeit der Verbindungen zwischen einzelnen Neuronengruppen beeinflussen. Doch gibt es inzwischen deutliche

Hinweise auf weitere Faktoren. Dazu gehören Prozesse, die früh in der Embryonalentwicklung oder später im Leben Mutationen verursachen oder die Aktivität der Gene verändern.

Einer davon ist das alternative Spleißen. Es bewirkt, dass ein und dasselbe Gen als Vorlage für zwei oder mehr unterschiedliche Proteine dienen kann – also jene Substanzen, die für die meisten Abläufe in der Zelle sorgen. Welches jeweils produziert wird, bestimmt die Eigenschaften des betreffenden Gewebes. Ein anderer Faktor besteht in epigenetischen Modifikationen der Erbsubstanz, welche die Aktivität einzelner Gene modulieren – und damit die Menge des zugehörigen Proteins –, ohne die Abfolge der elementaren DNA-Bausteine (Nukleotide) zu verändern, in der die Erbinformation selbst verschlüsselt ist.

In den vergangenen Jahren sind wir beide aber noch auf einen dritten Faktor gestoßen: springende Gene. Solche mobilen DNA-Stücke, die sich bei allen höheren Organismen finden, können Kopien von sich selbst an beliebigen Stellen in das Genom (die Gesamtheit der Erbsubstanz im Zellkern) einfügen. Das ändert manchmal die Verhaltens- oder Funktionsweise der betroffenen Zelle. Im Gehirn scheinen springende Gene häufiger aktiv zu sein als in anderen Geweben. Dadurch können sie kognitive Fähigkeiten, Persönlichkeitsmerkmale und die Anfälligkeit für neurologische Erkrankungen in einem gewissen Ausmaß beeinflussen.

Als wir das Treiben der springenden Gene im Gehirn entdeckten, stellte sich uns sofort eine grundsätzliche Frage: Wenn die einwandfreie Funktion unseres Denkkorgans kritisch für unser Überleben ist, warum toleriert die Evolution dann einen Mechanismus, der das genetische Programm der Neurone unkontrolliert abwandelt? Zwar haben wir immer noch keine endgültige Erklärung, doch vieles spricht dafür, dass springende Gene dem Gehirn eine Variabilität verleihen, dank der es sich schneller an veränderte Umweltbedingungen anpassen kann. Sie haben sich demnach im Lauf der

## AUF EINEN BLICK

### GENE MIT WANDERLUST

1 Neben Erbanlagen und Umwelt beeinflussen auch andere Faktoren unser Verhalten. Dazu zählen so genannte **Retrotransposonen**: mobile genetische Elemente, die Kopien von sich an einer zufälligen Stelle ins Genom einfügen können.

2 Manchmal schalten sie dabei Gene in ihrer neuen Umgebung aus oder ein. Das trägt dazu bei, dass sich selbst **eineiige Zwillinge** mit identischem Erbgut in Aussehen und Verhalten unterscheiden.

3 Solche Kopiervorgänge finden besonders häufig im Gehirn statt, wo sie **kognitive Funktionen** beeinflussen. Dadurch können wir möglicherweise rascher auf veränderte Umweltbedingungen reagieren. Retrotransposonen scheinen aber auch an der Entstehung psychischer Erkrankungen beteiligt zu sein.



JEAN-FRANÇOIS POISSON

Kein Fingerabdruck ist wie der andere. Genauso stimmen keine zwei Gehirne in Aufbau und Funktion völlig überein.

Evolution erhalten, weil der Überlebensvorteil durch die höhere Anpassungsfähigkeit die Risiken überwiegt.

Bekannt sind mobile genetische Elemente schon ziemlich lange. Sie wurden bereits in Pflanzen entdeckt, bevor James Watson und Francis Crick 1953 die Doppelhelixstruktur der DNA aufklärten. In den 1940er Jahren beobachtete Barbara McClintock vom Cold Spring Harbor Laboratory (US-Bundesstaat New York), dass bei äußerem Stress im Erbgut von Mais »Steuerelemente« von einer Stelle zu einer anderen hüpfen und dadurch Gene an- oder abschalten können. McClintocks Maiskolben mit den kunterbunt gesprenkelten Körnern sind ein Paradebeispiel für eine genetische Mosaikbildung. In diesem Fall unterscheidet sich das Genaktivitätsmuster einer Zelle von dem ihrer Nachbarn im selben Gewebe.

McClintock, die für ihre zunächst stark angezweifelte Entdeckung 1983 den Medizinnobelpreis erhielt, erforschte so genannte Transposonen, die sich selbst »transponieren«, also versetzen können, indem sie sich aus dem Genom heraustrennen und an anderer Stelle wieder einfügen. Mobile genetische Elemente, welche stattdessen nur Kopien von sich selbst an einer anderen Position ins Genom einbauen, heißen dagegen Retrotransposonen.

Diese sind im menschlichen Erbgut extrem häufig: Fast die Hälfte unseres Genoms besteht daraus. Dagegen machen die insgesamt etwa 25 000 wirklich wichtigen Gene, die für Proteine kodieren, nicht einmal zwei Prozent unserer DNA aus. Springende Gene sind Relikte eines primitiven molekularen Replikationssystems, das sich schon vor Urzeiten im Erbgut der Eukaryonten (Organismen, deren Zellen einen echten Kern besitzen) eingenistet hat. Sie galten lange als funktionsloser DNA-Schrott, bis eine Forschergruppe unter Haig H. Kazazian jr. von der University of Pennsylvania 1988 herausfand, dass sie nicht nur einfach mitgeschleppt werden, sondern aktiv springen – und das auch beim Menschen.

### Ein besonders aktiver Selbstkopierer

Ein spezielles Retrotransposon, das L1-Element (oder LINE-1 für Long Interspersed Element 1, langes eingestreutes Element 1), spielt im menschlichen Genom wohl eine Schlüsselrolle. Es kann sehr häufig seine Position wechseln – wahrscheinlich weil es im Gegensatz zu anderen die Bauanleitung für die Maschinerie zur Verbreitung von Kopien gleich mit sich führt.

Wird ein L1-Element im Genom aktiv, entsteht zunächst ganz normal eine Abschrift davon in Form einer einzelsträngigen Boten-RNA. Diese wandert aus dem Kern ins Zytoplasma und dient dort als Vorlage zur Synthese der Proteine, die in der L1-DNA verschlüsselt sind. Auch das ist noch nicht ungewöhnlich. Die betreffenden Eiweißstoffe bilden dann jedoch – und darin besteht die Besonderheit – mit der noch intakten RNA einen Molekülkomplex, der in den Zellkern zu-

## »Springende Gene verleihen dem Gehirn eine Variabilität, dank der es sich schneller an veränderte Umweltbedingungen anpassen kann«

rückkehrt. Dort angelangt, zerschneidet eines der Proteine, eine so genannte Endonuclease, die DNA an einer zufälligen Stelle. Unterdessen synthetisiert ein anderes Enzym, die reverse Transkriptase, nach der RNA-Vorlage ein doppelsträngiges DNA-Duplikat des ursprünglichen L1-Retrotransposons, das sich schließlich an der Schnittstelle ins Genom einfügt. Eine gewisse Berühmtheit hat die reverse Transkription von RNA in DNA durch das Aidsvirus HIV erlangt. Es fertigt ebenfalls eine DNA-Kopie seines RNA-Genoms an und baut diese ins Erbgut der infizierten Zelle ein.

Die Retrotransposition verläuft oft fehlerhaft, so dass unvollständige, funktionslose Kopien der L1-DNA entstehen. Außerdem haben die neu eingefügten L1-Schnipsel oder kompletten L1-Duplikate in vielen Fällen keinen Einfluss auf die Aktivität proteinkodierender Gene. Doch manchmal ändern sie die Funktion eines solchen Erbfaktors.

Das L1-Duplikat kann beim Einfügen zum Beispiel mitten in der Bauanleitung für ein Protein landen. Diese wird dadurch meist unbrauchbar, was die Funktion der Zelle in aller Regel beeinträchtigt. Ab und zu entsteht aber ein abgewandeltes Protein, was dem Organismus gewöhnlich ebenfalls schadet, manchmal aber auch nutzt. Vielfach landet die neu eingefügte Sequenz allerdings außerhalb eines Gens. Hier kann sie unter Umständen als Promotor wirken: als Schalter, der nahe gelegene Gene aktiviert. Dadurch erhöht sich das Ausmaß, in dem sie abgelesen und die zugehörigen Proteine hergestellt werden. Auch das kann wieder positive oder negative Auswirkungen auf die Zelle und den Organismus insgesamt haben.

Bauen sich L1-Retrotransposonen an vielen verschiedenen Stellen in das Genom von Neuronen ein und geschieht das in vielen solchen Zellen, sollte sich die Gehirnfunktion dadurch merklich verändern. Es erscheint daher plausibel, dass die genetische Mosaikbildung Verhalten, Denkprozesse und Erkrankungsrisiken beeinflusst – weshalb zum Beispiel ein Zwilling gesund bleibt, während der andere an Schizophrenie erkrankt.

Bis vor Kurzem waren die meisten Forscher der Auffassung, L1-Elemente würden nur in Keimbahnzellen (Samen- oder Eizellen) umherwandern, aus denen bei der Befruchtung neue Embryonen hervorgehen. Zwar gab es Hinweise, wonach sie auch in normalen (»somatischen«) Körperzellen aktiv bleiben – vor allem während der Embryonalentwicklung. Doch diese Befunde stießen auf Skepsis. Da Gene ihre eigene Verbreitung fördern müssen, um sich auf Dauer halten zu können, brächte es mobilen DNA-Elementen nichts, in somatischen Zellen Kopien von sich ins Genom einzufügen; denn diese geben ihre Erbinformation nicht an die Nachkommen des Organismus weiter, sondern sterben mit ihm ab.

Mit empfindlichen Methoden gelang in den vergangenen Jahren jedoch der eindeutige Nachweis, dass Retrotransposo-

# Unterschiedliche eineiige Zwillinge

Das menschliche Erbgut besteht zur Hälfte aus mobilen DNA-Elementen. Solche »Retrotransposonen« können vor allem während der Embryonalentwicklung, aber auch noch im Erwachsenenalter das Genom einer Zelle verändern, indem sie eine RNA-Abschrift von sich selbst erstellen, diese in DNA umschreiben und das Duplikat an einer zufälligen Stelle neu ins Erbgut einfügen. Meist bleibt das folgenlos. In einigen Fällen werden jedoch andere Gene aus- oder angeschaltet, was die Funktion der betroffenen Zelle beeinflusst. In einer Hirnregion namens Hippocampus, die als Tor zum Gedächtnis gilt, tritt das Phänomen häufiger auf als in anderen Geweben. Hier ist am Beispiel eines eineiigen Zwillingspaars gezeigt, wie die Vervielfältigung von Retrotransposonen abläuft und zu ungleichen Individuen führt, die sich insbesondere in der Hirnfunktion unterscheiden.

Befruchtung

embryonales Vorderhirn

1 Im Verlauf einer Zellteilung transkribiert eine DNA-Sequenz sich selbst in eine Einzelstrang-RNA, die dann aus dem Zellkern ins Zytoplasma wandert.

3 Dort werden die Proteine aktiv. Eines erzeugt von der RNA eine DNA-Abschrift, die dem ursprünglichen Retrotransposon gleicht. Ein anderes durchtrennt den DNA-Strang des Genoms an einer zufälligen Stelle. Hier fügt sich die Kopie ein.

2 Teilweise dient die RNA als Vorlage für die »Translation«, bei der sie in Proteine übersetzt wird. Diese bilden einen Komplex mit den verbliebenen RNA-Molekülen, der in den Zellkern zurückkehrt.

4 Der neu eingebaute DNA-Abschnitt kann als so genannter Promotor benachbarte Gene aktivieren.

## DAS ERGEBNIS: UNGLEICHE EINEIIGE ZWILLINGE

Selbst bei Zwillingen, die von derselben befruchteten Eizelle abstammen und ursprünglich dasselbe Erbgut haben, führen Retrotransposonen auf diese Weise zu abweichenden Genaktivierungsmustern und damit zu Unterschieden in Aussehen und Verhalten.

nen auch in somatischen Zellen – während der Embryonalentwicklung und sogar noch später im Leben – Kopien von sich im Genom verteilen. Dies geschieht im Gehirn offenbar häufiger als in anderen Geweben – im Widerspruch zu der lange gehegten Ansicht, die DNA aller Hirnzellen eines Erwachsenen sei identisch und bleibe bis zum Tod unverändert.

In unserem Labor am Salk Institute for Biological Studies in La Jolla (Kalifornien) untersuchten wir beispielsweise die Aktivität von Retrotransposonen in genmanipulierten Mäusen, deren Zellen grün fluoreszieren, sobald sich ein L1-Element irgendwo im Körper ins Genom einbaut. Bei diesen Experimenten beobachteten wir das verräterische Leuchten erwartungsgemäß in Keimbahnzellen, aber auch in bestimmten Hirnregionen (Bild rechts). Zu diesen zählte insbesondere der Hippocampus, der für Gedächtnis und Aufmerksamkeit eine wichtige Rolle spielt. Interessanterweise waren die L1-Elemente besonders in den Vorläuferzellen aktiv, aus denen Neurone des Hippocampus hervorgehen.

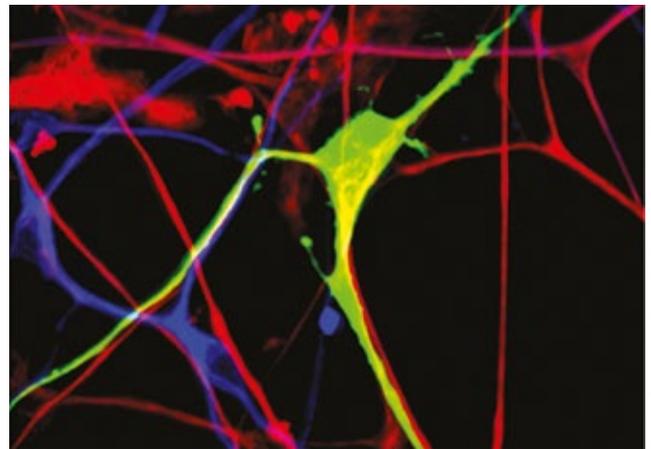
In mehreren Organen ausgewachsener Lebewesen gibt es solche unreifen Zellen, die sich bei Bedarf – etwa bei der Wundheilung – teilen und spezialisieren, um abgestorbenes Gewebe zu ersetzen. Der Hippocampus gehört zu einer von zwei Hirnregionen, in denen sich auch bei Erwachsenen neue Neurone bilden. Die L1-Elemente sind im Gehirn also nicht nur während der Embryonalentwicklung aktiv, wenn massenhaft neue Nervenzellen entstehen, sondern auch später.

Auf der Suche nach Belegen für Retrotranspositionen im menschlichen Gehirn bestimmten wir die Anzahl der dort vorhandenen L1-Elemente bei Verstorbenen. Tatsächlich waren es deutlich mehr pro Zelle als in Herz und Leber, die wir zum Vergleich heranzogen.

Die meisten Gensprünge müssen bereits im Mutterleib und in den ersten Lebensjahren stattgefunden haben; denn eine Retrotransposition ist ausschließlich während einer Zellteilung möglich, die im Gehirn nach der frühen Kindheit nur noch in zwei eng umschriebenen Regionen vorkommt. Unserer Zählung nach enthält das Genom jedes menschlichen Neurons im Durchschnitt 80 neue Kopien des L1-Elements. Diese erstaunlich hohe Zahl könnte ein erhebliches Maß an Variabilität zwischen verschiedenen Individuen verursachen, was die Funktionsweise einzelner Hirnzellen und die Aktivität des gesamten Denkorgans betrifft.

Forschungsergebnisse, über die Wissenschaftler vom Roslin Institute bei Edinburgh (Schottland) vor einem Jahr in der Fachzeitschrift »Nature« berichteten, bestätigen die Transpositionsaktivität von L1-Elementen im menschlichen Gehirn. Bei drei Verstorbenen fanden sich in den Genomen von Zellen des Hippocampus und des Nucleus caudatus, der ebenfalls an Gedächtnisfunktionen mitwirkt, an insgesamt 7743 Stellen neu eingefügte L1-Elemente. Dieses Ergebnis lässt erahnen, wie groß die im Verlauf des Lebens erzeugte genetische Diversität im menschlichen Gehirn ist.

Das Team vom Roslin Institute entdeckte zu seiner großen Überraschung auch rund 15000 Kopien einer anderen Klasse von Retrotransposonen, die als SINE-Elemente (»kur-



COUFAL, N. G. ET AL.: L1-RETROTRANSPOSITION IN HUMAN NEURAL PROGENITOR CELLS. IN: NATURE, 460, S. 1127–1131, 2009. FIG. 1C

Die grüne Fluoreszenz eines Mäuse-neurons zeigt an, dass sich in dieser Zelle das Duplikat eines mobilen DNA-Elements an einer neuen Stelle im Genom eingebaut hat.

ze eingestreute Elemente«) bekannt sind. Die häufigsten gehören zur Gruppe der so genannten Alu-Sequenzen und waren noch nie zuvor als im Gehirn aktiv beschrieben worden.

Angesichts dieser Forschungsergebnisse fragten wir uns, was die L1-Elemente in Körperzellen zum Springen veranlasst. Zwei Dinge wussten wir: Im Hippocampus entstehen das gesamte Leben hindurch neue Neurone, und diese Neurogenese wird bei Mäusen durch unbekannte Situationen und körperliche Aktivität angeregt. Deshalb vermuteten wir in sportlicher Betätigung auch einen möglichen Auslöser für die Retrotransposition. Tatsächlich verdoppelte sich die Zahl der grün fluoreszierenden Zellen im Hippocampus unserer Mäuse, wenn sie längere Zeit im Lauftrad rannten.

Da auch neue Erfahrungen und Anforderungen die Neurogenese fördern, dürften diese Faktoren ebenfalls die Retrotransposition ankurbeln. Wenn aber die Sprunghäufigkeit von L1-Elementen bei Lernprozessen und Anpassungen an veränderte Umweltsituationen zunimmt, dann unterliegen die neuronalen Netze des Gehirns einem stetigen Wandel.

### Schattenseite psychische Erkrankungen

Auf der Suche nach Belegen für die Hypothese, dass springende Gene zur Variabilität menschlicher Hirnfunktionen beitragen, wollten wir die Transposition eines solchen Elements auch an lebenden Menschen anhand der Folgen nachweisen. Das fällt leichter, wenn die Auswirkungen negativ sind, weil sie dann deutlicher ins Auge springen. Fündig wurden wir beim Rett-Syndrom: einer schweren Störung der Gehirnentwicklung im Kleinkindalter, die fast ausschließlich bei Mädchen auftritt. Als Ursache erkannte Huda Zoghbi vom Howard Hughes Medical Institute in Chevy Chase (Maryland) schon 1999 Mutationen in einem Gen namens *MeCP2*.

Das warf zahlreiche Fragen zum molekularen und zellulären Mechanismus dieser Erkrankung auf, denen wir mit unseren Untersuchungen nachgingen. Wie sich dabei herausstellte, sorgt eine bestimmte *MeCP2*-Mutation dafür, dass

sich in den Gehirnen betroffener Mäuse und Menschen mehr L1-Elemente in die DNA einbauen. Demnach könnten die springenden Gene zumindest teilweise für die Symptome verantwortlich sein.

Auch bei Schizophreniepatienten fand sich eine erhöhte L1-Aktivität im Stirnlappen der Großhirnrinde. Zudem existieren indirekte Hinweise, wonach L1-Elemente bei diversen seelischen Störungen eine Rolle spielen, etwa dem Autismus. Erkenntnisse darüber, wie mobile genetische Elemente an der Entstehung psychischer Erkrankungen mitwirken, könnten somit neue Möglichkeiten zur Diagnose und Therapie solcher Leiden eröffnen und Wege aufzeigen, ihnen vorzubeugen.

Künftige Forschungen zu springenden Genen im Gehirn werden vielleicht sogar einer ganzen Wissenschaftsdisziplin den Boden entziehen. Verhaltensforscher stützen sich gern auf langfristige Beobachtungen an eineiigen Zwillingen, um ohne Störung durch genetische Effekte die Rolle von Umwelteinflüssen auf die Entstehung von Krankheiten wie der Schizophrenie zu ergründen. Wenn aber springende Gene das Erbgut auch nach der Embryonalentwicklung noch modifizieren, erscheint zweifelhaft, ob eineiige Zwillinge wirklich in allen Zellen dasselbe Genom haben. Das macht es noch schwieriger, die Effekte von Vererbung und Umwelt auf unsere Psyche zu unterscheiden.

Am Schluss möchten wir zu der Frage zurückkehren, weshalb springende Gene als potenziell schädlicher Ballast nicht durch die natürliche Auslese beseitigt wurden. Während der langen Entwicklungsgeschichte des Lebens haben Viren und andere Eindringlinge zum Zweck der eigenen Verbreitung das Genom unserer Vorfahren mit sich kopierenden Genen immer weiter aufgebläht. Warum ließ die Evolution das zu? Über die Antwort können wir nur Vermutungen anstellen. Vielleicht attackierten die Schmarotzer das Genom einfach so häufig und massiv, dass es nicht gelang, sie völlig zu eliminieren. Ein Teil konnte sich so dauerhaft einnisten. Diese Störenfriede wurden dann mit raffinierten Mechanismen stillgelegt und entwapnet. Offenbar haben es unsere Genome in einigen Fällen sogar geschafft, die L1-Retrotransposonen für ihre eigenen Zwecke einzuspannen. Dies könnte erklären, warum Zellen ihnen unter bestimmten Umständen erlauben, zusätzliche Kopien ins Genom zu integrieren.

Ein möglicher Hinweis auf die Gründe für das Fortbestehen von L1-Elementen ergab sich jüngst aus der genaueren Analyse von Experimenten mit Mäusen eines genetisch homogenen Stamms, die unter völlig gleichartigen Bedingungen aufwuchsen und trotzdem teils stark in ihren Stressreaktionen differierten. Die beobachteten Unterschiede im Verhalten ergaben eine Häufigkeitsverteilung, die einer gaußschen Glockenkurve entsprach und für Zufallsereignisse typisch ist. Demnach sind die Mechanismen, die der Variabilität zu Grunde liegen, vom Zufall gesteuert – was allem Anschein nach auch auf die Sprünge der L1-Elemente im Genom zutrifft.

In diesem Fall würfelt die Natur gewissermaßen und setzt darauf, dass die positiven Effekte nützlicher Einfügungen die negativen Auswirkungen der anderen überwiegen. In den

Vorläuferzellen der Hippocampusneurone geschieht das bei neuen Erfahrungen besonders häufig. Dadurch steigt die Chance, dass zumindest einige der ins Genom eingebauten L1-Kopien Neurone hervorbringen, mit deren Hilfe das Gehirn die ungewohnten Herausforderungen besonders gut bewältigen kann. Etwas Ähnliches geschieht übrigens im Immunsystem, wo durch Umarrangieren der DNA eine Vielzahl unterschiedlicher antikörperproduzierender Zellen entsteht, von denen nur jene für die Massenproduktion ausgewählt werden, deren Antikörper den Krankheitserreger am besten bekämpfen.

Um einen deutlichen Effekt hervorzurufen, genügen schon recht moderate Auswirkungen der L1-Einfügung in wenigen Neuronen. Wie Experimente ergaben, kann sich bei Nagern das Verhalten bereits ändern, wenn nur eine einzige Hirnzelle ein neues Signalmuster zeigt.

Es gibt ein weiteres Argument für unsere Hypothese: Die Abstammungslinie aller noch aktiven L1-Elemente im Genom des modernen Menschen entstand vor 2,7 Millionen Jahren – also nach der evolutionären Trennung zwischen zweibeinig laufenden Hominiden und Schimpansen und etwa zu der Zeit, als unsere Vorfahren begannen, Steinwerkzeuge herzustellen. Vielleicht haben diese springenden Gene dazu beigetragen, dass die Frühmenschen Gehirne entwickeln, die Informationen über ihre Umwelt rasch verarbeiten können. Dadurch vermochten sie sich flexibler an variable Daseins- und Klimabedingungen anzupassen. Die L1-Elemente schufen also möglicherweise die Grundlage für die rasante und überaus erfolgreiche Evolution des *Homo sapiens*. ☞

## DIE AUTOREN



**Fred H. Gage** (links) interessiert sich als Professor im Genetiklabor am Salk Institute for Biological Studies in La Jolla (Kalifornien) vor allem für die Frage, wie sich Nervenzellen im Gehirn bilden. **Alysso R.**

**Muotri** ist Assistenzprofessor in der Abteilung für Pädiatrie sowie für zelluläre und molekulare Medizin an der University of California in San Diego. Er hat von 2002 bis 2008 als Postdoc in Gages Labor gearbeitet.

## QUELLEN

**Coufal, N. G. et al.:** L1 Retrotransposition in Human Neural Progenitor Cells. In: Nature 460, S. 1127–1131, 2009

**Singer, T. et al.:** LINE-1 Retrotransposons: Mediators of Somatic Variation in Neuronal Genomes? In: Trends in Neurosciences 33, S. 345–354, 2010. Online erhältlich unter: [www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2916067/?tool=pubmed](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2916067/?tool=pubmed)

## WEBLINKS

[www.scientificamerican.com/mar2012/jumping-genes](http://www.scientificamerican.com/mar2012/jumping-genes)  
Video über die Versuche von Gage mit springenden Genen

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1159802](http://www.spektrum.de/artikel/1159802)

# Streit um die Prostatakrebs-Früherkennung

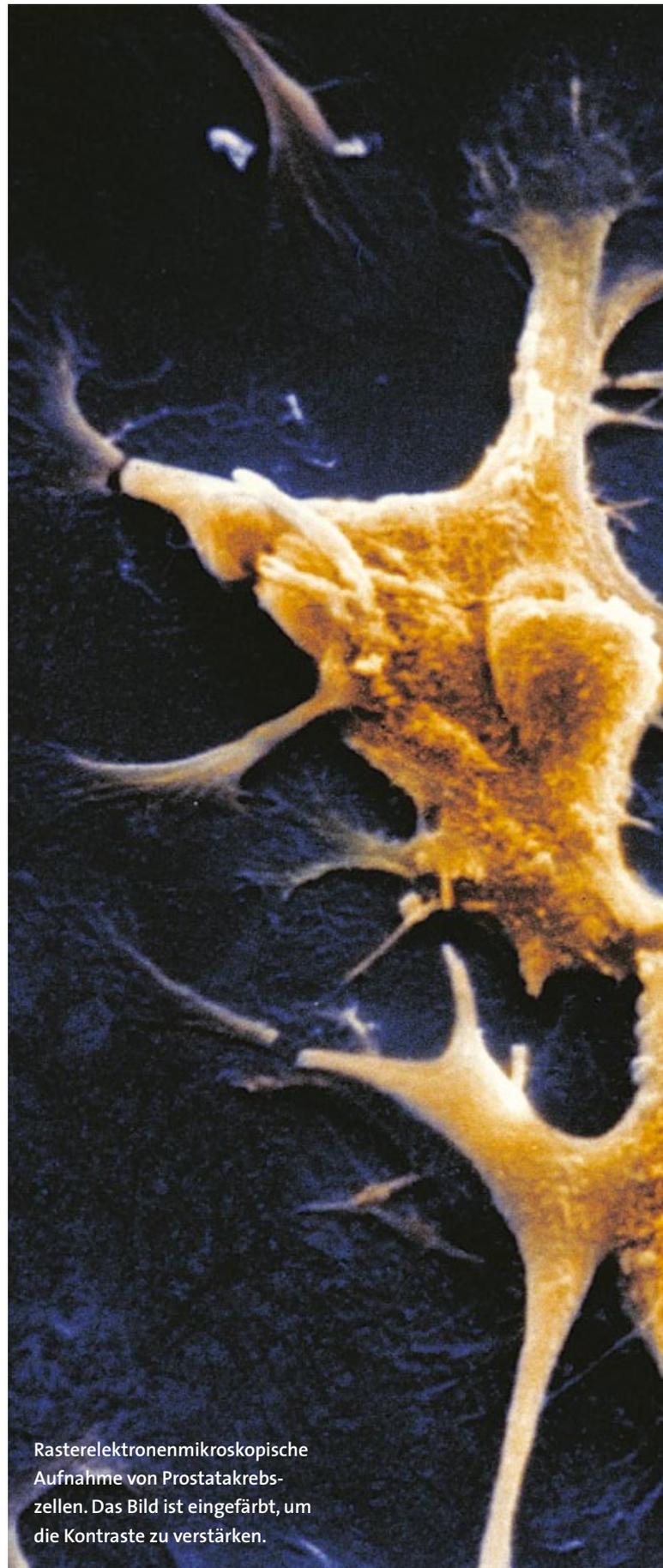
Schaden PSA-Tests zur Früherkennung von Prostatakrebs mehr, als sie nutzen? Immer mehr Studien lassen die aktuellen Vorsorgemaßnahmen zwiespältig erscheinen.

Von Marc B. Garnick

**I**m vergangenen Herbst ließ die amerikanische »Preventive Services Task Force« eine Bombe platzen. Das Expertengremium, das die US-Regierung in Gesundheitsfragen berät, empfahl gesunden Männern, nicht mehr an PSA-Tests zur Früherkennung von Prostatakrebs teilzunehmen. Denn diese Messungen des Blutspiegels an prostata-spezifischem Antigen (PSA) hätten als Instrument zur Krebsvorsorge nur wenig oder gar keinen Nutzen. Statt Leben zu retten, führten sie nur dazu, dass hunderttausende Männer unnötig operiert oder bestrahlt würden – mit Nebenwirkungen wie Impotenz, Inkontinenz und Rektalblutungen.

Die amerikanischen Experten schätzen, dass seit 1985 mehr als eine Million Männer auf Grund eines positiven PSA-Tests an der Prostata behandelt wurden. Mindestens 5000 von ihnen starben kurz nach dem Eingriff, weitere 300000 wurden impotent, inkontinent oder beides. Kurz nachdem die Task Force diese alarmierenden Zahlen veröffentlicht hatte, hagelte es empörte Kommentare von medizinischen Fachgesellschaften. Auch die American Urological Association, ein amerikanischer Berufsverband von derzeit mehr als 18 000 Urologen, äußerte Kritik.

Die Kontroverse ist nicht neu – schon seit Langem debattieren Experten über den Nutzen des PSA-Tests. Trotzdem tendiert die öffentliche Meinung in den USA immer noch dahin, seinen massenhaften Einsatz zu befürworten. Als internistischer Onkologe, der sich auf Prostatakrebs spezialisiert hat, stimme ich der Einschätzung der Task Force jedoch in den wesentlichen Punkten zu. Vielen medizinischen Laien ist nicht klar, wie schwach die Belege sind, die für den PSA-Test als Instrument zur Krebsfrüherkennung sprechen. Er liefert zwar nützliche Informationen – aber erst, nachdem ein Prostatakrebs diagnostiziert wurde. Zudem wissen nur wenige, dass bei der medizinischen Behandlung des Prosta-



Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme von Prostatakrebszellen. Das Bild ist eingefärbt, um die Kontraste zu verstärken.

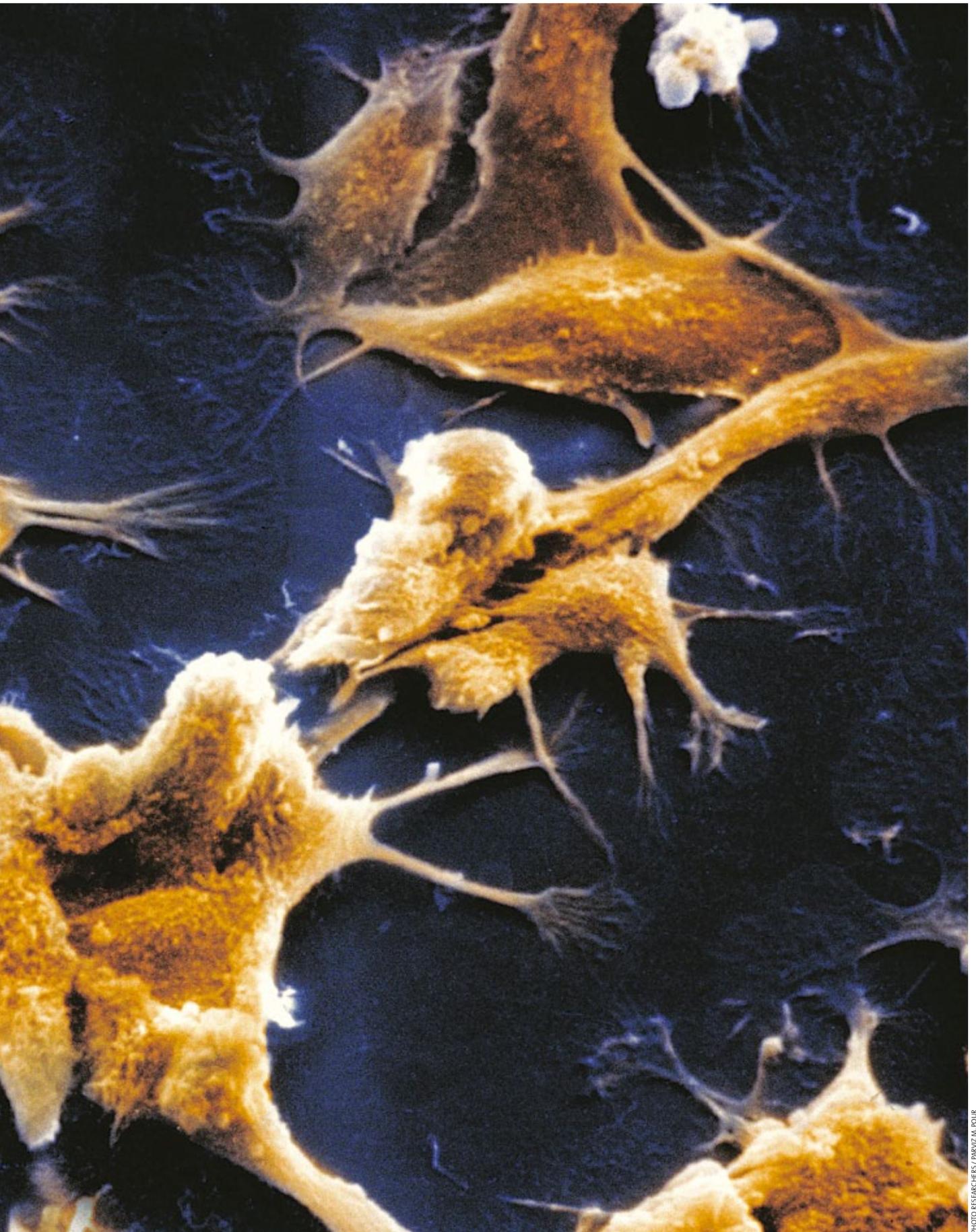


PHOTO RESEARCHERS / PARVIZ M. POUR

takarzinoms häufig Komplikationen auftreten, trotz ausgefeilter Therapieformen, die zumindest unter Befürwortern als besonders fortschrittlich gelten.

Eine weitere Kontroverse betrifft die Frage, ob und wann diejenigen Patienten behandelt werden sollen, die unzweifelhaft an Prostatakrebs erkrankt sind. Auch hier sprechen die vorliegenden Daten für einen deutlichen Kurswechsel – weg von aggressiven Soforteingriffen und hin zu einem vorsichtigeren, individuell angepassten Vorgehen. Die Ursache für diesen Sinneswandel liegt in der Erkenntnis, dass eine Prostatakrebserkrankung von Patient zu Patient sehr unterschiedlich verlaufen kann. Die möglichst frühzeitige Therapie ist deshalb nicht das Patentrezept, für das viele Ärzte, ich einbegriffen, sie lange Zeit gehalten haben.

Sowohl die PSA-Messung als auch die heutigen Therapien gegen Prostatakrebs sind mit grundlegenden Problemen behaftet. Eine Reihenuntersuchung zum frühzeitigen Erkennen von Krankheiten – ein so genanntes Screening – liefert im Idealfall nur bei den Patienten ein positives Ergebnis, die unbehandelt tatsächlich die Symptome der Erkrankung ausbilden würden. Dementsprechend sollte ein perfektes Prostatakrebs-Screening ausschließlich Tumoren identifizieren, die ohne medizinischen Eingriff zu gesundheitlichen Problemen führten. Die betroffenen Männer könnten anschließend therapiert werden, wobei der Eingriff im besten Fall sowohl hocheffektiv wäre als auch keine ernsthaften Nebenwirkungen hätte. Wenn beides vorläge – ideales Screening und ideale Therapie –, dann wäre es in der Tat angezeigt, so viele Männer wie möglich zu testen und alle zu behandeln, bei denen der Test positiv ausfällt.

Doch davon sind wir weit entfernt. Ein positiver PSA-Test bedeutet nicht, dass der Patient ein Prostatakarzinom hat, sondern nur, dass er eins haben könnte. Das prostataspezifische Antigen (PSA) ist ein Protein, das von der Prostata produziert und der Samenflüssigkeit beigemischt wird. Normalerweise fällt seine Konzentration im Blut verschwindend gering aus. Sie kann aber aus verschiedenen Gründen anstei-

gen, etwa bei einer altersbedingten gutartigen Vergrößerung der Prostata, im Zuge einer Infektion, nach sexueller Aktivität – oder eben auf Grund des Wachstums eines bösartigen Prostatumors.

Wenn der PSA-Test wiederholt ein positives Ergebnis liefert, entnimmt der Arzt Gewebe aus der Prostata, um es zu untersuchen. Diese so genannte Biopsie ist unangenehm und bringt gewisse Risiken mit sich, stellt aber noch nicht das eigentliche Problem dar. Denn sie erlaubt es immerhin festzustellen, ob sich in der Prostata des Patienten ein bösartiger Tumor gebildet hat oder nicht. Das wirkliche Dilemma besteht darin, dass die Mediziner nicht erkennen können, ob ein so gefundener Tumor gefährlich ist oder ob er dem Betroffenen zeitlebens nie Probleme bereiten wird.

### Im fortgeschrittenen Alter erkrankt die Prostata fast immer

Studien zufolge haben mehr als die Hälfte der amerikanischen Männer, die zwischen 50 und 60 Jahre alt sind, Prostatakrebs. Bei den Männern über 80 sind es sogar mehr als drei Viertel. Die Mehrzahl von ihnen stirbt jedoch nicht an dem Tumorleiden, sondern an anderen Erkrankungen. Bei wem ist eine Behandlung unbedingt geboten und bei wem völlig unnötig? Die Ärzte wissen es in der Regel nicht.

Diese Unklarheit wäre hinnehmbar, wenn die Therapie keine Risiken mit sich brächte. Denn dann könnte man viele behandeln, um das Leben weniger zu retten. Leider sieht die Realität jedoch anders aus. Denn in unmittelbarer Nähe der Prostata liegen Enddarm, Harnblase und Penis. Das macht es schwierig, hier zu operieren oder zu bestrahlen, ohne die benachbarten Organe zu beschädigen.

Eine chirurgische Entfernung der Prostata führt oft zu Inkontinenz, da der Arzt den Blasenausgang von der Harnröhre trennen muss. Zwar verbindet er die beiden Strukturen später wieder, doch kommt es während solcher Eingriffe immer wieder zu Schäden am Schließmuskel, der die Blasenentleerung kontrolliert. Zudem können die Nerven und Blutgefäße, die für die Erektionsfunktion verantwortlich sind, versehentlich durchtrennt werden, was den Patienten impotent macht. Angeblich treten solche Komplikationen bei roboterassistierten Operationen seltener auf, doch fehlen bislang große, unabhängige Studien, die das klar belegen.

Auch eine Bestrahlung der Prostata kann Impotenz zur Folge haben. Zusätzlich lauert hier die Gefahr, dass Enddarm und Harnblase Schaden nehmen, da sie von der kaum vermeidbaren Streustrahlung getroffen werden. Blutungen aus dem Enddarm und ungewollter Stuhlabgang sind häufige Nebenwirkungen der Strahlentherapie, die generell zu selten dokumentiert werden. Sie treten auch nach dem Einbringen kleiner radioisotopenhaltiger Nadeln oder Körner, so genannter Seeds, in die Prostata auf, sowie nach chirurgischen Eingriffen. Schließlich stehen zur Behandlung des Prostatakarzinoms noch diverse medikamentöse Verfahren zur Auswahl – Hormon-, Immun- und Chemotherapien –, die ebenfalls Nebenwirkungen haben. Dazu zählen der Verlust

## AUF EINEN BLICK

### GEFÄHRLICHE VORSORGE?

**1** Der **PSA-Test** lässt sich als Reihenuntersuchung an gesunden Männern einsetzen, um möglichst frühzeitig Prostatakrebs zu erkennen. Groß angelegte Studien lassen jedoch Zweifel daran aufkommen, ob hierdurch das Risiko, an Prostatakrebs zu sterben, wirklich sinkt.

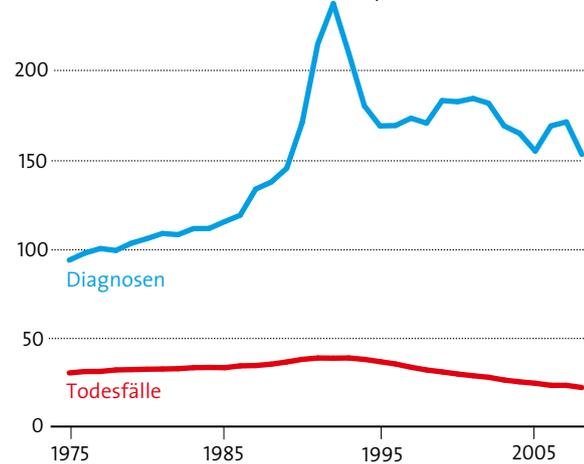
**2** Bei hunderttausenden Männern hat ein positives Testergebnis zu unnötigen Behandlungen mit **schweren Nebenwirkungen** geführt. Ärzte und Gesundheitsexperten streiten deshalb darüber, ob das PSA-Screening als Instrument der Krebsfrüherkennung sinnvoll ist.

**3** Ein guter Kompromiss könnte darin bestehen, am **Screening** festzuhalten, die Therapie eines dabei entdeckten Prostatakarzinoms jedoch so lange aufzuschieben, bis der Krebs sich als tatsächlich gefährlich erweist.

## Ernüchternde Daten

In den 1990er Jahren führte der verbreitete Einsatz des PSA-Screenings zu einem dramatischen Anstieg der Tumordiagnosen in den USA (blau). Bald darauf ging die Zahl der Todesfälle durch Prostatakrebs zurück (rot). Doch das zeitliche Zusammentreffen dieser beiden Trends beweist noch keinen ursächlichen Zusammenhang. Tatsächlich zeigten zwei große, prospektive Studien aus dem Jahr 2009, dass das PSA-Screening die Gefahr, an Prostatakrebs zu sterben, wenig oder überhaupt nicht senkt. Der Rückgang der Todesfälle könnte auf Veränderungen der Lebensgewohnheiten beruhen oder auf dem zunehmenden Einsatz von cholesterinsenkenenden Arzneistoffen, so genannten Statinen. Deren entzündungshemmende Wirkung könnte vor Prostatakrebs schützen.

Veränderungen in der Zahl der Prostatakrebsdiagnosen und -todesfälle in den USA (Anzahl Betroffener pro 100 000 Männer)



FENICHERT JAMSEN, NACH SEER, CANCER STATISTICS REVIEW 1975-2008, NATIONAL CANCER INSTITUTE

des Sexualtriebs, Impotenz, Gewichtszunahme, Knochenschwund, Hitzewallungen sowie Störungen der Herz- und Leberfunktion. Deshalb sollte der Arzt deshalb immer sämtliche Risiken sorgfältig gegen den möglichen Nutzen abwägen.

Seit einiger Zeit mehren sich die Erkenntnisse, die gegen den Einsatz des PSA-Tests in der Krebsfrüherkennung sprechen. Bereits 2008 empfahl die Preventive Services Task Force, dass Männer über 75, die keine Prostatabeschwerden haben, nicht damit untersucht werden sollten. Denn die vorliegenden Daten hatten ergeben, dass Prostatakrebspatienten dieser Altersgruppe mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht an ihrem Tumorleiden sterben, sondern aus anderen Gründen.

Nur ein Jahr später zeigten die Ergebnisse zweier sehr großer Erhebungen – der europäischen »ERSPC«- und der amerikanischen »PLCO«-Studie –, dass dies auch für jüngere Männer gelten könnte. In beiden Studien teilten die Forscher gesunde Männer zwischen 50 und 74 Jahren per Zufall in zwei Gruppen ein (insgesamt lag die Teilnehmerzahl bei rund 250 000). Die erste Gruppe nahm regelmäßig an Früherkennungstests teil, entweder mittels PSA-Messung oder mittels

Tastuntersuchung, also dem Befühlen der Prostata durch den Arzt. Lieferten die Tests ein auffälliges Ergebnis, wurden Biopsien vorgenommen, und falls darin Krebszellen erkennbar waren, empfahl der Arzt in der Regel eine Therapie. Die zweite Gruppe bekam kein regelmäßiges Screening angeboten, erhielt jedoch die übliche medizinische Versorgung, falls notwendig. Wenn ein Mann aus dieser Gruppe etwa Probleme beim Wasserlassen hatte – ein möglicher Hinweis auf Prostatakrebs –, wurde er entsprechend inspiziert und behandelt.

Am Ende des Untersuchungszeitraums analysierten die Forscher beide Gruppen im Hinblick auf folgende Aspekte: Lebten die Männer, die an regelmäßigen Vorsorgetests teilgenommen hatten, länger als jene der Vergleichsgruppe? Und starben sie seltener an Prostatakrebs als diese? Die erste Frage beantworteten beide Studien mit einem klaren Nein. Bezüglich der zweiten Frage fiel die Antwort mehrdeutig aus. Die europäische Erhebung ergab bei den Männern, die am Screening teilnahmen, ein um 20 Prozent geringeres Risiko, an Prostatakrebs zu sterben. Die US-Untersuchung hingegen zeigte auch in dieser Hinsicht keinen Unterschied zwischen den beiden Gruppen.

### Viele unnötige Eingriffe

In der europäischen Studie ermittelten die Forscher zudem, wie viele Patienten getestet und behandelt werden müssen, um einen Todesfall durch Prostatakrebs zu verhindern. Dieses Verhältnis zu kennen, ist sehr wichtig, um den Nutzen eines Screenings zu bewerten. Laut den Berechnungen ist es erforderlich, 1400 Männer zu untersuchen und 48 davon zu behandeln, um einem Todesfall vorzubeugen. Das bedeutet, dass 47 Patienten eine Therapie mit zweifelhaftem Nutzen erhalten, die bei vielen erhebliche Nebenwirkungen zeitigt. Zusätzlich fragwürdig erscheint das Screening, bedenkt man, dass sich die Gesamtsterblichkeit zwischen den regelmäßig untersuchten Männern und der Vergleichsgruppe nicht unterschied.

Allerdings müssen wir Vorsicht walten lassen, wenn wir diese Studien interpretieren. Denn die Daten zeigen zwar recht eindeutig, dass die meisten gesunden Männer ohne Prostatabeschwerden keine regelmäßigen Früherkennungsuntersuchungen benötigen. Doch bei Patienten mit einem Familienangehörigen, der vor dem 70. Lebensjahr an Prostatakrebs gestorben ist, erscheint die regelmäßige Messung des PSA-Werts gerechtfertigt. Sie besitzen möglicherweise eine ererbte Veranlagung, die das Erkrankungsrisiko erhöht. In einigen Jahren wird es vielleicht möglich sein, besonders gefährdete Männer mit genetischen Tests zu identifizieren, um sie in einem speziellen Vorsorgeprogramm zu betreuen.

Einer meiner Patienten, Herr H., nahm bereits vor 16 Jahren den heutigen Standpunkt der Preventive Services Task Force ein. 1996 war bei ihm im Alter von 54 Jahren ein PSA-Test positiv ausgefallen und anschließend Prostatakrebs diagnostiziert worden. Er konsultierte viele Spezialisten, darunter auch mich, und alle rieten ihm zur Therapie. Trotzdem lehnte er jegliche Behandlung ab, denn nach dem Studium der verfügbaren Fachliteratur war er zu dem Schluss gekom-



men, es sei unwahrscheinlich, dass er in absehbarer Zukunft an dem Krebs sterben würde. Zudem ging er davon aus, dass nach einigen Jahren des Wartens neue, wirksamere Therapien zur Verfügung stehen würden. Er gewöhnte sich lediglich eine gesündere Lebensweise

an und nahm ab. Jahr für Jahr, nachdem er diese mutige Entscheidung getroffen hatte, gab ich meinem Patienten erneut den Rat, sich behandeln zu lassen. Und jedes Mal lehnte er ab.

Heute geht es dem inzwischen 70-jährigen immer noch sehr gut. Weder wurde er operiert noch bestrahlt noch mit Medikamenten behandelt, trotzdem hat sein Tumor nicht gestreut. Sein PSA-Wert ist in dieser Zeit von 7 auf 18 Einheiten gestiegen – eine ausgesprochen gemächliche Zunahme, die darauf schließen lässt, dass der Krebs sehr langsam wächst. Der Verzicht auf eine Therapie war offenkundig richtig. Indem Herr H. sich ausführlich informierte und unsere Ratschläge kritisch hinterfragte, konnte er eine gut begründete Entscheidung treffen. So vermied er es, den ungewissen Nutzen einer frühzeitigen Behandlung mit ihren fast sicheren Folgeschäden zu erkaufen.

Tatsächlich beruhten die ärztlichen Therapieempfehlungen zu der Zeit, als Herr H. erstmals in meiner Sprechstunde

erschien, nicht etwa auf hochwertigen klinischen Studien, sondern auf falschen Vorstellungen vom Verlauf einer Prostatakreberkrankung. Wir wussten, dass manche Tumoren nur langsam wachsen, andere hingegen sich sehr aggressiv entwickeln. Doch es galt als ausgemacht, dass die weitaus meisten irgendwann metastasieren und somit unheilbar würden. Einen Krebs im Frühstadium zu entdecken und sofort zu bekämpfen, erschien damals als praktisch gleichbedeutend damit, ein Leben gerettet zu haben. Diese Logik liegt auch dem heutigen Prostatakrebs-Screening zu Grunde.

### Tumorwachstum im Schneckentempo

Doch die Sterblichkeitsstatistiken der letzten 25 Jahre zeigen, dass die Angelegenheit komplizierter ist. Seit den 1990er Jahren geht die Zahl der Männer, die an Prostatakrebs sterben, zurück. Die Befürworter von Früherkennungsprogrammen führen dies auf den massenhaften Einsatz des PSA-Tests zurück – doch wie wir an den beiden prospektiven Studien aus Europa und den USA gesehen haben, steht diese Annahme auf wackligen Füßen. Zudem hätte die Prostatakrebssterblichkeit viel schneller und deutlicher sinken müssen, wenn sie wirklich auf Grund des PSA-Screenings abgenommen hätte. Tatsächlich scheinen unsere früheren Überzeugungen nicht korrekt gewesen zu sein. Wie wir inzwischen wissen, wachsen viele Prostatakarzinome extrem langsam, oft sogar praktisch gar nicht.

Forscher entdecken immer mehr Beispiele für Tumoren, die zunächst als bösartig eingestuft werden und doch so gemächlich wachsen, dass sie sich weder im Körper ausbreiten noch schwer wiegende klinische Symptome verursachen. Deshalb erwägen Mediziner bereits, ihnen eine besondere Bezeichnung zu geben – etwa »indolenter Tumor«, was soviel wie »träge Geschwulst« bedeutet. Dies soll unterstrei-

## Situation in Deutschland

**In der Bundesrepublik bieten die gesetzlichen Krankenkassen allen Männern ab 45** einmal jährlich eine Tastuntersuchung an, um Prostatakrebs möglichst früh zu erkennen. Dabei untersucht der Arzt die Genitalien und befühlt die Prostata, indem er einen Finger in den Enddarm einführt. Der PSA-Test ist nicht im gesetzlichen Früherkennungsprogramm enthalten – die Kosten dafür muss der Betroffene selbst tragen.

Zur Bewertung des PSA-Screenings gibt es unterschiedliche Stimmen. Die Deutsche Krebshilfe kommt zur Einschätzung, dass bei ihm »das Verhältnis von Nutzen und Schaden bislang nicht ausreichend bekannt« ist. Männer über 40 sollten sich umfassend über die Prostatakrebsfrüherkennung informieren und nach Beratung mit ihrem Arzt entscheiden, ob sie den Test nutzen wollen. Auch die aktuelle ärztliche Leitlinie zum Thema Prostatakarzinom äußert sich bezüglich des PSA-Screenings zurückhaltend: »Ein Einfluss auf die Gesamtüberlebenszeit ist nicht nachgewiesen.«

Die Deutsche Gesellschaft für Urologie empfiehlt allen Männern ab 40 die Bestimmung des PSA-Werts und eine Tastuntersuchung mit dem Finger. Sei in der Familie des Mannes bereits eine Prostatakreberkrankung aufgetreten, dann sei eine jährliche Untersuchung ab dem 40. Lebensjahr mit Bestimmung des PSA-Werts dringend angeraten.

**Der Krebsinformationsdienst (KID)** des Deutschen Krebsforschungszentrums urteilt, dass der PSA-Test nach wie vor umstritten ist: Es stehe noch nicht fest, ob Männer länger und vor allem besser leben, wenn sie diese Untersuchung regelmäßig durchführen. Sei ein Mann bereits an einem Prostatakarzinom erkrankt, helfe der Test dagegen, die Behandlung zu planen und ihren Erfolg zu kontrollieren. Zusammen mit der Krankenkasse AOK und der Universität Bremen hat der KID einen Onlinetest erstellt, der Männern die Entscheidung für oder gegen einen PSA-Test erleichtern soll: [www.psa-entscheidungshilfe.de](http://www.psa-entscheidungshilfe.de)

chen, dass die betroffenen Patienten für einen sehr langen Zeitraum unbehandelt bleiben können oder vielleicht sogar überhaupt keine Therapie benötigen. Zum Zeitpunkt der ersten Diagnose wissen wir zwar noch nicht, ob es sich um einen indolenten Tumor handelt, doch können wir seine weitere Entwicklung anhand seiner Eigenschaften recht gut abschätzen und in regelmäßigen Untersuchungen verfolgen.

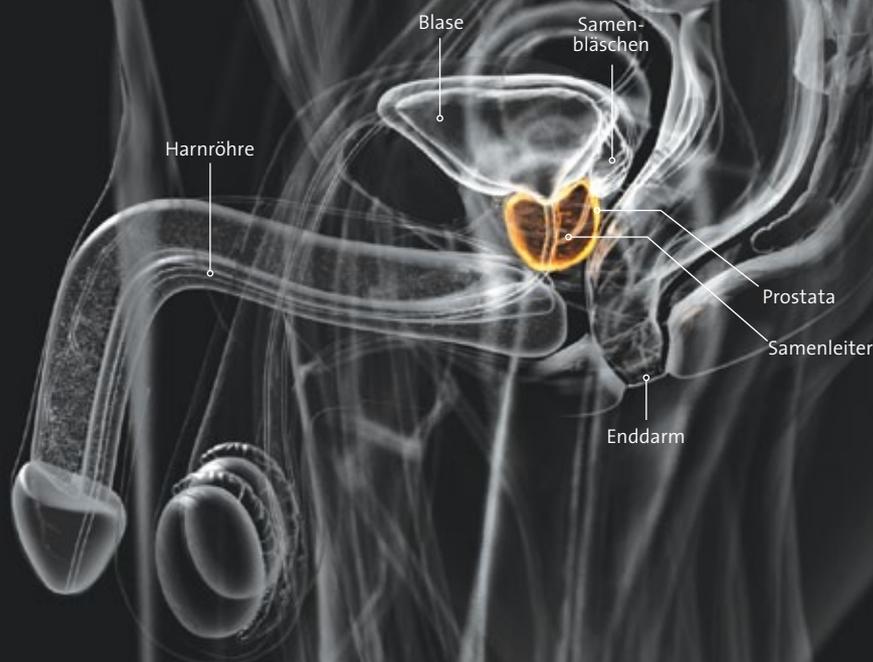
Zugegeben: Eingebaute Gewohnheiten zu ändern, ist in der Medizin genauso schwer wie in anderen Lebensbereichen. Si-

cherlich wird es viele Ärzte und Patienten geben, die sich nicht damit wohlfühlen, auf das PSA-Screening zu verzichten, nachdem jahrelang das Gegenteil empfohlen wurde. Einige Patienten sind überdies fest überzeugt davon, dass die Vorsorgeuntersuchung ihr Leben gerettet hat. Wir sollten ihre medizinische Betreuung jedoch umgestalten, um sie vor unnötigen Behandlungen zu bewahren. Dazu müssen wir bei einem diagnostizierten Prostatakarzinom die Therapieentscheidung nur so lange aufschieben, bis wir einiger-

## Mögliche Komplikationen

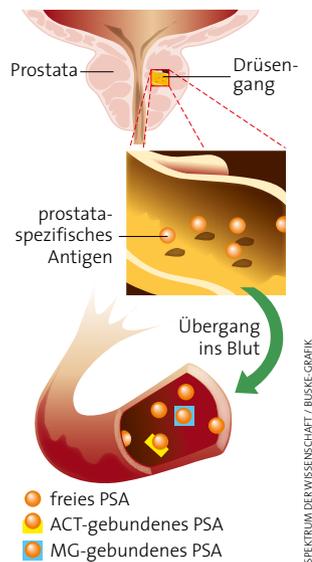
**Zur Behandlung des Prostatakarzinoms** zerstören die Ärzte das Tumorgewebe mittels Bestrahlung, oder sie entfernen die Prostata bei einem chirurgischen Eingriff. Auch Immun-, Chemo- oder Hormontherapien werden eingesetzt. Wegen der anatomischen Lage des Organs kommt es dabei häufig zu ernstesten Nebenwirkungen. Die Prostata, die einen Teil der Samenflüssigkeit produziert, sitzt direkt am Ausgang der Harnblase und unmittelbar vor dem Enddarm. Zudem ver-

laufen ganz in der Nähe Nervenstränge, die die Erektion steuern. Operation und Bestrahlung können deshalb zu Komplikationen wie Harninkontinenz und unkontrolliertem Stuhlabgang, Impotenz und rektalen Blutungen führen. Zu den Nebenwirkungen medikamentöser Therapien gehören der Verlust des Sexualtriebs, Impotenz, Gewichtszunahme, Knochenschwund, Hitzewallungen sowie Störungen der Herz- und Leberfunktion.



BRYAN CHRISTIE

Die Prostata produziert das prostataspezifische Antigen (PSA) und mischt es über ihre Ausführungsgänge dem Sperma bei. Aus verschiedenen Gründen – etwa bei Prostatakrebs – kann PSA auch ins Blut gelangen. Dort liegt es in freier Form vor oder ist an verschiedene Plasmaproteine gebunden, etwa an Antichymotrypsin (ACT) oder Makroglobulin (MG).



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / BUSKE-GRAFIK

maßen genau wissen, ob wir es mit einer aggressiven, potenziell tödlichen Erkrankung zu tun haben oder mit einem inaktiven Tumor.

Viele meiner Prostatakrebspatienten haben sich gegen einen sofortigen Eingriff entschieden und erhalten keinerlei Therapie. Stattdessen nehmen sie an einem Programm teil, das als »aktives Beobachten« bezeichnet wird – sie lassen regelmäßig ihren PSA-Wert messen und Prostatabiopsien durchführen. Eine Therapie kommt in Betracht, wenn der PSA-Wert rasch steigt, die Biopsie ein beschleunigtes Tumorgewachstum anzeigt oder die Einordnung des Tumorgewebes gemäß der Gleason-Klassifikation ergibt, dass die Krebszellen deutlich aggressiver geworden sind. Kürzlich kamen Experten im Auftrag der National Institutes of Health zu der Einschätzung, das aktive Beobachten sei »eine brauchbare Option, die Patienten mit einem Niedrigrisiko-Prostatakarzinom angeboten werden sollte«. Und eine in Kanada durchgeführte Langzeitstudie hat ergeben, dass etwa ein Prozent der Patienten, die sich für diese Option entscheiden, innerhalb von zehn Jahren an der Krebserkrankung sterben. Zum Vergleich: Bei der chirurgischen Entfernung der Prostata beträgt das Risiko tödlicher Komplikationen etwa 0,5 Prozent.

Die Entscheidung gegen eine Therapie ist nicht endgültig. Operation, Bestrahlung und andere Therapien stehen auch später noch zur Verfügung, und die vorliegenden Studiendaten zeigen, dass der Aufschub der Behandlung das klinische Resultat nicht verschlechtert. Für die Patienten, bei denen irgendwann tatsächlich ein Eingriff erforderlich wird, eignen sich dann möglicherweise neue Behandlungsansätze, die nur den erkrankten Teil der Prostata entfernen und deshalb weniger Nebenwirkungen haben. Tragfähige Studien zum Vergleich mit konventionellen Verfahren sind jedoch noch nicht abgeschlossen.

Für die vier Prozent der amerikanischen Patienten, bei denen der Tumor bereits in die Knochen oder andere Organe gestreut hat, gibt es noch keine Therapie, die zur vollständigen Heilung führt. Aber die verfügbaren Behandlungen wer-

den allmählich effektiver. Gängige Eingriffe zielen darauf ab, die Wirkung des Testosterons zu unterbinden, um das Wachstum der Tumoren zu hemmen. Es gibt jedoch stets einige Krebszellen, denen es irgendwann gelingt, diese chemische Kastration zu überwinden. Deshalb hat die amerikanische Arzneimittelzulassungsbehörde FDA (Food and Drug Administration) vor Kurzem zwei neue Therapieverfahren zur Behandlung des fortgeschrittenen Prostatakarzinoms bewilligt. Bei dem einen handelt es sich um den therapeutischen Krebsimpfstoff Provenge, der die Immunreaktion gegen den Tumor verstärken soll (siehe SdW 3/2012, S. 24). Die zweite neu zugelassene Therapie basiert auf dem Arzneistoff Abirateron, der die Tumorzellen selbst an der Produktion von Testosteron hindert. Studien zu beiden Behandlungsansätzen zeigen, dass sie die Überlebenszeit der Patienten im Mittel um vier Monate verlängern. Weitere Verfahren sind in der Entwicklung.

In den mehr als anderthalb Jahrzehnten, seit Herr H. sich gegen eine Therapie entschied, haben wir viel über Prostatakrebs gelernt. Das ermöglicht uns heute, die medizinische Betreuung an die individuelle Situation des Patienten anzupassen, statt alle Betroffenen gleich zu behandeln. Wir Ärzte sollten zudem die Botschaft mitnehmen, dass wir sowohl uns selbst als auch unseren Patienten stets klarmachen müssen, über welche gesicherten Erkenntnisse wir tatsächlich verfügen und was wir nicht wissen. Und wir sollten den Mut haben, uns an der besten wissenschaftlichen Evidenz zu orientieren, statt etablierten Glaubensgrundsätzen zu folgen. ~

#### DER AUTOR



**Marc B. Garnick** ist Onkologe und Spezialist für Prostatakrebs. Er arbeitet an der Harvard Medical School und am Beth Israel Deaconess Medical Center, beide in Boston (USA). Gemeinsam mit Kollegen gibt er den Jahresbericht der Harvard Medical School über Prostataerkrankungen heraus. Der Autor berät außerdem mehrere Risikokapitalfirmen bei Investitionen in neu gegründete Unternehmen, die innovative Therapien gegen Prostatakrebs entwickeln.

#### QUELLEN

- Chou, R. et al.:** Screening for Prostate Cancer: A Review of the Evidence for the U.S. Preventive Services Task Force. In: *Annals of Internal Medicine* 155, S. 762–771, 2011
- Garnick, M. B., MacDonald, A. (Hg.):** 2012 Annual Report on Prostate Diseases. Harvard Health Publications, 2012
- McNaughton-Collins, M. F., Barry, M. J.:** One Man at a Time – Resolving the PSA Controversy. In: *The New England Journal of Medicine* 365, S. 1951–1953, 2011

#### WEBLINKS

[www.krebsinformationsdienst.de](http://www.krebsinformationsdienst.de)  
Das Deutsche Krebsforschungszentrum informiert ausführlich rund um Krebs und seine Früherkennung.

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1159803](http://www.spektrum.de/artikel/1159803)

Dieses Heft spricht Ihnen aus der Seele.

**GEOkompakt** Nr. 32  
Die Grundlagen des Wissens

**Die SUCHE nach dem ICH**

Wer wir sind - und was wir wollen

**DOSSIER**  
Wenn das Ich aus dem Takt gerät

**PSYCHOANALYSE**  
Als Sigmund Freud die Seele entdeckte

**EMOTIONEN**  
Weshalb Gefühle wichtig für das Überleben sind

**DAS UNBEWUSSTE**  
Die Macht, die uns wirklich lenkt

GEOkompakt Die Suche nach dem Ich

\* Heft ohne DVD: 8,50 € (A: 9,80 €/CH: 17,60 sfr).  
Heft mit DVD: 15,90 € (A: 17,90 €/CH: 33,00 sfr).



Heft 8,50 € –  
mit DVD 15,90 €\*



## PHYSIOLOGIE

# Warum ist Luftanhalten so schwer?

Nicht Sauerstoffmangel oder Kohlendioxidüberschuss im Blut zwingen uns zum unwillkürlichen Luftholen, nachdem wir einige Zeit den Atem angehalten haben. Im Verdacht stehen vielmehr Signale vom Zwerchfell an das Gehirn.

Von Michael J. Parkes

**L**ange den Atem anzuhalten fällt schwer. Gemeinhin gelingt das nicht einmal eine Minute lang. Was zwingt uns, selbst gegen unseren Willen, zum nächsten Atemzug? Überraschenderweise kennen Physiologen die Antwort noch nicht. Sie haben aber einen Verdacht.

Ein Erwachsener, der sich ausruht, holt in der Minute ungefähr zwölfmal Luft. Das geschieht normalerweise völlig automatisch. Die Atmung gehorcht dann einem inneren Rhythmus – dem Atemzyklus –, der genauso lebenswichtig und unverzichtbar ist wie die Taktgebung des Herzschlags. Wir müssen nicht bewusst mithelfen, wenn das Gehirn das Luftholen genau auf die körperlichen Bedürfnisse abstimmt. Doch anders als beim Herzschlag können wir, wenn wir wollen, den Atem eine gewisse Zeit anhalten, zum Beispiel um kein Wasser oder keinen Staub in die Lunge zu bekommen, um den Brustkorb vor einer Kraftleistung zu stabilisieren oder um länger in einem Zug zu sprechen. Auch das gelingt im normalen Alltag mühelos, ohne dass wir darüber nachdenken.

Tiere konnte noch niemand dazu bringen, die Luft freiwillig mehr als ein paar Sekunden lang anzuhalten, obwohl alle Säuger das unter manchen Umständen tun. Wissenschaftliche Experimente auf dem Gebiet sind deswegen nur am Menschen möglich. Allerdings verbieten sich wegen des gesundheitlichen Risikos viele theoretisch denkbare

Versuche. Früher waren manche Forscher jedoch wenig zimperlich und erzielten mitunter interessante Ergebnisse, von denen einige zum Verständnis dessen beitragen, was physiologisch beim Luftanhalten abläuft. Ein praktisches Ziel solcher Forschungen heute besteht darin, medizinische Behandlungen zu erleichtern, die sich bei angehaltenem Atem besser durchführen lassen, so etwa zielgenaue Bestrahlungen bei Brustkrebs.

Schon um 1930 beschrieb Edward C. Schneider, ein Wegbereiter solcher Studien, wie eine geübte Versuchsperson bei geeigneter Vorbereitung mittels ausgefeilter Techniken geschlagene 15 Minuten und 13 Sekunden die Luft anzuhalten vermochte. Auf ähnliche Weise brachte es 1959 der Physiologe Hermann Rahn (1912–1990) von der University at Buffalo (ebenfalls im Staat New York) im Selbstversuch auf fast 14 Minuten. Unter anderem hatte er für einen verlangsamten Stoffwechsel gesorgt, vorher hyperventiliert und reinen Sauerstoff geatmet.

Weshalb reichen wir gewöhnlich nicht entfernt an solche Leistungen heran? Bei Raumluft unter Atmosphärendruck geben die meisten Menschen, selbst wenn sie vorher noch so tief einatmen, spätestens nach einer Minute auf. Dabei enthält die volle Lunge genug Sauerstoff für vier Minuten. Und auch die Kohlendioxidkonzentration – genauer gesagt der Partialdruck des Atemgases – im Blut erreicht so schnell keinen kritischen Wert.

Unter Wasser fällt es leichter, länger als eine Minute nicht zu atmen. Wer fünf Minuten schaffen will, braucht aber besondere Vorbereitungen.

Unter Wasser gelingt Luftanhalten besser. Vielleicht spielt dabei mit, dass man kein Wasser in die Lunge bekommen möchte. Inwieweit Menschen den klassischen Tauchreflex besitzen, über den viele Vögel und Säugetiere verfügen, ist noch nicht geklärt. Bei diesen Arten fährt beim Tauchen der Stoffwechsel herunter, und nur die lebensnotwendigen Organe werden noch mit frischem Blut versorgt.

Wie schon Schneider beobachtete und viele Laborstudien seither bestätigten, ist es zumindest unter den Verhältnissen auf Meereshöhe unmöglich, absichtlich so lange nicht zu atmen, bis man ohnmächtig umkippt, weil das Gehirn nicht mehr genug Sauerstoff erhält. Zu den wenigen Ausnahmen gehören Wettbewerbe im Extremsport. Angeblich gab es auch Einzelfälle, bei denen Kinder den Atem bis zur Bewusstlosigkeit angehalten haben. Doch im Allgemeinen lässt uns ein unwillkürlicher innerer Mechanismus nach Luft schnappen, lange bevor der Sauerstoff nicht mehr reicht oder sich zu viel Kohlendioxid gebildet hat. Was uns allerdings jenseits eines Grenzpunkts (englisch: break point) – dem von Atemforschern benutzten Ausdruck – unwiderstehlich zum Atemholen zwingt, ist schwer zu erkennen.

Denkbar wäre, dass spezielle Messfühler im Körper die physiologischen Veränderungen beim Luftanhalten überwachen und rechtzeitig Alarm schlagen. In Frage kämen etwa Sensoren, die eine übermäßig lang andauernde Dehnung von Lunge und Brust registrieren. Eine Rolle könnten auch spezielle Fühler spielen, die niedrige Sauerstoff- oder überhöhte Kohlendioxidkonzentrationen im Blut oder im Gehirn erfassen. Tatsächlich wirken solche Sensoren an der Regulierung des normalen Atmens mit. Doch was das Luftanhalten betrifft, ließ sich bisher kein Zusammenhang mit ihnen nachweisen.

Der Beteiligung von Volumensensoren in der Lunge sind mehrere Forscher nachgegangen. Zu ihnen zählen Helen R. Harty und John H. Eisele vom Londoner Charing Cross Hospital, die dort bei dem Atemforscher Abe Guz arbeiteten, sowie Patrick A. Flume, damals an der University of North Carolina in Chapel Hill. Seit den 1960er Jahren haben sie unabhängig voneinander zahlreiche experimentelle Studien

zu der Frage durchgeführt. Wie sie feststellten, vermögen Empfänger einer fremden Lunge, bei denen die Nervenverbindungen zwischen dem transplantierten Organ und dem Gehirn durchtrennt sind, die Luft nicht ungewöhnlich lange anzuhalten. Ebenso wenig gelingt das Patienten bei einer Spinalanästhesie, bei der unter anderem die Sinnesrezeptoren der Brustmuskulatur blockiert werden. Wohlgermerkt erfasste die Betäubung bei den Versuchen nicht das Zwerchfell – ein für unsere Fragestellung wichtiger Umstand.

Ebenso können anscheinend sämtliche bekannten Chemorezeptoren für Sauerstoff und Kohlendioxid, die beim normalen Atmen mitwirken, als Verursacher des unwiderstehlichen Drangs zum Luftschnappen ausgeschlossen werden. Soweit bekannt, besitzt der Mensch Sensoren für einen niedrigen Blutsauerstoffgehalt einzig in den beiden Hals- oder Kopfschlagadern, den Karotiden. Diese Strukturen liegen an deren Gabelung in jeweils einen vorderen und hinteren Ast – etwas oberhalb vom Kehlkopf. Dort befinden sich auch Messfühler, die einen erhöhten Kohlendioxidwert melden. Der wird außerdem von Rezeptoren im Hirnstamm erfasst. Dieses Hirngebiet steuert die regelmäßige Atmung sowie andere nicht willentlich beeinflusste Körperfunktionen.

### Wiederholter Atemverzicht trotz Sauerstoffmangel

Würden Sauerstoffrezeptoren den unbezwingbaren Atemdrang am Grenzpunkt veranlassen, dann müssten Menschen die Luft bis zur Bewusstlosigkeit anhalten können, wenn diese Rückmeldung ausfällt. Das Team von Karlman Wasserman an der University of California in Los Angeles hat das an Patienten überprüft, bei denen die betreffenden Nervenbahnen zwischen den Halsarterien und dem Hirnstamm durchtrennt waren. Tatsächlich holten diese aber stets frühzeitig von allein wieder Luft.

Wenn besagter Grenzpunkt allein vom Partialdruck des Sauerstoffs und/oder Kohlendioxids abhängen würde, müsste es dem Menschen außerdem unmöglich sein, über kritische Blutwerte hinaus die Luft anzuhalten. Doch das vermag er durchaus, wie eine Reihe von Versuchen zeigte, bei denen Forscher die geatmeten Gase manipulierten. Ebenso wenig könnte dann jemand die Luft gleich ein zweites Mal lange anhalten, bevor sich die Atemgasspiegel im Blut wieder normalisiert haben.

Dass dies ohne Weiteres gelingt, hatten Forscher schon Anfang des 20. Jahrhunderts per Zufall entdeckt. 1954 untersuchte Ward S. Fowler von der Mayo Clinic in Rochester (Minnesota) das Phänomen dann genauer. Die Probanden erhielten nach dem ersten Luftanhalten ein Gasgemisch mit sehr wenig Sauerstoff. Trotzdem konnten sie das Atmen sofort wieder unterdrücken – was sie ohne Schwierigkeiten sogar noch ein drittes Mal schafften, obwohl die Blutwerte nun schon ziemlich schlecht wurden. Weiteren Studien zufolge ist es dabei völlig gleichgültig, wie oft oder stark jemand dazwischen sauerstoffarme Luft eingesogen hat. Es spielte also keine Rolle, ob die Versuchsperson kräftig oder nur einmal

#### AUF EINEN BLICK

##### ERZWUNGENES ATEMHOLEN

- 1 Viel eher als physiologisch nötig geben wir beim Luftanhalten auf, weil der **Drang zum Atmen** übermächtig wird.
- 2 Forscher sind dem Grund dafür nachgegangen, indem sie verschiedene Muskeln oder Nerven betäubten. Wie sich dabei zeigte, scheint das **Zwerchfell** die entscheidende Rolle zu spielen.
- 3 Dieser wichtigste Atemmuskel schickt offenbar Informationen über Dauer und Grad seiner Anspannung an das Gehirn. Deren Beachtung können wir beim Luftanhalten zunächst durch **Willenskraft** unterdrücken.
- 4 Doch irgendwann gewinnt der nie ruhende, im Stammhirn generierte **natürliche Atemrhythmus** die Oberhand. Mit Übung und Tricks lässt sich dieser Zeitpunkt immerhin hinausschieben.

## Zwerchfell im Verdacht

Beim Luftanhalten gibt es einen »Grenzpunkt«, an dem der Drang zum Ausatmen unwiderstehlich wird. Die Zeit, bis er auftritt, lässt sich zwar durch Übung sowie durch Manipula-

tion der Atemgase verlängern. Doch weiß niemand bisher wirklich, welcher Mechanismus dahintersteckt – was also seinen Zeitpunkt bestimmt.

### AUSGESCHLOSSENE HYPOTHESEN

#### Chemorezeptoren für Blutwerte:

Die Vermutung liegt nahe, die Konzentration der Atemgase im Blut bestimme den Zeitpunkt, an dem wir nicht länger die Luft anhalten können. Körper-eigene Sensoren für Sauerstoff finden sich aber nur in den Halsschlagadern; der Kohlendioxidspiegel kann außerdem im Hirnstamm registriert werden. Patienten, bei denen die Nervenbahnen zwischen diesen Chemorezeptoren und dem Gehirn durchtrennt waren, konnten in Versuchen jedoch nicht länger die Luft anhalten als Gesunde. Außerdem sind am Grenzpunkt die Blutspiegel der Atemgase noch kaum verändert.

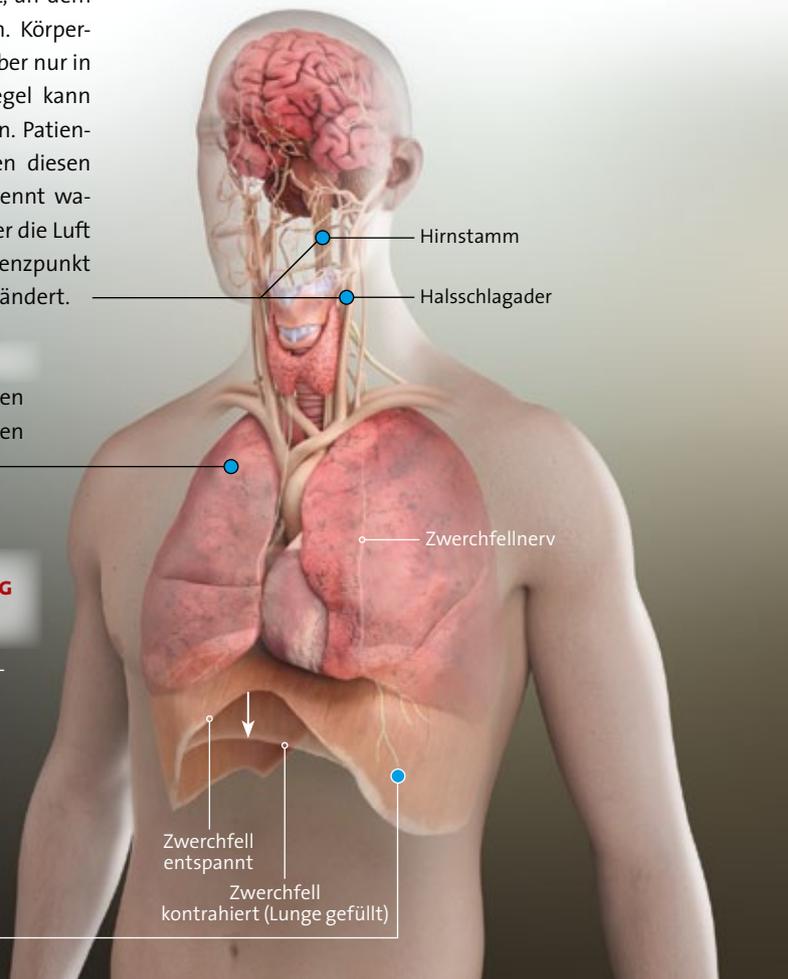
#### Volumensensoren in Lunge oder Brustkorb:

Wenn die betreffenden Nervenverbindungen ausgeschaltet sind, wirkt sich das nicht auf den Grenzpunkt aus.

### DIE DERZEIT ÜBERZEUGENDSTE ERKLÄRUNG

#### Nervensignale des Zwerchfells ans Gehirn:

Das Zwerchfell muss beim Luftanhalten ungewöhnlich lange kontrahiert bleiben und sendet Signale über diesen immer unangenehmeren Zustand an das Gehirn. Dort fällt irgendwann die Entscheidung, dass die Situation nicht mehr tragbar ist. Diese Hypothese passt am besten zu den Ergebnissen der vorliegenden Untersuchungen.



schwach geatmet hatte. 1974 zeigten John R. Rigg und Moran Campbell von der McMaster University in Hamilton (Ontario, Kanada) schließlich, dass ein mehrfaches Luftanhalten direkt nacheinander selbst dann möglich ist, wenn man dazwischen nur zu atmen versucht, es aber nicht tun kann, weil Mund und Nase verschlossen sind.

Demnach scheint der Gasaustausch nicht der unmittelbare Grund für den unwiderstehlichen Drang zum Luftholen zu sein. Was käme stattdessen in Frage? Nach tiefem Einatmen, bei dem sich die beteiligten Muskeln kontrahieren, hat der Brustkorb die Tendenz, von allein wieder einzusinken – es sei denn, man hält ihn aktiv gedehnt. Liegt in dieser Anspannung vielleicht der Schlüssel dafür, dass wir den Atem

nur eine begrenzte Zeit anhalten können? Stecken hinter dem automatischen Luftholen irgendwelche neuronalen oder mechanischen Kontrollmechanismen, welche die Atemmuskeln ohne unser Wollen entspannen und dann neuerlich aktivieren? Das führt zugleich zu der Frage, was beim Luftanhalten mit unserem unwillkürlichen Atemrhythmus geschieht. Läuft er weiter, auch wenn wir verhindern, dass ihm die Muskeln gehorchen?

Eine Hauptrolle beim unwillkürlichen normalen Atmen spielt das Zwerchfell – eine Bezeichnung, die sich von den alten deutschen Wörtern für »quer« (twerah) und für »Haut« ableitet. Beim Ausatmen entspannt es sich und wölbt sich nach oben. Beim Einatmen zieht es sich zusammen und

wird flach. Dadurch dehnt es die Lunge Richtung Bauchraum (siehe Kasten S. 39). Ein normaler Atemzyklus beginnt mit Nervenimpulsen vom Atemzentrum im Hirnstamm. Sie gelangen über den rechten und linken Zwerchfellnerve zum Zwerchfell, das sich daraufhin kontrahiert. Offenbar existiert ein zentraler neuronaler Mechanismus, der diesen Befehl rhythmisch, also für jeden Atemzug, generiert.

Diesen Mechanismus beim Menschen direkt zu untersuchen, etwa durch elektrische Ableitungen am Hirnstamm oder an den Zwerchfellnerven, verbietet sich aus ethischen Gründen und ist bisher auch technisch unmöglich. Allerdings kann man ihn indirekt erkennen – über die elektrische Aktivität in der Zwerchfellmuskulatur, den Druck in Atemwegen und Lunge sowie bestimmte Reaktionen des autonomen Nervensystems. Zum Beispiel schwankt der Herzschlagrhythmus beim Atmen etwas: Beim Einatmen wird er ein wenig schneller, beim Ausatmen langsamer.

### Zwerchfell an Gehirn: Luftschnappen angesagt

An solchen Effekten erkannte Emilio Agostoni von der Universität Mailand 1963, dass das Atemzentrum auch während des Luftanhaltens Impulse zu geben scheint. Tatsächlich setzt dieser innere Signalgeber offenbar nie aus, wie 2003 und 2004 die Doktorandin Hannah E. Cooper, der Anästhesist Thomas H. Clutton-Brock und ich an der University of Birmingham mit ähnlichen Messungen zeigten.

Beim Luftanhalten unterdrücken wir anscheinend nur die Reaktion des Zwerchfells auf einen neuerlichen solchen Befehl und halten es weiter angespannt. Andere Muskeln und Strukturen, die beim normalen Atmen mitwirken, scheinen nach allen bisherigen Befunden nicht beteiligt zu sein. Das könnte auch bedeuten: Über den Zeitpunkt des unwillkürlichen Luftschnappens entscheidet eine sensorische Rückmeldung vom Zwerchfell ans Gehirn – etwa über die Dauer seiner Anspannung oder die Stärke seiner Beanspruchung.

In diesem Fall müssten Menschen, deren Zwerchfell gelähmt ist, so dass es keine Signale an das Gehirn zu schicken vermag, die Luft viel länger anhalten können, vielleicht im Prinzip sogar unbegrenzt. Einen in der Tat atemberaubenden Versuch dazu wagte Moran Campbell Ende der 1960er Jahre am Londoner Hammersmith Hospital mit zwei gesunden Versuchspersonen. Sie willigten ein, bei vollem Bewusstsein eine intravenöse Injektion mit Curare zu erhalten, dem Pfeilgift südamerikanischer Indianer. Die Substanz lähmte ihre gesamte Skelett- und auch die Atemmuskulatur – bis auf einen Arm, bei dem die Hauptarterie abgebunden worden war. Die Probanden erhielten eine Atemmaske, in die ein Ventilator sauerstoffreiche Luft blies. Zur Simulation des Luftanhaltens wurde er abgestellt. Die Teilnehmer sollten mit dem Arm ein Zeichen geben, sobald sie wünschten, dass er wieder angeschaltet würde, weil sie den unwiderstehlichen Drang zum Luftholen verspürten.

Nur – sie gaben kein Signal. Offenbar fühlten sie sich wohl, und nach ungefähr vier Minuten brach der überwachende Anästhesist ab, weil der Kohlendioxidspiegel in ihrem Blut

kritische Werte erreichte. Nachher, als die Lähmung verschwunden war, erzählten beide Versuchspersonen, sie hätten kein Erstickengefühl verspürt und auch sonst nichts Unangenehmes empfunden.

Ganz wenige Male nur trauten sich Forscher später, das tollkühne Experiment zu wiederholen. Seltsamerweise konnten sie das Ergebnis von Campbell dabei nicht bestätigen. Ihre Probanden vermeldeten den unwiderstehlichen Drang zum Luftholen stets schon sehr früh, als der Kohlendioxidspiegel im Blut noch kaum gestiegen war. Vielleicht fanden sie den Beatmungsschlauch, der den Kehlkopf offen hielt –

## Die Tricks der Profis

**Manche Menschen, etwa Apnoetaucher, betreiben Luftanhalten** trotz des damit verbundenen Risikos als Sport. Hauptsächlich wenden sie die folgenden Tricks an. Solche Versuche sollten aber nur unter ärztlicher Überwachung durchgeführt werden.

### ÜBERVOLLE LUNGE:

Mit Pumpbewegungen des Mundbodens drückt man zusätzliche Luft in die vollgeatmete Lunge. Durch den so erzeugten Überdruck droht jedoch eine arterielle Luft- oder Gasembolie: Gasblasen in den Gefäßen können im Gehirn oder den Herzkranzgefäßen Schäden anrichten.

### VERMINDERTER STOFFWECHSEL DURCH TIEFE ENTSPANNUNG:

In Ruhe verbraucht der menschliche Körper etwa 0,36 Liter Sauerstoff pro Minute. Zwölf Stunden fasten und ganz ruhig liegen senkt den Verbrauch auf 0,27 Liter. Die Luft reicht dann ein Drittel länger.

### REINEN SAUERSTOFF ATMEN:

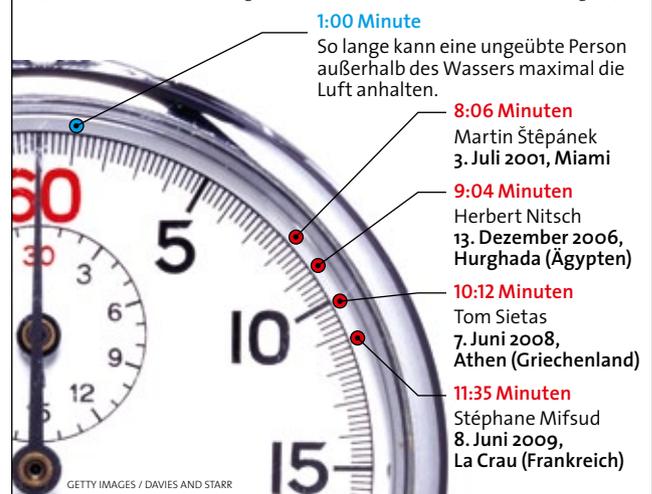
Der Sauerstoffgehalt normaler Luft beträgt rund 21 Prozent. Mit reinem Sauerstoff kann man den Atem etwa doppelt so lange anhalten wie sonst. Eine Gefahr dabei ist, dass Teile der Lunge beim Ausatmen kollabieren.

### HYPERVENTILIEREN:

Vorher mehrmals schnell ein- und ausatmen, senkt den Kohlendioxidgehalt im Blut. Mancher kann die Luft dann doppelt so lange anhalten. Andererseits verbraucht man nun mehr Sauerstoff und bildet mehr Kohlendioxid. Bei Hyperventilation wird das Gehirn schlechter mit Blut versorgt, weil die notwendige Rückkopplung, die auf Kohlendioxidwerten beruht, nicht erfolgt.

### EINIGE NEUERE REKORDE

(erzielt mit normaler Luft, reglos mit dem Gesicht nach unten im Wasser liegend)



eine Sicherheitsmaßnahme, auf die Campbell verzichtet hatte –, einfach zu unangenehm und wollten die Sache schnell hinter sich bringen. Vielleicht waren sie sich auch der Lebensgefahr stärker bewusst.

Weitere Hinweise darauf, dass eine Zwerchfelllähmung tatsächlich ein längeres Luftanhalten zulässt, lieferten jedoch weniger riskante Versuche von Mark I. M. Noble, die er zusammen mit anderen Forschern durchführte, als er in den 1970er Jahren bei Abe Guz in London arbeitete. Statt die gesamte Muskulatur zu lähmen, betäubte das Team nur die beiden Zwerchfellnerven, lähmte somit allein diesen Muskel. Tatsächlich konnten die Teilnehmer in diesem Fall den nächsten Atemzug etwa doppelt so lange wie sonst hinauszögern. Auch hatten sie ein weniger unangenehmes Gefühl als sonst.

### Noch ein Tipp: Kopfrechnen!

Vieles spricht für die Vermutung, dass wir beim Luftanhalten nicht etwa den Atemzyklus stoppen, sondern gegen den inneren Rhythmus das Zwerchfell kontrahieren und mit dessen Hilfe den Brustkorb geweitet halten. Für das Zwerchfell ist das allerdings eine Ausnahmesituation. Man kann sich gut vorstellen, dass es entsprechende neuronale Signale ans Gehirn sendet. Dieses achtet zunächst nicht sehr darauf, so dass wir nur ein leicht unangenehmes Gefühl haben. Doch irgendwann stuft es die Situation als nicht mehr hinnehmbar ein. Dann ist der physiologische Grenzpunkt erreicht, an dem der automatische Atemrhythmus die Kontrolle zurückgewinnt. Übrigens hängt der Zeitpunkt auch von der momentanen Stimmung oder Motivationslage ab und lässt sich durch Ablenkung wie etwa Kopfrechnen hinauszögern.

Wohlgemerkt liefert dieser Deutungsansatz lediglich die einfachste übergreifende Erklärung für die vorliegenden Versuchsergebnisse. Einschränkend ist zu sagen, dass bei manchen der angeführten Studien die Teilnehmerzahl zu klein für verallgemeinernde Schlussfolgerungen war. Höchstwahrscheinlich wird man sie wegen ihrer Gefährlichkeit aber nicht wiederholen können. Auch lässt sich nicht ausschließen, dass noch entscheidende Mosaiksteinchen im Gesamtbild fehlen.

Zudem passt ein noch nicht erwähnter Befund bisher nicht recht zu der geschilderten Hypothese. Es geht um ein weiteres fragwürdiges Experiment von Noble und Guz. Bei drei gesunden Personen narkotisierten die Forscher zwei Hirnnerven: den Vagus, der an der Regulation vieler innerer Organe beteiligt ist, und den Zungen-Rachen-Nerv, der auch den Kehlkopf innerviert. Daraufhin konnten die Probanden die Luft dreimal so lange anhalten wie vorher. An sich sollte das Zwerchfell von der Betäubung verschont geblieben sein – es sei denn, über einen bisher unbekanntem Seitenast des Vagus könnten auch von dort Signale ans Gehirn gelangen. Dass ein Kehlkopfmuskel beim Luftanhalten eine Rolle spielt, ist hingegen weniger wahrscheinlich: Wie der plastische Chirurg Martyn Mendelsohn aus Sydney 1993 mit einer eingeführten winzigen Kamera zeigte, bleibt die Stimmritze beim Luftanhalten gewöhnlich die ganze Zeit geöffnet.

Weshalb interessieren sich Mediziner überhaupt für die Grenzen des Luftanhaltens? Ein Grund ist, dass ein Patient in manchen Situationen ganz still liegen muss und nicht einmal atmen darf. Das gilt insbesondere für die Bestrahlung von Brusttumoren, die nur die Krebszellen töten, aber das angrenzende gesunde Gewebe möglichst verschonen soll. Eigentlich müsste der Patient dabei minutenlang die Luft anhalten, was aber nicht möglich ist. Deshalb gönnt man ihm zwischendurch immer wieder eine Atempause, für die man die Prozedur unterbricht. Danach kann der Tumor gegenüber dem Gerät aber jedes Mal etwas verschoben sein. Unterstützt von Stiftungen des Universitätskrankenhauses von Birmingham, prüfen der Medizinphysiker Stuart Green, die klinische Onkologin Andrea Stevens, Clutton-Brock und ich derzeit, ob es möglich ist, durch Maßnahmen, die ein längeres Luftanhalten erlauben, solche Bestrahlungstherapien zu verbessern.

Es gibt aber auch ganz handfeste Nutzenanwendungen solcher Forschungen – etwa für Polizisten bei Verhaftungen. Wir wissen inzwischen, dass sich die Höchstdauer der Atemunterbrechung bei gesteigertem Stoffwechsel, zusammengepresstem Brustkorb, vermindertem Sauerstoff- und erhöhtem Kohlendioxidspiegel im Blut verringert. Das sollten Ordnungskräfte bedenken, wenn sie einen sich heftig wehrenden Menschen auf den Boden drücken. Ein Forscherteam um Andrew R. Cummin am Londoner Charing Cross Hospital führte dazu im Jahr 2000 Untersuchungen an acht gesunden Personen durch. Diese mussten eine Minute lang mäßig angestrengt Fahrrad fahren, dann maximal ausatmen – und nun die Luft anhalten. Länger als 15 Sekunden schaffte das niemand. Die Sauerstoffwerte im Blut sanken eklatant, und bei zwei Teilnehmern wurde der Herzschlag unregelmäßig. Das zeigt, wie wichtig es ist, bei solchen Festnahmen behutsam vorzugehen. ~

#### DER AUTOR



**Michael J. Parkes** lehrt angewandte Physiologie an der School of Sports and Exercise Sciences der University of Birmingham (England). Außerdem forscht er an der Wellcome Trust Clinical Research Facility, einer Einrichtung innerhalb des University Hospitals Birmingham NHS Foundation Trust.

#### QUELLEN

- Agostoni, E.:** Diaphragm Activity during Breath Holding: Factors Related to its Onset. In: *Journal of Applied Physiology* 18, S. 30–36, 1963
- Parkes, M. J.:** Breath-Holding and its Breakpoint. In: *Experimental Physiology* 91, S. 1–15, 2006
- Shea, S. A.:** Behavioural and Arousal-Related Influences on Breathing in Humans. In: *Experimental Physiology* 81, S. 1–26, 1996

#### WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1159804](http://www.spektrum.de/artikel/1159804)



## Unser besonderer Tipp:



### LERNPAKET EXPERIMENTE MIT DEM STIRLINGMOTOR

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

Bestell-Nr. 3526 € 149,90

Dieses Franzis-Lernpaket enthält ein voll funktionsfähiges Stirlingmotor-Modell, einen elektrischen Generator, ein Experimentiersteckbrett und viele weitere Elektronikbauteile. Damit können Sie Funktionsweise und Einsatzmöglichkeiten des Stirlingmotors praktisch erfahren und

erforschen. Das Modell ist komplett vormontiert und kann nach dem Zusammenbau des Brenners sofort in Betrieb genommen werden. Dazu brauchen Sie nichts weiter als handelsüblichen Brennspritus (nicht enthalten). Das Handbuch führt vom einfachen Bauteil zum fertigen Projekt. Die physikalischen Grundlagen und die unterschiedlichen Typen der Stirlingtechnik werden genau erklärt.



### IPSOL 4/4S SOLAR

Ladeschale mit eingebautem 2400-mAh-Lithium-Polymer-Akku für iPhone 4/4S

mit Micro USB-Kabel, Farbe: schwarz, Inprosolar

Bestell-Nr. 3716 € 89,-

Die Ladeschale verschmilzt mit dem iPhone zur einer Einheit. Sie ist

sehr ergonomisch in der Handhabung und löst mit dem zusätzlichen Energiespeicher jedes Problem des täglichen Nachladens.

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



### NACHTSICHTGERÄT NIGHT EYE 3x42

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

Bestell-Nr. 3655 € 199,-

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



### LEONARDO DA VINCI VITRUV MANN, HOLZBAUSATZ

13 Einzelteile, L x B x H: 210 x 210 x 290 mm, Maßstab: 1:16, Revell

Bestell-Nr. 3433

€ 29,95

Für viele war Leonardo der große Humanist der Renaissance. Er versuchte alles über den Menschen nachzuvollziehen – Proportionen, Funktionen und Emotionen. Seine berühmteste Studie hierzu ist der Vitruv-Mann. Er stellt ein echtes Stück Kunstgeschichte dar, das nun erstmals als Holzmodell erhältlich ist.

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

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

### WISSENSBECHER MATHEMATIK

Bestell-Nr. 3430 € 9,95

### WISSENSBECHER PHYSIK

Bestell-Nr. 3431 € 9,95

### WISSENSBECHER CHEMIE

Bestell-Nr. 3432 € 9,95



### DON'T WORRY, BE HAPPY

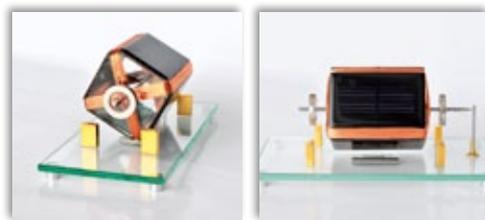
#### Betonobjekt

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

Bestell-Nr. 3663 € 29,90

Mundwinkel rauf – lassen Sie sich nicht unterkriegen!

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



### MENDOCINO-MOTOR, FERTIGMODELL Im Magnetfeld frei schwebender Solarmotor

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

Bestell-Nr. 3652 € 159,-

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

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

Ein Video zum Mendocino-Motor finden Sie hier: [www.science-shop.de/artikel/1156118](http://www.science-shop.de/artikel/1156118)

Ebenfalls lieferbar als Bausatz (Löten erforderlich):

Bestell-Nr. 3653 € 139,-



### DIE KNOTENBOX

50 Knoten-Klassiker für Freizeit, Sport und Alltag

Mit 2 Schnüren zum Üben in Metallbox, moses

Bestell-Nr. 3617 € 12,95

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

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

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



### BRESSER VISIOMAR MICROSET 40X-1024X

Mikroskop-Set mit USB-Anschluss

Kunststoffkoffer, Staubschutzhülle, 230-V-Netzteil (5,5 V / 200 mA), Präparatebox mit 5 Dauerpräparaten; Objektträgern und Deckgläsern, Präparierbesteck, Garnelenbrutanlage, MikroOkular II mit Bildbearbeitungssoftware, Meade

Bestell-Nr. 3618 € 89,-

Hochwertiges Schülermikroskop mit Barlow-Linsen-Zoom-System und PC-Okular

Ausgestattet mit einer Barlow-Linse, die die Vergrößerung des Mikroskops bis zu 1,6-fach steigert, ein MikroOkular I (PC-Okular mit 640x480 Pixel Auflösung), Ulead-Photo-Explorer-Bildbearbeitungssoftware, USB-Verbindungskabel, 2 optische Okulare und Netzadapter sowie weiterem nützlichen Starter-Zubehör wie: 5 Dauerpräparate, 10 Objektträger, 20 Deckgläser und Staubschutzhülle. Beobachtungsobjekte: Kleinorganismen, Insekten, Pflanzen, kleinere Mineralien.

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



**NEU**

**CAZORLA 8 x 56 PREMIUM**

Fernglas mit Tragetasche aus Nylon

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

Bestell-Nr. 3665 € 189,-

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



**NEU**

**SPIELE-SET LATEIN**

In Vino Veritas – das lat. Weisheitenspiel / Simplicissimus – das lat. Schimpfwortspiel  
2012, je 40 Spielkarten, Anaconda

Bestell-Nr. 3715 € 15,90

Zwei Lege- und Merkspiele, die Ihre Lateinkenntnisse auf vergnügliche Art und Weise auffrischen!

Die Karten liegen verdeckt auf dem Tisch. Die Aufgabe ist es, möglichst viele Wortpaare zu sammeln.

Für 2–6 Spieler ab 8 Jahren. Dauer: 10–15 Minuten.

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



**NEU**

L x B x H: 365 x 85 x 175 mm, Ø Hauptrotor: max. 360 mm / 70 mm, Fluggewicht: 270 g, Laden über beiliegendes Ladegerät, Controller mit 6 x 1,5-V-AA-Batterien (nicht enthalten), Revell

Bestell-Nr. 3717 € 99,-

Ready-to-Fly-MHZ-Helikopter in auffälligem Design mit abnehmbarer Kamera für Foto- und Videoaufnahmen und über die Fernsteuerung schaltbarer LED-Beleuchtung. Der Helikopter hat sehr gute Flugeigenschaften durch das elektronische Kreiselssystem (Gyro) und ist leicht und gut beherrschbar. Das Laden erfolgt über das mitgelieferte Ladegerät.

Indoorgeeignet – outdoor nur bei Windstille. Altersempfehlung: ab 15 Jahren, Einsteigermodell

**Portofreie Lieferung nach Deutschland und Österreich**



**CHARLES DESIGN-NUSSKNACKER**

Polykarbonat/Aluminium, mit außergewöhnlicher Mechanik zum Nüsseknacken, schwarz

Design: Ralf Webermann, 62 x 70 mm, Gewicht: 145 Gramm, Troika

Bestell-Nr. 2842 € 32,90

Lieben Sie Nüsse? Wenn Sie bisher dachten, Nüsse zu knacken wäre eine lästige Angelegenheit, belehrt Sie CHARLES eines Besseren. Ein verblüffendes und sauberes Prinzip: Die Nüsse werden mittels Schleuderkraft im Deckel geknackt. Die Nussschalen werden sauber aufgefangen – keine Krümel mehr auf dem Tisch!



**NEU**

**HERR GAUSS UND DIE ZUFRIEDENHEIT Sandsteinobjekt**

Rahmen von Hand gegossen, Bild von Hand gemalt, jedes Bild ist ein Unikat. Acryl auf Leinwand. Größe: 13 x 18,5 x 4 cm, (H x B x T), Gewicht: 1400 g, inoecem

Bestell-Nr. 3661 € 49,90

Das Bild versteht sich als Appell, nicht immer nur zweifelt dem Glück hinterherzujagen. Auf witzige Art wird dieser Gedanke durch die Überlagerung des Spektrums von Glück bis Unglück (rot bis dunkelgrau) durch die gauss'sche Normalverteilung versinnbildlicht. Sie zeigt die normalverteilte Anzahl an Stimmungen im Leben eines jeden.



**ALBERT-EINSTEIN-BÜSTE aus Biskuitporzellan**

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

Bestell-Nr. 3651 € 24,90

Ein Schmuckstück für Regal oder Schreibtisch!

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



**PEN ULTIMATE**

Bestell-Nr. 1667 € 13,90

Der schwebende Pen Ultimate ist ein Blickfang für Ihren Schreibtisch. Der Kugelschreiber schwebt in einer speziellen Halterung und kann um die Längsachse in Rotation gebracht werden.



**RETRO RADIO DELUXE**

UKW-Röhrenradio zum Selberbauen

2011, Komplettbausatz mit Schleifenantenne.

Benötigt werden: Vier 1,5-V-Mignon-Batterien (Typ AA), Lötkolben und Lötzinn für den Aufbau, Franzis

Bestell-Nr. 3456 € 79,95

Radio hören macht Spaß, ein Radio selbst bauen umso mehr. Dieser Komplettbausatz macht es Ihnen leicht: Ohne viel Mühe zaubern Sie daraus ein voll funktionsfähiges UKW-Röhrenradio im Retro-Stil. Der hochwertige Lautsprecher und das edle Holzgehäuse lassen dabei den typischen, warmen Klang eines Röhrengeräts voll zur Geltung kommen. Ein Genuss – akustisch wie optisch!



**DAS BAUMEISTERSPIEL KLASSIK**

Unendliche Vielfalt

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

Bestell-Nr. 3616 € 16,-

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



Klaus Hünig

**DIE UMKEHRBRILLE**

Bausatz für eine Prismenbrille mit Totalreflexion

2011, lichtdichtes, belüftetes Gehäuse, Prismenhalter aus stabilem MDF, 2 hochwertige Dove-Prismen aus leichtem PMMA, 25 x 20 mm große Sichtfenster, Prismen-Visier hochklappbar, Anleitung, Sunwatch

Bestell-Nr. 3429 € 39,90

Mit einer Umkehrbrille können Sie viele Versuche selbst nacherleben. Wie lange dauert es, bis ich wieder Wasser in ein Glas gießen oder jemandem sicher die Hand reichen kann? Oder einen Text lesen? Oder etwas schreiben?! In der Umkehrbrille kommen hochwertige Dove-Prismen aus Acrylglas zum Einsatz, in denen die Bildumkehr durch Totalreflexion bewirkt wird. Es müssen nur die Prismen in ihre Halterungen geklebt und diese in das Brillengestell eingesetzt werden.



**STREICHHOLZ-RÄTSEL (SPIEL)**

50 Knobeleien für lichte Momente und zündende Ideen

2011, in Spielebox. Ab 12 Jahren, Moses

Bestell-Nr. 3398 € 9,95

Wie schafft man es, dass das Zündholz-Huhn von links nach rechts schaut? Und wie berichtigt man mathematische Gleichungen, wenn man dabei nur ein Streichholz umlegen darf? 50 knifflige Rätsel fördern Ihr Denkfähigkeit, Ihre Vorstellungskraft und Ihre Kombinationsfähigkeit. Sicher tappen Sie nicht lange im Dunkeln – bald wird Ihnen ein Licht aufgehen!



**ZAHLEN AM LAUFENDEN METER**

Albrecht Beutelspachers Mathezollstock

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

Bestell-Nr. 3650 € 12,90

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

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

# Schrödingers Katze auf dem Prüfstand

Was passiert mit den manchmal geheimnisvollen Phänomenen der Quantenphysik, wenn man immer größere und schwerere Objekte betrachtet? Darüber stritten schon Erwin Schrödinger und Albert Einstein. Neue Experimente mit Systemen großer Masse sollen jetzt Hinweise zur Klärung dieses fundamentalen Rätsels liefern.

Von Markus Aspelmeyer und Markus Arndt

»» **L**ieber Schrödinger, Du bist faktisch der einzige Mensch mit dem ich mich wirklich gern auseinandersetze ...« So schreibt Albert Einstein im April 1935 aus Kalifornien an seinen Freund Erwin Schrödinger nach Oxford, wo der Wiener Theoretiker damals am Magdalen College arbeitete. Mit diesem Brief beginnt zwischen den beiden großen Geistern eine Grundsatzdiskussion über die Interpretation der Quantenphysik, die bis heute unter Forschern andauert: Was sagt die quantenmechanische Wellenfunktion über die physikalische Welt aus?

Der österreichische Physiker Erwin Schrödinger (1887–1961) hatte die Wellenfunktion 1926 als eine zentrale mathematische Größe der Quantentheorie eingeführt. Zusammen mit der so genannten Schrödinger-Gleichung lassen sich daraus Wahrscheinlichkeiten für die Ergebnisse zukünftiger Messungen an einem physikalischen System berechnen (siehe Kasten S. 46). Aber heißt das gleichzeitig, dass die Wellenfunktion deshalb etwas in der Welt real Existierendes beschreibt? Oder ist sie schlicht ein mathematisches Hilfsmittel

ohne Bezug zur Realität, ein »Katalog von Erwartungswerten« (Schrödinger) zur Berechnung des möglichen Ausgangs zukünftiger Messungen? Die Diskussion darüber hat den österreichischen Physiker zur Formulierung seines berühmten Gedankenexperiments von »Schrödingers Katze« geführt (siehe Kasten S. 46). Letztlich geht es um die Frage, ob die Gesetze der Quantenphysik auch noch für Objekte gelten, die – wie etwa eine Katze – im Bereich unserer makroskopischen Erfahrung liegen, den die klassische Physik beschreibt.

Ein einfaches Quantenexperiment zeigt die Problematik auf: Ein Strahl von Molekülen, jedes einzelne aus mehreren Dutzend oder auch 100 Atomen zusammengesetzt, trifft auf ein Gitter mit 50 Nanometer breiten Spalten, die mit einem Abstand von 100 Nanometern in eine dünne Membran geschrieben sind. Dahinter befindet sich ein Detektorschirm. Wird nun der Ursprungsort der Teilchen in der Quelle sehr präzise festgelegt, so bleibt ihr seitlicher Impuls und damit ihre Quergeschwindigkeit in gewissen Grenzen unbestimmt oder »unscharf« – und zwar auf Grund der heisenbergschen Unschärferelation. Ihr zufolge lassen sich Ort und Geschwindigkeit eines Objekts nicht gleichzeitig beliebig genau bestimmen. Genauer: Das Produkt aus Ort und Geschwindigkeit kann einen gewissen Minimalwert nicht unterschreiten, der durch eine Fundamentalkonstante (das plancksche Wirkungsquantum) gegeben ist.

Für jedes der Moleküle gibt es dann bei seinem Flug von der Quelle zum Detektor durch die verschiedenen Spalten des Gitters mehrere gleichwertige Wege. Das Teilchen gelangt somit in eine quantenmechanische Überlagerung (Superposition) von fundamental ununterscheidbaren Möglichkeiten – die Basis für echte Quanteneffekte, hier insbesondere der Materiewelleninterferenz. Verhielten sich alle Moleküle wie Billardkugeln, die den Gesetzen von Newtons klassischer Mechanik folgen, so würde man – bei guter Bündelung des Molekularstrahls – auf dem Schirm für die Teilchenverteilung einen Schlagschatten des Gitters erwarten

## AUF EINEN BLICK

### TOT UND LEBENDIG?

**1** Ein scheinbar paradoxes Gedankenexperiment von Erwin Schrödinger beschäftigt Quantenphysiker und Philosophen seit Jahrzehnten. Es geht um die fundamentale Frage, ob auch ein **makroskopisches Objekt in unbeobachtetem Zustand** mehrere sich eigentlich ausschließende Eigenschaften annehmen kann – ob etwa eine Katze zugleich lebendig und tot zu sein.

**2** Dahinter steht das **Problem des Messprozesses** in der Quantenphysik: Bei der Beobachtung reduziert sich der vorher mehrdeutige Zustand verschiedener Möglichkeiten auf genau eine Wirklichkeit.

**3** Seit einigen Jahren verbuchen Physiker große Fortschritte bei quantenphysikalischen Experimenten mit makroskopischen Objekten. Die Antworten beeinflussen unser grundlegendes Verständnis von **Wirklichkeit und Kausalität**.

(durchgezogener Strahl im Kasten S. 49, Bild a). Das Experiment liefert jedoch ein völlig anderes Ergebnis:

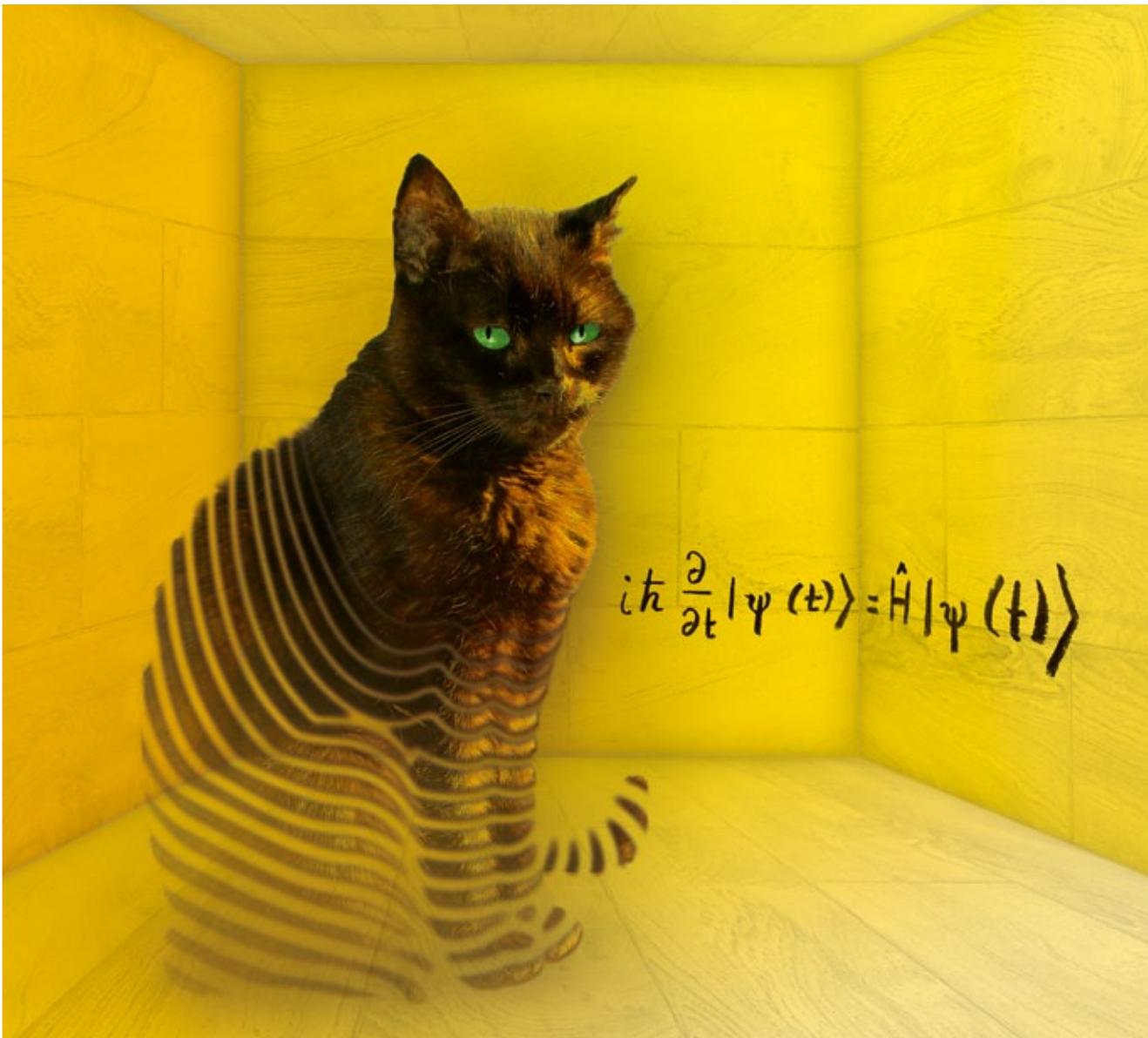
- Die einhüllende Schattenlinie ist viel zu breit, um von klassischen Objekten zu stammen.
- Es bilden sich Interferenzstreifen, sobald das Gitter mehr als einen Spalt aufweist.

Tatsächlich ist die übergroße Breite der »Schattenlinien« abermals eine Folge der Unschärferelation: Jeder der nur 50 Nanometer breiten Gitterspalte schränkt wiederum lokal die Wahl der möglichen Durchtrittsorte ein und sorgt so für eine quantenmechanische Unbestimmtheit und Aufweitung des Impulses quer zur Flugrichtung der Teilchen. Sähe jedes Molekül nur einen Spalt, so würde man einen verbreiterten Molekularstrahl auf dem Detektorschirm erwarten, etwa der schwarzen Linien im Kasten S. 49, Bild b folgend. Stellt man den Molekülen jedoch viele Spalten, also ein ganzes Gitter entgegen, bietet sich ein anderes Bild. Orte auf dem Schirm,

die von den Molekülen bei der Beleuchtung durch nur einen Spalt durchaus erreicht werden könnten, bleiben dann dunkel – Interferenzstreifen entstehen (rote Kurve in Kasten S. 49, Bild a). Damit realisiert die Quantenphysik das sprichwörtliche »Weniger ist mehr« auf eine ungewöhnliche Art.

Die Quanteninterferenz komplexer Moleküle am Gitter demonstrierten Markus Arndt und seine Kollegen an der Universität Wien in den Laboren von Anton Zeilinger vor 13 Jahren zum ersten Mal. Mit einer rund 1000-mal empfindlicheren Detektoranordnung schritten kürzlich Thomas Juffmann und seine Kollegen in der Gruppe von Markus Arndt auf diesem Weg weiter voran: Die Forscher filmten den Wellen-Teilchen-Dualismus direkt mit einer CCD-Kamera, indem

**Schrödingers Katze hat ein langes Leben: Aktuell untersuchen Forscher, ob auch Makroteilchen Quantenobjekte sind.**



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / DANIELA LETNER

sie verfolgten, wie quantenmechanische Interferenzmuster sich aus einzelnen Farbstoffteilchen in Echtzeit aufbauen. Der Film macht beide Aspekte der Welt sichtbar: einerseits die *Teilchennatur* jedes einzeln fluoreszierenden Moleküls, womit man meint, dass jedes Molekül sehr präzise – hier auf bis zu zehn Nanometer genau – auf dem Detektorschirm lokalisierbar ist; andererseits seine quantenmechanische Wellennatur, die benötigt wird, um zu erklären, wie sich alle weit voneinander entfernten Teilchen wie von Geisterhand gelenkt zu einem Streifenmuster arrangieren (siehe Kasten S. 49; siehe [www.spektrum.de/Quantenfilm](http://www.spektrum.de/Quantenfilm)).

Juffmann und Kollegen benötigten für ihre Experimente besonders dünne Nanostrukturen, die nur noch 100 Atomlagen dick waren. Das minimiert die sonst störenden Kräfte (die so genannten Van-der-Waals-Kräfte) zwischen vorbeifliegenden Teilchen und den Gitterwänden. Zwei israelischen Forschern von der Tel Aviv University, Aleksander Tsukernik und Ori Cheshnovsky, gelang es, solche Gitter herzustellen,

womit das Wiener Team die Quantennatur noch größerer Moleküle untersuchen konnten, die aus mehr als 100 Atomen bestehen und von den Chemikern Jens Tüxen und Marcel Mayor von der Universität Basel speziell für diesen Zweck chemisch synthetisiert wurden.

Das Ergebnis des Experiments widerlegte die klassische Annahme, dass ein Molekül nur auf genau einem Weg durch die verschiedenen Spalte des Gitters treten kann – sozusagen: entweder rechts oder links um eine Strebe herum. Die Quantentheorie sagt dagegen die gemessenen Interferenzen richtig voraus. Ihr zufolge wird Materie durch eine Wellenfunktion beschrieben, die sich gleichberechtigt entlang aller möglichen Wege ausbreiten kann. Außerdem kann sie auch makroskopisch ausgedehnt («delokalisiert») sein; in dem Laborversuch am Ende der Flugstrecke über einige zehntel Millimeter hinweg. Die heute bekannten Gesetze der Quantenphysik gelten im Prinzip für beliebig große Objekte. Entsprechend lassen sich solche Überlagerungen auch auf ma-

## Schrödingers Katze, seine Gleichung und die Wellenfunktion

**Im Jahr 1935 schlug Erwin Schrödinger ein scheinbar paradoxes Gedankenexperiment vor:** Man nehme eine Katze und sperre sie in eine Kiste. Außerdem stelle man noch ein Giftfläschchen dazu sowie ein radioaktives Element, das zu einem nicht vorhersehbaren Zeitpunkt zerfallen wird. Sobald das geschieht, setzt ein Mechanismus Giftgas frei und tötet augenblicklich das Tier.

Das klingt grausam, verdeutlicht aber nur ein fundamentales Dilemma der Quantentheorie, mit dem der österreichische Theoretiker ihre Unvollständigkeit demonstrieren wollte. Das Problem: Der radioaktive Atomkern ist nach den Gesetzen der Quantentheorie zunächst in einem Überlagerungszustand aus »zerfallen und nicht zerfallen«. Würden diese Gesetze nun auch für makroskopische Objekte wie eine Katze gelten, müsste sich auch diese in einem Überlagerungszustand, nämlich »lebend und tot«, befinden. In dieser Phase sind für Atom und Katze lediglich Wahrscheinlichkeitsaussagen möglich.

**Erst beim Öffnen der Kiste** (dem Moment der Beobachtung oder Messung) ändert sich die Lage dramatisch. Dann springt das Atom in einen der beiden Zustände »zerfallen« oder »nicht zerfallen« – und die Katze entsprechend in »tot« oder »lebendig«. So erklärt es jedenfalls die Kopenhagener Interpretation dieser bizarren Quantenphänomene, der die meisten Physiker anhängen.

Als Ursache wird in dem Kopenhagener Bild ein »Kollaps der Wellenfunktion« postuliert, also eine Reduzierung von einem überlagerten Mischzustand zu einem eindeutigen Zustand. Alternativ besagt die Dekohärenztheorie, dass dieser Kollaps nicht eigens gefordert werden muss. Stattdessen würde bereits die Wechselwirkung des Systems mit der Umgebung einen der zulässigen Zustände herbeiführen, was dann einem »effektiven« Kollaps der Wellenfunktion entspräche.

Die Wellenfunktion (fachlich oft mit dem griechischen Buchstaben  $\Psi$ , Groß-Psi, bezeichnet), ebenfalls Schrödingers Schöpfung, beschreibt den Überlagerungszustand der Objekte gemäß einer mathematischen Gleichung, die der Theoretiker 1926 aufstellte:

$$i\hbar \partial/\partial t \Psi(x,t) = \hat{H} \Psi(x,t).$$

Dabei ist  $i$  die imaginäre Zahl  $\sqrt{-1}$ , die so genannte reduzierte Planck-Konstante  $\hbar$  entspricht  $1,05 \cdot 10^{-34}$  Joulesekunden (die so genannte reduzierte Planck-Konstante), das Zeichen  $\partial/\partial t$  steht für die partielle Ableitung nach der Zeit, und  $\hat{H}$  steht für den so genannten Hamilton-Operator, in dem die Bewegung der Objekte sowie äußere Kräfte enthalten sind. Das Wichtigste in diesem Naturgesetz, die veränderliche Funktion  $\Psi$ , hängt selbst von Ort und Zeit ab. Sie steht für den Systemzustand – jetzt und in Zukunft.

Auch wenn das reichlich abstrakt klingt – im Prinzip beschreibt die Gleichung eindeutig, wie sich die Wellenfunktion aus einem gegenwärtigen Zustand in die Zukunft hineinentwickelt. Und der  $\hat{H}$ -Operator repräsentiert die Energie des Systems.

Das revolutionäre Konzept der Quantenphysik besagt nun, dass die Wellenfunktion selbst nicht messbar ist. Lediglich ihr Betragsquadrat,  $|\Psi|^2$ , nimmt eine Bedeutung in der Realität an, nämlich als Wahrscheinlichkeitsverteilung. Dieses Betragsquadrat von  $\Psi$  gibt also an, mit welcher Wahrscheinlichkeit sich ein bestimmtes Objekt in einem bestimmten Zustand zu einem bestimmten Zeitpunkt an einem bestimmten Ort befindet.

Diese Interpretation hat tiefe Auswirkungen auf die Frage der Kausalität der Welt: Einzelmessungen sind nicht mehr deterministisch vorbestimmt, sondern nur noch statistisch festgelegt, während das Ensemble exakt vorhersagbar bleibt.

Reinhard Breuer

kroskopische Zustände übertragen – mit dramatischen Konsequenzen für unser Weltbild. Genau darum geht es im berühmten Beispiel von Schrödingers Katze. Schrödinger konstruierte im Gedankenexperiment eine »Höllmaschine«, mit der sich der Überlagerungszustand eines einzelnen Teilchens auf die Zustände »tot« und »lebendig« einer Katze übertragen lässt. Das bedeutet in Analogie zum Vorherigen: Es lässt sich prinzipiell ein Experiment durchführen, dessen Ergebnis im Widerspruch zu der Annahme steht, dass die Katze zu jedem Zeitpunkt definitiv entweder tot oder lebendig war.

Für Einstein war das ein klarer Beleg, dass die Quantenmechanik die Realität nicht korrekt erfasst, wie er in seinem Brief von 1935 auf den Punkt brachte: »Durch keine Interpretationskunst kann diese Psi-Funktion [Wellenfunktion; Anmerkung der Verfasser] zu einer adäquaten Beschreibung eines wirklichen Sachverhaltes gemacht werden.« Auch unsere eigene makroskopische Erfahrung sagt uns, dass es »in Wirklichkeit« weder ein Zwischending zwischen tot und lebendig gibt noch, wie im genannten Beispiel, die gleichzeitige Anwesenheit an zwei völlig unterschiedlichen Orten.

### Wo liegt die Grenze zur klassischen Physik?

Heißt das, dass sich Objekte »auf Makroebene« eben doch nicht nach den kontraintuitiven Gesetzen der Quantenphysik, sondern gemäß der klassischen Mechanik Isaac Newtons und der Elektrodynamik James Maxwells verhalten? Wenn dem so wäre: Wo läge die Grenze? Bei welcher Masse, Größe, Quantenzahl oder strukturellen Komplexität würden die Theorien einander ablösen oder ineinander übergehen? Wie würde das aussehen? Könnte vielleicht sogar die Gravitation dabei eine Rolle spielen, an deren Vereinheitlichung mit der Quantenphysik sich die Theoretiker schon seit Generationen die Zähne ausbeißen (siehe SdW 4/2012, S. 34)?

Diese Art der Lösung des Katzenparadoxons würde zur Folge haben, dass die Quantentheorie für die Makroebene zumindest erweitert werden müsste. Ein ungewöhnlicher Schritt, den viele Physiker mit Skepsis betrachten. Denn die Quantenmechanik – und präziser noch ihre relativistische Form, die Quantenelektrodynamik – hat sich über 100 Jahre hinweg in allen Experimenten bravurös behauptet.

Andererseits: Bleibt die Quantenphysik auch makroskopisch gültig, müssen wir unser Weltbild in mehreren Punkten radikal ändern, so etwa unser Verständnis von Raum und Zeit sowie den Wirklichkeitsbegriff von Zuständen makroskopischer Objekte. Darüber wären nun wiederum andere Physiker nicht glücklich.

Es läuft auf die fundamentale Frage hinaus: Gibt es jenseits einer bestimmten Schwelle die Quantensuperposition »objektiv« nicht mehr, oder ist die Welt fundamental »quantisch«? Könnte es also sein, dass wir die Quantenphänomene bei großen Objekten nur nicht sehen können, weil sie im Labor nicht messbar sind, wenn mehr als 100 oder auch 100 Billionen Teilchen zusammenwirken? Diese Fragen sind derzeit – immer noch – völlig offen. Niemand hat darauf eine



Antwort, die nicht neue Probleme aufwerfen würde. Physiker nähern sich diesem Thema aber durch reale Quantenexperimente mit immer größeren und schwereren Objekten. Masse und Ort spielen dabei eine besondere Rolle.

Eine offensichtliche Erklärung für die Schwierigkeit, Quantenphänomene zu beobachten, besteht darin, dass ihre Beschreibung fast immer explizit das (reduzierte, also durch  $2\pi$  geteilte) plancksche Wirkungsquantum  $\hbar$  enthält. Die so genannte Wirkung hat die physikalische Einheit eines Drehimpulses, aber auch des Produkt aus »Energie mal Zeit« oder »Impuls mal Weglänge«. Mit  $\hbar = 1,05 \cdot 10^{-34}$  Joulesekunden ist das Wirkungsquantum um 33 Größenordnungen kleiner als beispielsweise der Drehimpuls des Pendels einer alten Standuhr. Bei einem Unterschied um so viele Zehnerpotenzen ist es eigentlich nicht verwunderlich, dass man die Quantisierung des Standuhrpendels nicht beobachtet. Auch Interferenzphänomene sind kaum makroskopisch zu erwarten. Eine 170 Gramm schwere Billardkugel mit einer Stoßgeschwindigkeit von zirka zwei Metern pro Sekunde wäre im ruhenden Bezugssystem des Pooltisches durch eine Quantenwelle von  $2 \cdot 10^{-33}$  Meter Länge beschrieben. Eine so winzige Strecke überfordert völlig die Messgenauigkeit sämtlicher heutiger Laborgeräte. Damit passt die Größe des Wirkungsquantums also recht gut zur physikalischen Alltagserfahrung.

Hinzu kommt: Selbst wenn man der Quantenphysik eine universelle Gültigkeit zugesteht, so kann gerade die Wechselwirkung zwischen einzelnen Teilen eines komplexeren Quantensystems dafür sorgen, dass bei keinem seiner Teilkomponenten Quanteneigenschaften sichtbar werden. Das ist die Einsicht der Dekohärenztheorie, die schon früh von den Quantenphysikern Anthony Leggett (University of Illinois), Hans-Dieter Zeh und Erich Joos (Universität Heidelberg) und Wojciech Zurek (Los Alamos National Laboratory) entwickelt wurde. Ihre Kernaussage lautet: Koppelt ein einfaches Quantensystem an ein großes externes Gebilde mit vielen anderen Teilchen (dem »Wärmebad«) an, so gibt es Information über seinen Zustand an das Bad ab. Das zuvor isolierte Quantenobjekt ist nun mit Elementen aus dem Bad »verschränkt« – sie bilden jetzt ein größeres Quantensystem.

Der Begriff der quantenmechanischen Verschränkung wurde erstmals 1935 von Erwin Schrödinger formuliert und bezeichnet die Quantensuperposition von gemeinsamen Eigenschaften mehrerer physikalischer (Teil-)Systeme. Bei ihnen lässt die Wellenfunktion des Gesamtsystems keine vollständige separate Beschreibung der Teile mehr zu. Dieses Phänomen war für Schrödinger »das charakteristische Merkmal der Quantenphysik«. Es bedeutet aber, dass man bei isolierter Betrachtung des eigentlich mit seiner Umgebung korrelierten Teilsystems schwächere und unter Umständen keine Quanteneffekte mehr sehen kann, etwa keine Interferenzen. Bei der Verschränkung des Quantensystems mit der Umgebung gehen die am Teilsystem beobachtbaren Quanteneigenschaften verloren.

Quantitative Untersuchungen zur Dekohärenz gelangen 1996 dem französischen Team um Serge Haroche in den Laboren der École normale supérieure in Paris. Mit Hilfe von Rubidiumatomen und einem Hohlraum mit spiegelnden Innenwänden kreierten sie eine experimentelle Version von Schrödingers Katze »aus Licht« und konnten unter kontrollierten Bedingungen ihren Zerfall studieren. Die kontrollierte Dekohärenz von materiellen Objekten durch Streuung von Licht wurde auch schon früh in der Atominterferometrie in Laboren des Massachusetts Institute of Technology in Cambridge (USA) sowie der Universität Konstanz nachgewiesen. Physiker der Universität Wien konnten 2004 zeigen, dass große Moleküle sich sogar von sich aus, rein thermisch, mit der Umgebung verschränken, ohne dass es eine äußere Störung geben muss. Die perfekte Isolation von der Umwelt ist somit eine der größten Herausforderungen bei makroskopischen Quantenexperimenten.

Das Schöne an der Dekohärenz: Sie kann vollständig innerhalb der etablierten Quantenphysik verstanden werden und erklärt zudem, warum sich reine Quantenphänomene nur eingeschränkt beobachten lassen. Damit bildet sie ein Schlüsselproblem in vielen jungen Technologien, vom Quantencomputer bis hin zu Quantensensoren. Es bleibt aber eine fundamentale Herausforderung für den Wirklichkeitsbegriff. Dekohärenz macht die Welt nämlich nicht »real« im engeren Sinn. Sie erklärt uns nicht den »Kollaps der Wellenfunktion«, warum also bei einer konkreten Messung genau ein bestimmtes Einzelereignis aus einer großen Zahl möglicher Resultate realisiert wird.

Im Gegenteil: Da das Modell auf quantenmechanischer Verschränkung basiert, bleibt in jedem Experiment alles in einem Überlagerungszustand. Es gibt keinen endgültigen Messprozess, die Quantenüberlagerungen von Möglichkeiten werden nie in ein Einzelergebnis aufgelöst, sondern durch Wechselwirkungen nur in immer komplexere Superpositionen überführt. Das Dilemma mit dem »Kollaps« führt manche Physiker zur Vielwelten-Theorie. Während seiner Dissertation an der Princeton University schlug Hugh Everett III 1954 eine Interpretation der Quantenphysik vor, die das Messproblem auflösen soll. Demnach bliebe die Theorie universell gültig, zugleich würde aber die klassisch verbotene

Überlagerung makroskopisch unterscheidbarer Zustände dadurch vermieden, dass bei einer Messung nicht im »Kollaps« ein bestimmter Endzustand auf unklare Weise ausgewählt wird. Everetts kühne Idee: Bei jeder Messung würden alle möglichen Zustände eines Systems in verschiedenen Welten tatsächlich realisiert. Diese Hypothese ist zwar in sich logisch konsistent, hat aber den offensichtlichen Nachteil, wahrlich verschwenderisch mit der Zahl der Universen umzuspringen. Sie ist zudem prinzipiell nicht falsifizierbar und daher für die wissenschaftliche Diskussion nur von eingeschränktem Wert.

### Wirkt Gravitation auf die Unschärferelation?

Physiker, die sich mit fortwährenden Überlagerungszuständen nicht recht abfinden können, fragen sich, ob man nicht stattdessen die Grundgleichungen der Quantenphysik selbst modifizieren müsste, damit sich auf der Ebene von Makroobjekten wieder klassisches Verhalten zeigt. Diese Änderungen sollten klein genug sein, dass man sie in keinem der bisherigen Experimente entdecken konnte, andererseits groß genug, um auf makroskopischer Skala ausschließlich die Gesetze der klassischen Physik gelten zu lassen.

Die ersten Ideen, durch nichtlineare Erweiterungen der Quantentheorie einen »klassischen Unterbau« zu verordnen, gehen bereits auf Louis de Broglie (1892–1987) zurück, dem Vater der Idee einer mit der Materie verknüpften Wellenfunktion. Die Hoffnung des französischen Theoretikers war, die gängige lineare Quantentheorie als Grenzfall einer nichtlinearen Wellenmechanik herleiten zu können, die auf klassischen Konzepten beruht. »Linear« bedeutet dabei, dass jede Überlagerung von zwei oder mehr Wellenfunktionen der Theorie wieder eine gültige Wellenfunktion derselben Gleichungen ist.

1976 formulierten die polnischen Physiker Iwo Białynicki-Birula und Jerzy Mycielski eine nichtlineare Erweiterung der Schrödinger-Gleichung, in der sich die Wellenfunktionen von Objekten mit größerer Masse zeitlich nicht verändern und sich somit wie kleine Billardkugeln verhalten. Für weniger massereiche Objekte würden weiterhin die Regeln der herkömmlichen Quantentheorie gelten, und die Wellenfunktion könnte sich wieder im Raum ausbreiten (»delokalisieren«). Doch diese nichtlineare Erweiterung der Theorie konnten Roland Gähler, Anthony G. Klein und Anton Zeilinger bereits 1981 durch ein hochpräzises Beugungsexperiment mit Neutronen experimentell ausschließen, da die spezielle Form der Nichtlinearität die höheren Beugungsordnungen der Materiewelle direkt beeinflussen müsste – was sich aber nicht nachweisen ließ.

Eine andere mögliche Erweiterung der Quantentheorie schlug ein italienisches Forscherteam um Giancarlo Ghirardi, Alberto Rimini und Tullio Weber 1986 vor. Ihre Idee lautete, der Schrödinger-Gleichung einen winzigen nichtlinearen stochastischen Term hinzuzufügen. Dieses mathematische Zusatzelement sorgt automatisch dafür, dass Überlagerungszustände von Positionen mit der Zeit auf loka-

lisierte Zustände im Raum reduziert werden. Das klingt kompliziert, bewirkt aber, dass die Wellenfunktion bei ihrer Entwicklung »objektiv kollabiert«, also von einem ausgedehnten delokalisierten Zustand auf eine kleine (aber nicht punktförmige) räumliche Domäne zusammenschnürt.

Der Kollaps verläuft nach diesen Berechnungen jedoch so blitzartig, dass selbst die präzisesten Experimente der letzten Jahrzehnte ihn weder gefunden haben – noch hätten finden können. Im Licht neuer theoretischer Ansätze gehen die Vorhersagen mit diesem Modell inzwischen so weit, dass man seine Gültigkeit testen könnte, wenn es experimentell gelänge, die Quantensuperposition von Objekten im Bereich zwischen  $10^5$  und  $10^9$  Protonenmassen zu beobachten.

Eine weitere Klasse von Kollapstheorien nimmt explizit Bezug auf die mögliche Rolle der Gravitation. Wie wirkt sich die heisenbergsche Unschärfe eines massereichen Teilchens auf die Raumzeit aus? Was passiert mit dem Gravitationsfeld eines schweren Teilchens, wenn es sich in einer Superposition aus verschiedenen Orten befindet und schwer genug ist, dass sein Gravitationsfeld auf sich selbst rückwirken kann?

Fragen dieser Art haben unabhängig voneinander etwa die ungarischen Physiker Frigyes Károlyházy und Lajos Diósi sowie der englische Physiker Sir Roger Penrose bearbeitet. Ähnlich wie bei den oben beschriebenen Modellen kommt es

auch hier zu einer verstärkten Dekohärenz von Quantenüberlagerungen, deren Stärke mit Masse und Größe der untersuchten Teilchen und ihrer Wellenfunktionen anwächst. Solche Abwandlungen der Quantentheorie entsprechen jedoch keinesfalls bereits einer neuen Theorie der Quantengravitation, die immer noch den heiligen Gral der Physik darstellt. Im Gegenteil: Hauptursache für das Verschwinden der Quantensuperposition in diesen Modellen ist gerade die Annahme, dass das Gravitationsfeld nicht quantisiert vorliegt. Aus Experimenten, die solche erweiterten Theorien testen, hoffen Forscher gleichzeitig indirekt etwas über die Möglichkeit einer Quantengravitation zu lernen.

Lange Zeit waren die Kollapsmodelle eher Teil philosophischer Diskussionen um die Bedeutung von Messprozess und Wellenfunktion. Doch mittlerweile erwarten viele Physiker, dass man mögliche Effekte solcher Kollapsmodelle auch im Labor testen kann. Welche Experimente stellen also die Quantenphysik auf den Prüfstand der makroskopischen Welt? Wo könnte man erwarten, dass die Vorhersagen der gängigen Theorie widerlegt werden? Alle diskutierten Kollapsmodelle haben eines gemeinsam: Je besser sich die Zustände einer Quantenüberlagerung unterscheiden lassen, desto schneller verschwinden die Quanteneffekte. Allerdings nehmen auch die Dekohärenzeffekte der althergebrachten

## Quanteninterferenzen am Gitter

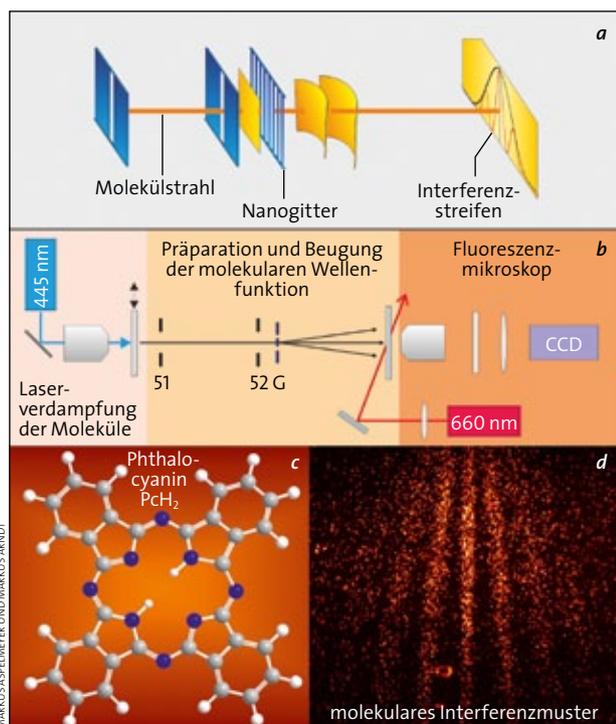
Das **Gitterbeugungsexperiment mit Licht** ist ein Standardversuch des fortgeschrittenen Physikunterrichts. Es demonstriert den Unterschied zwischen Strahlenoptik und Wellenoptik für

elektromagnetische Wellen. Die gleiche Idee lässt sich auch auf Materiewellen übertragen.

Die Beugung massereicher Moleküle an einem Nanogitter (*a*) ist ein Paradebeispiel für die nichtlokale Natur der Quantenphysik. Die Farbstoffmoleküle (Phthalocyanine) werden mit Hilfe eines fokussierten Laserstrahls von einem Glas abgedampft (*b*). Die effektive Quellgröße (Laserfokus plus Kollimationsspalt) ist so klein, dass die Orts-Impuls-Unschärfe jedes Molekül in einen Zustand zwingt, der zunächst über mehrere der nur 100 Nanometer voneinander getrennten Spalte delokalisiert ist. Damit gibt es mehrere prinzipiell ununterscheidbare Wege für jedes Molekül von der Quelle zum Ziel. Auf dem Detektionsschirm werden die Teilchen mittels laserinduzierter Fluoreszenzmikroskopie einzeln und mit einer Ortsauflösung von etwa zehn Nanometern abgebildet.

Der Auftreffpunkt jedes Einzelmoleküls ist prinzipiell nicht vorhersagbar, und die entsprechende Wellenfunktion ist bis zum Detektor über mehr als 100 Mikrometer delokalisiert. Das Ensemble aller Moleküle arrangiert sich aber dennoch zu regulären Interferenzstreifen, die quantenmechanisch streng vorherbestimmt sind.

Die Wellenfunktion der  $PcH_2$ -Moleküle aus Bild *c* durchdringt im Versuchsaufbau von Bild *b* ein Nanogitter an mehreren Orten zugleich und erzeugt so ein streng vorherbestimmtes Interferenzmuster (*d*), das aber aus zufälligen Einzelereignissen aufgebaut wird.



Quantentheorie zu – »Große Katzen dekohärieren schneller«. Es wird daher in Zukunft wichtig sein, diese Effekte in Experimenten voneinander zu unterscheiden. Dabei helfen zwei wesentliche Eigenschaften:

► Die erweiterten Kollapstheorien treffen ihre Vorhersage – im Gegensatz zur Dekohärenztheorie – selbst für komplett isolierte Objekte.

► Es werden Experimente gesucht, in denen konventionelle Dekohärenz und ein möglicher »Kollaps« unterschiedlich mit Laborparametern skalieren, etwa mit dem Volumen.

Die Grundidee dabei lautet wie folgt: Erzeuge eine Quantensuperposition aus zwei oder mehreren, möglichst makroskopisch separierten Ortszuständen eines massereichen Objekts; dann versuche, Quanteninterferenzeffekte zu sehen. Sollte sich die Welt auf der Makroebene fundamental anders verhalten als auf der Mikroebene, würde man erwarten, an eine Grenze zu stoßen, oberhalb derer sich keine Interferenzeffekte mehr erzeugen lassen, unabhängig von der Isolation.

Geht man allerdings ins Detail der vielen Modelle, die den Kollaps der Wellenfunktion beim Messprozess beschreiben, wird schnell klar, dass die Anforderungen an mögliche Experimente gewaltig sind. Zum Beispiel erwartet man erste mögliche Effekte durch die von Ghirardi und Kollegen vorgeschlagenen »spontanen« Kollapsmodelle in einem Massebereich ab etwa  $10^5$  bis  $10^8$  atomaren Masseneinheiten (amu) und einer Separation der möglichen Ortszustände von rund 100 Nanometern. Die bislang noch unbestätigten Einflüsse der Gravitation auf den Kollaps vermuten Experten bei den aktuellen Modellen mit mehr als  $10^9$  und  $10^{16}$  Protonenmassen. Wir wollen zwei Vorhaben skizzieren, die in diese Region vordringen können:

► Quanteninterferenzen mit noch komplexeren Molekülen, Clustern und Nanokristallen;

► Quantenexperimente mit massereichen mechanischen Objekten.

Wir haben eingangs das einfachste aller Interferenzexperimente beschrieben, nämlich die Beugung von Materiewellen an einem Gitter. Tatsächlich haben Forscher bei größeren

Massen viele Varianten der Quanteninterferenz untersucht. Insbesondere hat sich eine Idee des Physikers John Clauser, damals noch an der University of California in Berkeley, als fruchtbar für die Arbeit mit makroskopischen Materiewellen herausgestellt: Alle Interferometer benötigen eine anfänglich feste Phasenbeziehung zwischen den Teilwellen, die am Schluss überlagert werden sollen. Eine solche ist bei typischen Quellen für Cluster und Moleküle jedoch nicht automatisch gegeben. Erst eine raffinierte Anordnung von drei hintereinandergeschalteten nanostrukturierten Gittern ermöglicht das Kunststück. Zuerst werden Teilchen, die aus thermischen oder sonstigen ungeordneten Quellen ausgestoßen werden, durch ein Gitter vorstrukturiert und delokalisiert. Danach werden diese Objekte am zweiten Gitter gebeugt, was sich mit einem dritten Gitter nachweisen lässt.

In der Gruppe um Markus Arndt an der Universität Wien wurde von Stefan Gerlich, Lucia Hackermüller und Kollegen nach diesem Prinzip das so genannte Kapitza-Dirac-Talbot-Lau-Interferometer (KDTL) entwickelt (siehe Spektrum der Wissenschaft 1/2012, S. 40). Mit Teilchen der Baseler Chemiker Jens Tüxen und Marcel Mayor sowie des Chemikers Paul Fagan (Dupont, US-Bundesstaat Delaware) gelang es den Wiener Experimentatoren erstmals, eine kontrastreiche Quanteninterferenz mit Molekülen von mehr als 400 Atomen und Massen um 7000 atomaren Einheiten zu erzielen.

Die Wellenfunktion dieser Objekte war bei dem Interferenzexperiment räumlich über das rund 100-Fache des Moleküldurchmessers ausgedehnt (»delokalisiert«), was dem 100 000-Fachen ihrer De-Broglie-Wellenlänge entsprach. Wesentlich kamen in diesem Versuch Gitter aus Licht zum Einsatz. Diese beeinflussen die Moleküle durch die Wechselwirkung zwischen dem elektrischen Feld des Lichts und der Polarisierbarkeit der Moleküle. Lichtgitter werden insbesondere in den Experimenten der nächsten Generation relevant, in denen auch die Präparation und Detektion des Molekularstrahls rein optisch erfolgen wird.

Materiewelleninterferometrie mit Lichtgittern hat viele mögliche Anwendungen. Zunächst geht es darum, die Mas-

## Weitere Experimente zur Makro-Quantenphysik

**In einer Reihe weiterer Experimente** spielen ebenfalls makroskopische Überlagerungszustände eine zentrale Rolle:

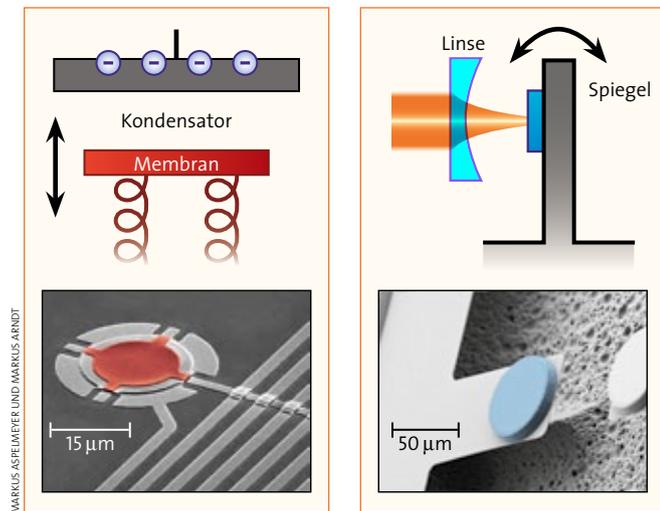
► Die Überlagerung von supraleitenden Strömen, die in einem Schaltkreis sowohl im als auch gegen den Uhrzeigersinn umlaufen können (SQUID=superconducting quantum interference device).

► Die Überlagerung von Billionen von gemeinsamen Spins zwischen zwei Atomwolken, wie sie Eugene Polzik und seine Mitarbeiter in Kopenhagen erzeugten.

► Die Materiewelleninterferenz von Millionen von Atomen, die gemeinsam als ultrakaltes Gas in einem Bose-Einstein-Kondensat (BEC) präpariert wurden. Dabei können die Atome bei

Temperaturen von wenigen Nanokelvin über Millimeterdistanzen und hunderte Millisekunden delokalisiert sein. Solange die Atome nicht miteinander verschränkt sind, bleibt die interferierende Masse und die De-Broglie-Wellenlänge in diesen Experimenten jeweils die jedes einzelnen Atoms – so wie auch ein Laser seine Farbe behält, wenn man seine Intensität erhöht. Mehrere Gruppen arbeiten daran, ultrakalte Atome miteinander zu verschränken, um die Messgenauigkeit zu erhöhen.

Auch quantenphysikalisch verschränkte Zustände von Ionen und Atomen können sich heutzutage über Distanzen von mehreren Metern und im Fall von Photonen sogar von bis zu 140 Kilometern ausbreiten.



MARKUS ASPELMETER UND MARKUS ARNDT

sengrenze der zu beugenden Objekte in Laborexperimenten noch um weitere zwei Größenordnungen, also auf eine Million amu, auszudehnen. Für Massen zwischen  $10^6$  und  $10^9$  amu werden derzeit vor allem Experimente in der Schwerelosigkeit diskutiert, die natürlich eine sehr lange Vorlaufzeit haben. Aber unabhängig davon, wie die Messungen der nächsten Jahre ausgehen werden – ob sie die Quantenphysik perfekt bestätigen oder von ihr abweichen –, die Resultate werden in jedem Fall erlauben, neue Grenzwerte für die mögliche Gültigkeit alternativer Theorien zur etablierten Quantenphysik zu definieren. Darüber lässt sich die Interferometrie mit Materiewellen auch in Quantensensoren einsetzen, etwa zur Vermessung äußerer Kräfte oder innerer Teilcheneigenschaften. Das führt in der physikalischen Chemie zu interessanten Anwendungen, etwa zur präzisen Charakterisierung optischer, elektrischer und magnetischer Eigenschaften von komplexen Molekülen und Clustern.

In den letzten fünf Jahren gab es außerdem rasante und unerwartete Entwicklungen an der Grenze zwischen Quantenphysik und Mikromechanik. Mehrere Forschungsgruppen arbeiten derzeit intensiv daran, mechanisch schwingende Nano- und Mikroresonatoren mit gut kontrollierten Quantensystemen zu verbinden. Das Ziel dabei ist, die Quantenkontrolle über einen mechanischen Freiheitsgrad zu gewinnen, zum Beispiel den Schwingungszustand einer winzigen Biegefeder, eines einseitig eingespannten Stabs, ähnlich einem Sprungbrett. Das erschließt spannende neue Anwendungen, darunter für

- mechanische Sensoren, die dank Quanteneigenschaften mit bislang unerreichter Auflösung Abstände, Kräfte, Massen und Energie messen könnten, und
- mechanische Transportmechanismen für Quantencomputer, um einzelne Quanten-Bits auf einem Chip miteinander zu verknüpfen.

Dadurch öffnet sich ein völlig neues Fenster für makroskopische Quantenexperimente. Die Objekte in diesen Experimenten bestehen aus vielen Atomen, die sich als ein Objekt kollektiv im Raum bewegen – etwa bei einer Stabschwin-

Membranen (links) und Spiegel: Mit solchen Objekten testen Physiker, ob die Quantenphysik auch für die Makrowelt gültig ist. Die Membranbewegung moduliert die Länge eines Kondensators. Genauso verändert der schwingende Spiegel (rechts) die Länge eines optischen Resonators. In beiden Fällen variiert dadurch die Zahl der Photonen, die auf die Objekte treffen: Ihr Strahlungsdruck koppelt die Mechanik an die Photonen.

gung. Mechanische Quantenkontrolle bedeutet daher die Möglichkeit, die gesuchten Überlagerungszustände eines massereichen, makroskopischen Objekts herzustellen.

Forscher verfolgen weltweit Ansätze mit verschiedenen mechanischen Gebilden, die einen Massenbereich von mehr als 20 Größenordnungen überdecken: von Atomwolken mit  $10^5$  Atomen über nano- und mikromechanische Objekte mit bis zu  $10^{15}$  Atomen bis hin zu kilogrammschweren mechanischen Objekten mit mehr als  $10^{25}$  Atomen, etwa als Spiegel in Gravitationswellendetektoren.

### Quantenobjekte können an zwei Orten zugleich sein

Die Grundidee ist eigentlich simpel: Die Forscher versuchen, die bereits kontrollierbaren Quanteneigenschaften eines mikroskopischen Systems auf das makroskopische mechanische System zu übertragen, also zum Beispiel den Überlagerungszustand eines elektronischen Qubits auf den räumlichen Überlagerungszustand eines mechanischen Objekts. Ein Qubit ist allgemein ein Quantensystem mit zwei überlagerten Zuständen, das quantenmechanische Äquivalent eines Bits. Erst durch Messung werden die beiden Zustände voneinander unterscheidbar. Als kleinstmögliche Speichereinheit dient ein Qubit auch als Maß für die Quanteninformation in Quantencomputern. Eine Wechselwirkung zwischen Qubit und mechanischem Objekt kann also eine Überlagerung von zwei möglichen Orten des Objekts erzeugen.

Das ist 2010 erstmals Forschern um Aaron O'Connell in den Labors von Andrew Cleland und John Martinis an der University of California in Santa Barbara gelungen. Die Physiker konnten bei einem mikromechanischen Objekt mit  $10^{13}$  Atomen die Quanteninterferenz von zwei räumlich getrennten Zuständen beobachten. Ein erster viel versprechender Schritt! Trotz der vergleichsweise großen Masse von einem Nanogramm konnte dieses Experiment allerdings keine der angesprochenen Kollapsmodelle testen. Die beiden räumlich getrennten Zustände hatten lediglich einen Abstand von einem millionstel Atomdurchmesser – noch viel zu klein, um Effekte jenseits der gängigen Quantentheorie unterscheiden zu können. Ein anderer Typ von Experimenten beleuchtet quantenmechanische Objekte mit Lichtteilchen. Die Forscher nutzen dabei die Kraftübertragung der Photonen, wenn sie von einem Objekt reflektiert werden: den Lichtdruck. Damit lassen sich die mechanischen Eigenschaften vollständig mit Laserlicht oder Mikrowellen steuern. Mit den Methoden der Quantenoptik lassen sich so Quantenzustände der mechanischen Bewegung erreichen.

Das erfordert, thermische Anregungen der Objekte so stark zu unterdrücken, dass die Bewegung durch die Quantenphysik beschrieben wird. Eine effiziente Methode dafür ist die Laserkühlung. Diese war auch die Grundlage von zwei neuen Experimenten vom Jahr 2011. Dabei bombardierten die Physiker ein mechanisches Objekt nur mit Photonen. Deren Lichtdruck reichte, um es in den Quantengrundzustand der Schwingung zu versetzen. In diesem Zustand ist die Bewegungsenergie vor allem durch die Unschärfe des quantenmechanischen Wellenpakets gegeben. Ein Lichtresonator sorgte dabei dafür, dass je nach Bewegungsrichtung des Objekts wenige oder viele Photonen auf das Objekt trafen. Nahezu jedes einzelne Photon konnte es daher ein wenig abbremsen (»kühlen«), bis nur noch Quantenfluktuationen die Bewegung dominierten. Ähnlich könnte man auch ein Auto abbremsen, indem man es mit Tennisbällen bewirft.

### Nanokugeln, eingefangen in einem Käfig aus Licht

Im Experiment bestrahlten Forscher um John Teufel am National Institute of Standards sowie an der University of Colorado eine schwingende Membran von 15 Mikrometer Durchmesser und 100 Nanometer Dicke mit Mikrowellen. In dem zweiten Laborversuch verwendeten Jasper Chan sowie die Kollegen um Oskar Painter (California Institute of Technology) und Markus Aspelmeyer (Universität Wien) Laserlicht, um einen Lichtwellenleiter bis auf seinen quantenmechanischen Grundzustand abzukühlen.

Der in diesen Versuchen erreichte Zustand ist der Ausgangspunkt für weitere Quantenexperimente, insbesondere für die Erzeugung von Überlagerungszuständen verschiedener Orte des massereichen mechanischen Objekts. Analog zu den Experimenten der Amerikaner um O'Connell, Cleland und Martinis könnte man sich beispielsweise vorstellen, die Überlagerungszustände mittels Photonen durch Lichtdruck auf die Mechanik zu übertragen – auf Grund der geringen Kraftübertragung von Photonen wird die räumliche Trennung der Zustände allerdings ähnlich winzig sein.

Die Herausforderung für solche Makroexperimente liegt darin, komplementär zu den Laborversuchen mit Materiewellen die räumliche Dimension der Überlagerung zu vergrößern. Es gilt, Konzepte der Mikroquantenmechanik mit denen der Materiewelleninterferometrie zu verknüpfen, wie kürzlich von Forschern um Oriol Romero-Isart in der Gruppe von Ignacio Cirac am Max-Planck-Institut für Quantenoptik vorgeschlagen. Die Idee ist, eine Nanokugel in einem Lichtkäfig einzufangen, darin räumlich zu fixieren und danach dieses Objekt durch quantenoptische Kontrolle in ihrem Quantengrundzustand der Bewegung zu präparieren. Ist die Nanokugel fixiert, kann sie als Teilchenquelle für Interferometer dienen. Dann wäre man am Ziel. Man würde massereiche Objekte mit  $10^{10}$  Atomen oder noch mehr benutzen und mit ihnen die Überlagerungszustände um mehr als den Durchmesser der Teilchen voneinander trennen.

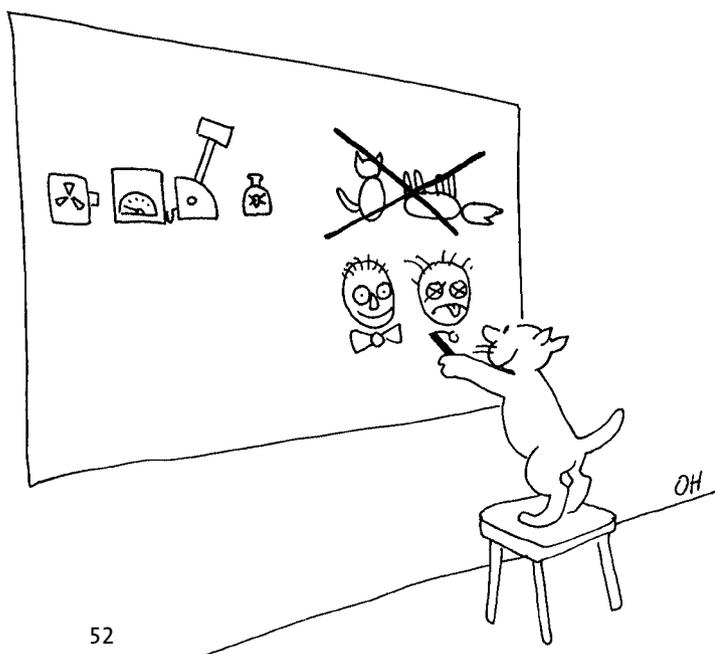
Auf dem Weg zur makroskopischen Quantenphysik erwarten die Physiker enorme Herausforderungen:

- Die Dekohärenz, also die Unterdrückung von Interferenz durch Wechselwirkung mit der Umwelt, muss so klein wie möglich gehalten werden – nur so lassen sich die gesuchten Quantenphänomene sichtbar machen.
- Die Experimente funktionieren daher nur im bestmöglichen Ultrahochvakuum.
- Die innere Temperatur der Teilchen sowie die äußere Umgebung müssen deshalb idealerweise auf die Temperatur von flüssigem Helium abgekühlt werden.

Schon kurzweilige Photonen eines nicht tiefgekühlten Teilchens oder einer warmen Umgebung würden bereits genügend Information über den Ort des Teilchens transportieren. Auch muss sich die quantenmechanische Delokalisierung eines massereichen Objekts nach einem Doppelspalt – für Teilchen im Bereich von  $10^{10}$  amu – einige hundert Sekunden lang ungestört entwickeln können, um messbar zu werden.

Bei so schweren Gebilden kommt nun überraschenderweise die Gravitation ins Spiel, und zwar durch die Erde. Ihre Schwerkraft würde über einen Zeitraum von mehreren Minuten die untersuchten Objekte einfach aus der Apparatur »nach unten« herausziehen. Wie geht man als Experimentator damit um? Es gibt zwei Möglichkeiten, die Erdanziehung zu kompensieren: womöglich durch äußerst homogene elektromagnetische Felder. Sie könnten die Teilchen in der Apparatur schweben lassen, ohne die Entwicklung der Quantenzustände zu stören. Alternativen böten ein Satellit oder die Internationale Raumstation mit ihrer fast schwerelosen Umgebung. Für solche Quantenexperimente könnten diese tatsächlich interessante Forschungsplattformen bereitstellen. Die Europäische Weltraumbehörde ESA fördert bereits solche Ideen. Das Weltall bietet nicht nur Hochvakuum und weit gehend Schwerelosigkeit; es existieren auch viele optische Technologien in einer weltraumtauglichen Ausführung.

Eine weitere Perspektive bieten Experimente direkt im Grenzgebiet zwischen Quantenphysik und Gravitation. Erst



# Sonntag, 20:15 Uhr

Tatortzeit – Cicero blickt hinter die Kulissen des erfolgreichsten TV-Krimis der Republik.  
**Plus:** Von Furtwängler bis Liefers – alle 20 Ermittler-Teams als Cicero-Titel



**JETZT  
PROBE  
LESEN!**

Cicero bietet Hintergrundberichte, Reportagen und spannende Geschichten zu aktuellen Themen aus Politik, Wirtschaft, Wissenschaft und Kultur. **Hier gratis kennenlernen:**

**Telefon:** 0800 282 20 04

**E-Mail:** abo@cicero.de

**Online:** www.cicero.de/probe

**Jetzt auch als App:** www.cicero.de/digital

Cicero-Leserservice

20080 Hamburg

**Bestellnr.:** 875183

**Cicero**  
Magazin für politische Kultur



kürzlich hat dazu ein Forscherteam um Igor Pikovski bei Časlav Brukner an der Universität Wien und Myungshik Kim am Imperial College London einen Vorschlag veröffentlicht. Darin beschreiben die Physiker, wie es per Quantensteuerung massereicher mechanischer Objekte möglich sein sollte, im Labor Vorhersagen diverser Varianten der Quantengravitationstheorie zu testen.

Konkret geht es um die Frage, welche beobachtbaren Konsequenzen die mögliche Existenz einer minimalen Längenskala hat. Die meisten dieser Theorien gehen jedenfalls davon aus, dass es eine solche kleinste Länge gibt: die so genannte Planck-Länge ( $10^{-35}$  Meter). Wenn das zutrifft, würde der Raumbegriff spätestens unterhalb dieser Größenordnung seine Bedeutung verlieren. Dann müsste man aber eine kleine mathematische Korrektur an der Unschärferelation anbringen, wie sie Werner Heisenberg 1927 formuliert hatte. Wie erwähnt besagt dieses Naturgesetz, dass sich Ort und Geschwindigkeit (eigentlich: Impuls) eines Objekts nicht gleichzeitig beliebig genau beobachten lassen. Allerdings lässt diese Relation zu, dass etwa der Ort eines Objekts beliebig genau bestimmt sein kann, wenn nur im Gegenzug die Geschwindigkeit beliebig unbestimmt bleibt. Das würde jedoch der Annahme einer kleinsten (Planck-)Länge widersprechen. Wenn also tatsächlich eine kleinste Längenskala existiert, so muss das in der mathematischen Formel mit einer Korrektur explizit berücksichtigt werden.

Doch der erwartbare Effekt ist so klein, dass es für absehbare Zeit unmöglich sein wird, ihn durch direkte Beobachtung der Orts- und Geschwindigkeitsverteilung eines einzelnen Objekts zu messen. Die höchste Genauigkeit bei Ortsmessungen liegt derzeit bei etwa  $10^{-19}$  Meter. Das liegt also noch 16 (!) Größenordnungen von der Planck-Länge entfernt. Der Vorschlag von Pikovski und Kollegen umgeht diese Begrenzung, indem er die optische Quantensteuerung mechanischer Objekte ausnutzt. Damit könnten Experimentatoren an massereichen mechanischen Objekten mit Hilfe von kurzen Laserpulsen sehr exakte Operationen ausführen, etwa eine Veränderung des Orts oder der Geschwindigkeit. Führt man nun mehrere Operationen dieser Art hintereinander aus, dann lässt sich das Objekt nach einigen Zwischenschritten wieder in seinen ursprünglichen Zustand überführen.

Klassisch könnte man den Anfangs- und Endzustand einer solchen Sequenz nicht unterscheiden. Quantenmechanisch geht das aber. Denn die schrödingersche Wellenfunk-

tion hat sich bei dem Durchlauf verändert. Sie hat eine zusätzliche Phase erhalten, die die Information über die Wegänderung des mechanischen Objekts enthält. Das Erstaunliche des neuen Vorschlags lässt sich fachlich so beschreiben: Die Phase der Mechanik wird auf das Lichtfeld aufgeprägt und auf Grund des Strahlungsdrucks nichtlinear verstärkt.

Werden nun die Lichtpulse optisch gemessen, dann lassen sich Änderungen im Wert der Phase registrieren – auch solche, die durch eine modifizierte heisenbergsche Unschärferelation verursacht werden sollten. Im Prinzip würde sich also so ein Laborexperiment dazu eignen, bestimmte Vorhersagen der Quantengravitation auf der sonst unerreichbaren Planck-Skala zu überprüfen.

Wenn also Makro- und Quantenwelt im Labor zusammentreffen – was werden wir aus diesen Experimenten lernen? Eines ist sicher: Vorläufig wird Raum für verschiedene Deutungen der Resultate bleiben. Sollten alle Experimente bei hoher Masse und Komplexität lediglich die Vorhersagen der etablierten Quantenphysik bestätigen, bliebe der philosophische Erkenntnisstand aus Sicht des Quantenphysikers unverändert. Gleichwohl würden dann etliche alternative Vorstellungen über die Welt ausgeschlossen werden – etwa jene, die den Kollapsmodellen zu Grunde liegen.

Nicht weniger spannend ist die andere Variante. Nehmen wir an, die Forscher würden im Labor auf reproduzierbare Abweichungen von den etablierten Vorhersagen der gängigen Quantentheorie stoßen. Dann wäre es eine Herausforderung, zu entscheiden, ob diese mit »neuer Physik« oder doch im Rahmen der gängigen Quantentheorie ablaufen. ~

#### DIE AUTOREN



**Markus Aspelmeyer** (links) ist Professor für Quantum Information on the Nanoscale an der Universität Wien.

**Markus Arndt** ist Professor für Quantennanophysik an der Universität Wien. Beide sind Mitglied des Vienna Center

for Quantum Science and Technology (VCQ).

#### QUELLEN

**Chan, J. et al.:** Laser Cooling of a Nanomechanical Oscillator into its Quantum Ground State. In: Nature 478, S. 89–92, 2011

**Hornberger, K. et al.:** Colloquium: Quantum Interference of Clusters and Molecules. In: Reviews of Modern Physics 84, S. 157–173, 2012

**Juffmann, T. et al.:** Real-Time Single-Molecule Imaging of Quantum Interference. In: Nature Nanotechnology 7, S. 297–300, 2012

**Pikovski, I. et al.:** Probing Planck-Scale Physics with Quantum Optics. In: Nature Physics 8, S. 393–397, 2012

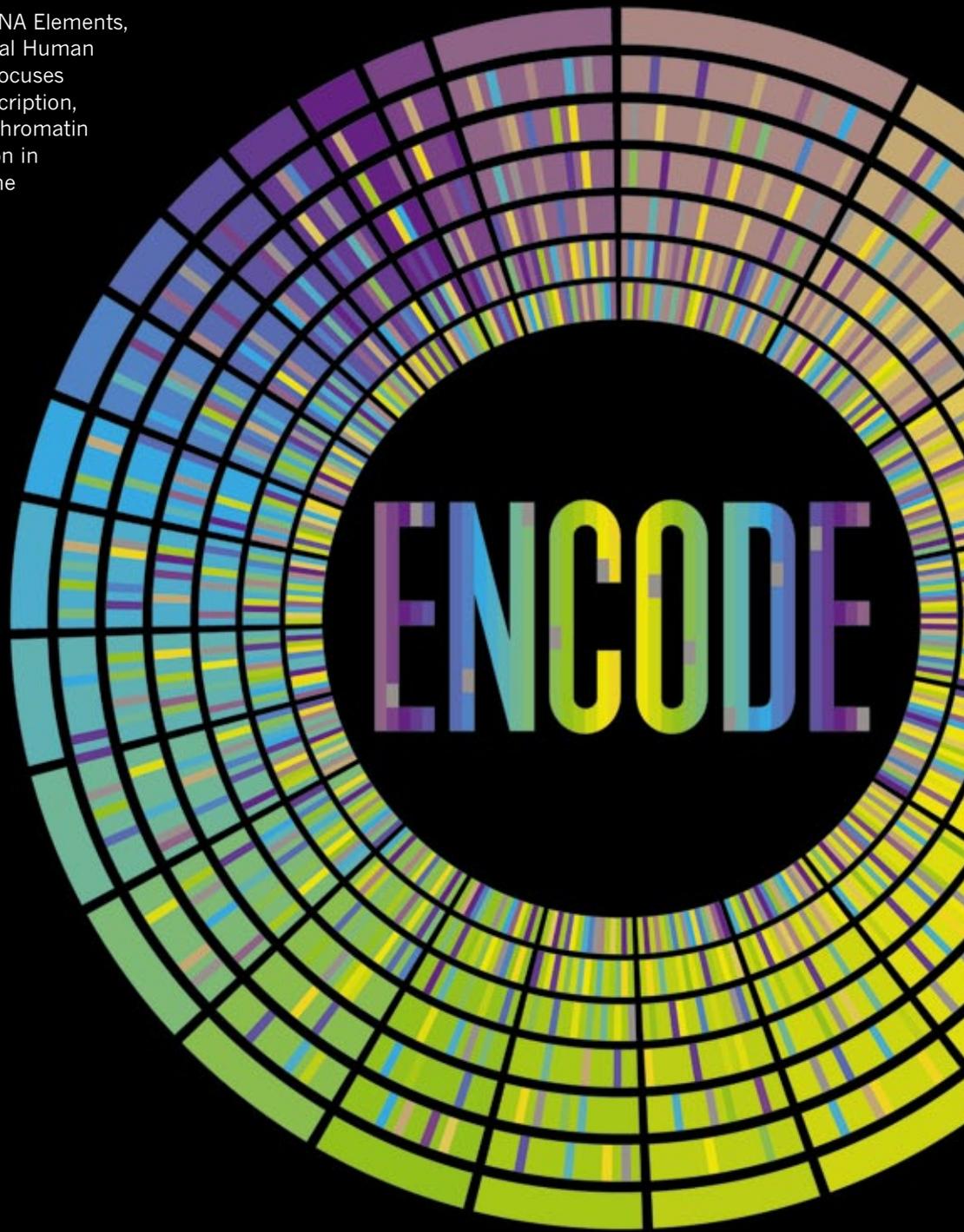
**Zeilinger, A.:** Einsteins Schleier. Die neue Welt der Quantenphysik. C.H.Beck, München, 8. Auflage 2005

#### WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1159808](http://www.spektrum.de/artikel/1159808)

ENCODE, the Encyclopaedia of DNA Elements, is a project funded by the National Human Genome Research Institute and focuses on identifying all regions of transcription, transcription factor association, chromatin structure and histone modification in the human genome sequence. The main findings of ENCODE are now presented in 30 papers published simultaneously in *Nature*, *Genome Research* and *Genome Biology*.

Access videos, Features and the collected research papers, and explore the thematic threads that run through them via the *Nature* ENCODE explorer or the *Nature* ENCODE app.



Produced with support from

**illumina**<sup>®</sup>



[nature.com/ENCODE](http://nature.com/ENCODE)

nature publishing group 

# Schielt der Mond?

Die Mondsichel weist stets exakt zur Sonne – so muss es sein, weil sich Licht geradlinig ausbreitet. Doch manchmal schert sich die Natur nicht darum!

VON H. JOACHIM SCHLICHTING

Nicht wenige Menschen glauben noch immer, die Mondphasen kämen durch Schatten zu Stande, welche die Erde auf den Mond wirft. Ihnen riet einst der Pädagoge und Physikdidaktiker Martin Wagenschein (1896–1988), »dass es nichts nützt, den Mond allein anzustarren«, man müsse ihn schon »mit der Sonne zusammen als Ganzes« ansehen. Ein guter Rat: Der Laie, der dies tut, wird dem Phänomen der Mondphasen früher oder später auf den Grund kommen. Allerdings bringt Wagenscheins Empfehlung ein anderes Problem mit sich.

Das erste kleine Experiment verläuft noch wie erwartet. Verbinden wir die Punkte des Monds, an denen die Schattenlinie beginnt und endet – bei der Mondsichel sind dies die Spitzen der beiden Hörner – mit einer gedachten Geraden. Dann müsste die auf dem Mittelpunkt der Geraden stehende Senkrechte direkt in die Sonne weisen. Anders gesagt: Die erleuchtete Seite des Monds ist auf die Sonne gerichtet, weil er von dieser angestrahlt wird. So sagt es der gesunde Menschenverstand, und so bestätigt es auch die Beobachtung.

Kurz nach Neumond, wenn sich die Mondsichel nahe der untergehenden Sonne befindet und wir beide Himmelskörper mit einem einzigen Blick erfassen können, erweist sich der Zusammenhang zwischen der Richtung der Sonnenstrahlen und der Orientierung der Mondsichel als recht offensichtlich.

Was aber ist einige Tage später? Der Mond nimmt nun zur selben Tageszeit einen größeren Abstand zur Sonne ein, und wir gewinnen den deutlichen Eindruck, dass er »schielt«. Die von der beleuchteten Mondseite ausgehende »Sehlinie« verfehlt ihr Ziel, der Mond scheint geradewegs über die Sonne »hinwegzublicken« (siehe unten stehende Skizze). Demnach müsste das Licht der Sonne auf einem Bogen zum Mond gelangen!

Dieses Phänomen ist seit Langem bekannt. Bis heute wird darüber teilweise kontrovers diskutiert, ob in Fachzeitschriften, Internetforen oder Gesprächen unter Kollegen. Mathematiker, Physiker, Amateurastronomen, Informatiker und Psychologen haben sich von ihm reizen lassen und astro-

**Diese Situation ist in der Realität unmöglich, trotzdem beobachten wir sie gelegentlich: Der Mond scheint nicht direkt zur Sonne zu »blicken«, sondern »schielt« über sie hinweg. Zu einer solchen Täuschung unserer Wahrnehmung kommt es aber nur, wenn wir Mond und Sonne nicht mit einem einzigen Blick erfassen können und stattdessen erst den einen Himmelskörper und, nach einer Drehung des Kopfs, den anderen ins Auge nehmen.**

... die Unregelmäßigkeit der Figur, die auf der einen Seite Relief gewinnt (wo die Strahlen der sinkenden Sonne sie besser erreichen) und auf der anderen in einer Art Zwielficht verharrt.

*Italo Calvino (1923–1985)*

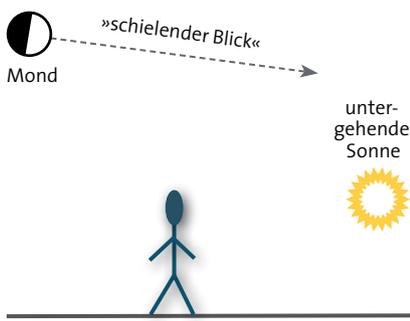
nomische Gegebenheiten, komplexe Überlegungen zur projektiven und sphärischen Geometrie oder auch die Wahrnehmungspsychologie zur Lösung des Rätsels herangezogen. Nicht wenige der Erklärungen, die im Lauf der Zeit gegeben wurden, sind allerdings unvollständig oder gar falsch.

## Trügerische Beobachtung an den Grenzen unserer Wahrnehmung

Dabei ist das Problem schon länger gelöst. Der belgische Astronom und Naturphänomenologe Marcel Minnaert (1893–1970) lieferte bereits um 1940 eine ebenso einfache wie plausible Erklärung. Minnaert verglich die vermeintliche Krümmung der Linie mit derjenigen des Lichtbündels eines Suchscheinwerfers. Steht man senkrecht zur Bahn des Scheinwerfers – und ist die Luft dunstig, so dass von dort genügend Licht in unsere Augen gestreut wird –, scheint das Lichtbündel sowohl in Richtung seiner Quelle als auch seines äußersten »Endes« zum Boden hin gekrümmt zu sein.

»Wie kommt es zu dieser optischen Täuschung?«, fragt Minnaert und gibt folgende Antwort: »Ich neige dazu, die Bahn gekrümmt zu sehen, weil ich sie auf der einen Seite nach links zum Horizont hin abfallen sehe, auf der anderen Seite nach rechts. ... Dabei habe ich aber nicht bedacht, dass ich mich ja zuerst nach links, dann nach rechts gewandt habe. Bei einer einfachen horizontalen geradlinigen Telegrafeneileitung sieht man übrigens genau dasselbe« (kursiv im Original).

Mit dieser Erklärung bringt der belgische Forscher die Grenzen unserer



SPKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: H.-J. SCHLICHTING

Wahrnehmung ins Spiel. Denn sowenig wir die beiden Enden eines weit reichenden Lichtbündels oder einer Telegrafenerleitung mit einem einzigen Blick erfassen können, sowenig gelingt uns das – zumindest nicht im Allgemeinen – mit Sonne und Mond. Wir sehen zunächst auf Letzteren und registrieren, wohin er blickt. Dann wenden wir den Kopf und schauen die Sonne an, die

schon ziemlich dicht über dem Horizont steht. Anschließend vereinigt unser Wahrnehmungsapparat die beiden Bilder zu einem einzigen, die aber nicht zwangsläufig zusammenpassen. Beispielsweise können Blickwinkel, Helligkeit und Größe des Bildausschnitts der Einzelbilder voneinander abweichen, ohne dass uns dies beim Anblick des Gesamtbilds bewusst würde.

In unserem Fall ist es die Perspektive, die sich entscheidend auswirkt. Stellen wir uns vor eine gekachelte Wand und blicken senkrecht auf eine der waagerechten Linien, idealerweise in Augenhöhe (siehe Fotos auf der folgenden Seite). Sie scheint nicht von der Horizontalen abzuweichen. Anschließend schwenken wir den Kopf nach links oder rechts. Nun neigen sich, je weiter wir blicken, alle waagerechten Linien zur mittleren Linie hin.

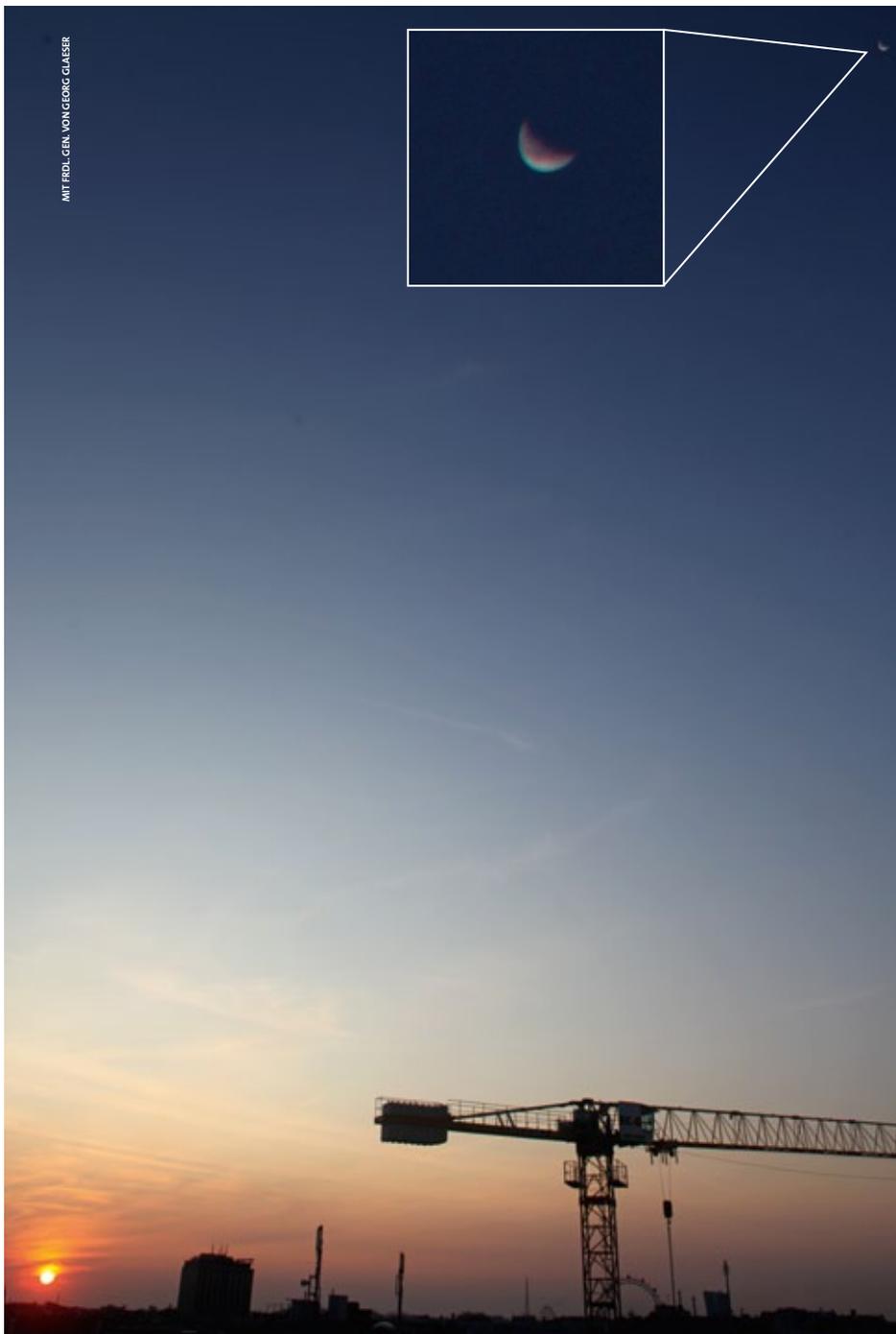
Auf Fotos springt uns diese Tatsache regelrecht ins Auge. Im normalen Leben merken wir davon aber meist nichts, weil uns Perspektiveneffekte vertraut sind: Wer glaubt schon, dass sich die Linien des regelmäßigen Kachelmusters einer Wand nach links und rechts zu neigen beginnen?

Bei der Ansicht des Mondes haben wir mit perspektivischen Einflüssen hingegen keine Erfahrung. Wir gehen ihnen arglos auf den Leim, zumal auch Bezugspunkte wie die rechtwinkligen Linien an einem Haus fehlen.

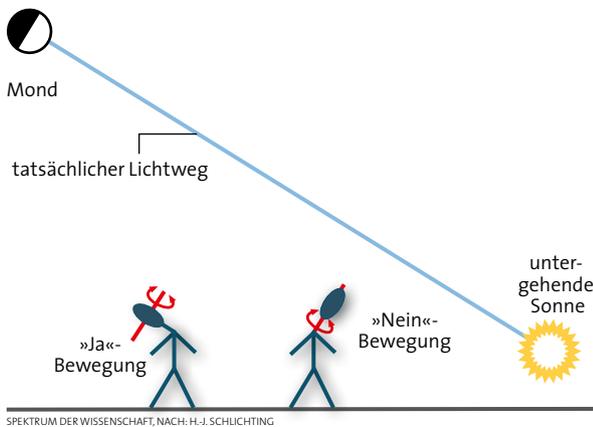
### Das Beweisfoto gelingt, wenn Sonne und Mond günstig stehen

Letzten Endes benötigt man die Physik aber doch, neben geometrischen und wahrnehmungspsychologischen Überlegungen, um das Phänomen vollständig zu durchschauen. Bei günstigen Himmelskonstellationen können wir Sonne und Mond in einem einzigen Bild erfassen. Im Fall eines um 90 Grad gegen die Sonne verschobenen Halbmonds ist das mit einem entsprechenden Weitwinkelobjektiv gerade noch verzerrungsfrei möglich: Auf solchen Fotos blickt der Mond der Sonne brav

Sonne und Mond sind selten gleichzeitig am Himmel zu sehen. Diese Aufnahme gelang bei Sonnenuntergang mit einem 20-Millimeter-Weitwinkelobjektiv. Der Winkel zwischen Sonne und Mond betrug rund 90 Grad. Wie zu erwarten, blickt der Mond gemäß den Regeln der geometrischen Optik direkt zur Sonne. Sein gelegentliches Schielen ist tatsächlich nur eine Sinnestäuschung.



MIT FRODL GERH. VON GEBORG GLAESE



Geeignete Kopfbewegungen beenden das Schielen des Mondes. Der Kopf muss sich dafür um eine Achse (rote Linie) drehen, die senkrecht auf der von Mond, Sonne und Beobachter aufgespannten Ebene steht. Die in dieser Ebene liegende Linie, also der Lichtweg, krümmt sich dann nicht und das Schielen bleibt aus. Analog dazu die Fotos: Der vor einer Wand stehende Fotograf richtet das Objektiv (analog zum Kopf des Beobachters) nach links (Blick zum Mond, a), nach vorn (b) und schließlich nach rechts (Blick zur Sonne, c). Auch hier steht die Drehachse senkrecht auf der von den Bezugspunkten aufgespannten Ebene. Die in dieser Ebene liegende Linie – auf halber Höhe der Fotos zu sehen – entspricht dem Lichtweg. Und tatsächlich: Sie krümmt sich nicht.



SPKTRUM/DER WISSENSCHAFT / ANIK BECKERS

direkt ins Antlitz (Foto S. 57). Man muss allerdings genau hinschauen, denn er erscheint dann so klein, dass seine Blickrichtung nur mit Mühe zu erkennen ist.

Der Mond lässt das Schielen aber auch, wenn wir von der Nordhalbkugel in Richtung Süden reisen. Je näher wir nämlich der Region zwischen den Wendekreisen kommen, desto mehr nimmt die Mondsichel die Form eines Nachens an, weist ihre »Öffnung« also nach oben. Die türkische Nationalflagge etwa zeigt noch einen Mond, der zur Seite geöffnet ist, während er sich auf der Flagge des südlicher gelegenen Mauretaniens nach oben öffnet. Dort steht der Mond mehr oder weniger senkrecht über der Sonne, weshalb allenfalls ein kleiner seitlicher Perspektiveneffekt ins Spiel kommt. Problematisch wird es also nur, wenn – wie in unseren Breiten – größere horizontale Abweichungen zwischen Sonnen- und Mondposition auftreten.

Wir brauchen aber nicht zwingend eine Weitwinkelaufnahme, um den Effekt aufzuheben. Stattdessen können wir auch den Kopf so neigen, wie er in

Äquaturnähe natürlicherweise orientiert wäre, und dann – als ob wir ein »Ja« ausdrücken wollten – mit dem Kopf nicken.

Das funktioniert, weil wir den Kopf dabei um eine Achse senkrecht zu einer Ebene drehen, die durch Sonne, Mond und Beobachter aufgespannt wird – nun kann der Mond schon aus Symmetriegründen nicht schielen (siehe Grafik oben). Der Augenschein ist also überlistet und der gesunde Menschenverstand zufrieden gestellt.

Man kann den Kopf auch noch auf eine weitere – und bequemere – Art um diese Achse drehen. Dazu neigt man ihn so, dass eine Parallele der Verbindungslinie Sonne-Mond durch die Ohren verläuft, und bewegt ihn wie bei einem »Nein«; dann ist ein schielender Mond ebenfalls ausgeschlossen.

Am überzeugendsten ist schließlich eine Schnur, die man so vor die Augen spannt, dass sie Mond und Sonne scheinbar verbindet. Man muss den Trick selbst ausprobieren, um sich von seiner Wirksamkeit zu überzeugen: Diesmal verschwindet das vermeintliche Schielen auf einen Schlag. ☺

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.

QUELLEN

- Glaeser, G., Schott, K.:** Geometric Considerations About Seemingly Wrong Tilt of Crescent Moon. In: KoG – Scientific-Professional Journal of Croatian Society for Geometry and Graphics 13, S. 19–26, 2009
- Minnaert, M.:** Licht und Farbe in der Natur. Birkhäuser, Basel, Boston, Berlin 1992, S. 190–191
- Steinrücken, B.:** Über gerade und gekrümmte Linien am Himmel – oder: Warum zeigt die Mondsichel nicht genau zur Sonne? Download unter <http://sternwarte.isoplanbar.net/acms/data/uploads/dateien/pdf/mondsichel.pdf>

WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1159815](http://www.spektrum.de/artikel/1159815)

# Unsere Neuerscheinungen



## STERNE UND WELTRAUM 10/2012

**Sterne und Weltraum** bietet monatlich eine umfassende Weltraumperspektive für alle, die von der kosmischen Umgebung unserer Erde fasziniert sind. Experten ihres Fachs beschreiben für Sie das spannende Geschehen im Weltall. Themen der aktuellen Ausgabe sind:

- > Erkundung des Sonnensystems: Von den Anfängen bis Curiosity
- > Kosmische Strahlung: Blick ins All seit 100 Jahren
- > Frühes Universum: Wann entstanden die schweren Elemente?
- > Airglow: Seltene Erscheinung über Deutschland

**Sterne und Weltraum** kostet € 7,90 als Einzelheft und ist auch im Abonnement (12 Ausgaben pro Jahr) für € 85,20 inkl. Inlandsporto (ermäßigt auf Nachweis € 64,-) 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.**



Serie Kindesentwicklung Nr. 7

## ERZIEHUNG ZUM MITEINANDER

Der Umgang mit anderen Menschen fällt vielen Kindern nicht leicht. Manche sind einfach zu schüchtern, manche verhalten sich aggressiv, andere werden von Gleichaltrigen sogar regelmäßig ausgegrenzt. Woran liegt das? Und was können Eltern und Pädagogen tun, damit Kinder Selbstvertrauen gewinnen und besser in die Gemeinschaft hineinfinden? Der siebte Teil unserer **Serie Kindesentwicklung** rückt die Förderung von sozialen und emotionalen Fähigkeiten in den Fokus. Aus dem Inhalt:

- > Spezial: Wie entsteht ADHS?
- > Riskantes Spielen fördert das Selbstvertrauen
- > Was bringen Ganztagschulen?

**Das Spezial Kindesentwicklung Nr. 7 »Erziehung zum Miteinander« kostet € 8,90.**

**Weitere Hefte der Reihe finden Sie unter: [www.gehirn-und-geist.de/serie](http://www.gehirn-und-geist.de/serie)**

Alle Hefte sind im Handel erhältlich oder unter:

# Der LHC nach Higgs: Die Suche bleibt spannend

Am 4. Juli 2012 verkündeten Physiker des europäischen Forschungszentrums CERN, am Beschleuniger LHC ein neues Teilchen entdeckt zu haben. Es könnte sich um das schon 1964 postulierte Higgs-Boson handeln – der letzte noch fehlende Baustein des Standardmodells der Elementarteilchenphysik. Über die Bedeutung des Funds hat »Spektrum der Wissenschaft« mit **Siegfried Bethke** gesprochen. Der Direktor am Max-Planck-Institut für Physik in München spielt eine führende Rolle am CERN und ist maßgeblich am LHC-Experiment ATLAS beteiligt.

*Spektrum der Wissenschaft: Herr Professor Bethke, das Higgs-Boson, das nun mutmaßlich nachgewiesen wurde, soll Elementarteilchen ihre Masse verleihen. Erklärt es somit auch, warum wir selbst etwas wiegen?*

**SIEGFRIED BETHKE:** Wir müssen zwei Massebegriffe unterscheiden. Da ist zum einen die Masse der Elementarteilchen, also die Masse von fundamentalen Partikeln wie den Elektronen, Quarks oder den Kraftteilchen. Für sie ist das Higgs zuständig. Zum anderen ist da die makroskopische Masse, die wir aus dem Alltag kennen. Wenn ein Gegenstand, sagen wir, 100 Kilogramm auf die Waage bringt, dann ergibt sich seine Masse aus den Atommassen. Die Masse eines Atoms ist aber eben nicht einfach die Summe, die man erhält, wenn man die Massen der jeweils drei Quarks zusammenrechnet, aus denen die Kernbausteine, also Protonen und Neutronen, bestehen. Dieser Wert ist makroskopisch sogar fast vernachlässigbar. Stattdessen ergibt sich die Atommasse vor allem aus der enorm starken Bindungsenergie der Quarks – und die ist laut Einsteins Relativitätstheorie äquivalent zur Masse. Selbst wenn Quarks masselos wären, würden die Gegenstände in unserer Welt also fast nicht an Gewicht verlieren. Anders gesagt: Mit der makroskopischen Masse hat das Higgs kaum etwas zu tun, wohl aber mit der Masse von Elementarteilchen.

*Was genau haben die LHC-Forscher denn jetzt entdeckt?*

»Der Nachweis des neuen Teilchens ist äußerst spannend. Aber vor allem suchen wir nach **neuer Physik jenseits des Standardmodells**«

**BETHKE:** Sie haben an den beiden Detektoren ATLAS und CMS ein Teilchen mit einer Masse von 125 bis 126 Gigaelektronvolt entdeckt, bei dem es sich um das lang gesuchte Higgs-Teilchen handeln könnte. Als das CERN den Fund verkündete, lag die Signifikanz der Messung bei fünf Sigma. Die Wahrscheinlichkeit, dass es sich um eine Fehlmessung handelte, betrug weniger als eins zu drei Millionen. Mittlerweile ist die Signifi-

kanz sogar auf sechs Sigma gestiegen. Mit Sicherheit ist das Teilchen ein Boson, trägt also ganzzahligen Spin, und es deutet auch alles darauf hin, dass wir tatsächlich auf ein Spin-0-Teilchen gestoßen sind, wie es das Higgs-Boson

sein muss. Um es endgültig als Higgs zu identifizieren, brauchen wir allerdings noch weitere Untersuchungen.

*Das Higgs ist der letzte noch nicht nachgewiesene Baustein im Standardmodell der Elementarteilchenphysik. Wie bedeutend ist der neue Fund?*

**BETHKE:** Das ist in jedem Fall äußerst spannend, wie jedes Mal, wenn ein neues Teilchen entdeckt wird. Aber man muss unterscheiden. Wenn es sich als das Higgs entpuppt, das vom Standardmodell vorausgesagt wird, dann erklärt es uns, wie die Teilchen zu ihren Massen kommen. Der Nachweis des Higgs ist aber fast eine Standardaufgabe, die wir einfach abhaken wollen. Vor allem suchen wir nach einer neuen Physik, nach einer Physik jenseits des Standardmodells der Teilchenphysik. Wir wissen, dass da etwas sein muss, denn das Standardmodell lässt eine Reihe fundamentaler Fragen offen.

Siegfried Bethke ist Direktor am Max-Planck-Institut für Physik. Im Leitungsgremium des europäischen Forschungszentrums CERN vertritt er Deutschland und die Interessen der deutschen Teilchenphysiker. Sein Team entwickelte große Teile des LHC-Detektors ATLAS, darunter die äußeren Myonenkammern, mit denen sich einer der Hauptzerfallskanäle des Higgs-Bosons vermessen lässt. Ebenfalls zur Abteilung gehören Sandra Kortner, Leiterin der 300-köpfigen Higgs-Gruppe innerhalb des 3000-köpfigen internationalen ATLAS-Teams, sowie ATLAS-Computing Koordinator Hans von der Schmitt.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / MANFRED ZENTSCH

Insbesondere für Stringtheoretiker wäre es extrem aufregend, wenn sich das neue Teilchen als supersymmetrisch erweisen würde. Die Stringtheorie versucht, alle vier Grundkräfte zu einer einheitlichen Theorie zusammenzufassen. Dabei setzt sie die so genannte Supersymmetrie oder kurz Susy zwingend voraus. Laut Susy existiert zwischen Bosonen, den Teilchen mit ganzzahligem Spin, und Fermionen, solchen mit halbzahligem Spin, eine fundamentale Symmetrie. Nachgewiesen wurde sie bislang aber nicht. Wenn sich am LHC kein entsprechender Hinweis findet, haben die Stringtheoretiker also ein echtes Problem.

*Besteht denn die Möglichkeit, dass die Forscher statt auf das Standardmodell-Higgs auf ein Susy-Teilchen gestoßen sind?*

**BETHKE:** Durchaus, der neue Fund könnte auch ein Susy-Higgs sein. Dann wäre es vermutlich das leichteste aus einer ganzen Serie von mindestens fünf supersymmetrischen Higgs-Teilchen, und in der nächsten Zukunft würde man am LHC möglicherweise noch weitere davon entdecken. Aber die Supersymmetrie besitzt so viele frei wählbare Parameter, dass sie zahlreiche unterschiedliche Entdeckungen im Nachhinein erklären, aber wenig voraussagen kann. Es wäre ein großer Zufall, wenn diese Parameter in der physikalischen Realität genau jene Werte annehmen, bei denen das Susy-Higgs dem Standardmodell-Higgs stark ähnelt. Möglich ist das aber.

*Wie viel hat das neue Teilchen denn überhaupt mit der Stringtheorie zu tun?*

**BETHKE:** Erst einmal sehr wenig. Die Stringtheorie hat keine Vorhersagen über das Standardmodell-Higgs gemacht, die

wir jetzt überprüfen könnten. Der Fund würde die Stringtheorie nur dann voranbringen, wenn er ein Susy-Teilchen wäre.

Falls sich Susy bei den am LHC erreichbaren Energien auch in den kommenden Jahren nicht zeigen sollte, wird es schwierig. Die Theoretiker können ihre Parameter zwar stets so verändern, dass dann eben bei höheren Energien mit entsprechenden Hinweisen zu rechnen ist. Aber solche konstruierten Parameterräume würden die Supersymmetrie immer unwahrscheinlicher erscheinen lassen.

Die Entdeckung fällt allerdings in eine Zeit, in der sich allmählich das Bewusstsein der Stringtheoretiker entwickelt, dass sie ihre Theorie auch phänomenologisch verankern sollten. Sie müssen also Voraussagen treffen, die in Experimenten überprüft werden können. Diese Haltung entwickelt sich gerade erst und ist noch nicht weit verbreitet. Andererseits gibt es Theoretiker wie Dieter Lust, der ebenfalls Direktor hier am MPP, dem Max-Planck-Institut für Physik, ist, die schon entsprechende Anstrengungen unternehmen. Gemeinsam mit Kollegen hat er aus der Stringtheorie Effekte abgeleitet, die sich am LHC messen lassen könnten. Sie würden auf die Existenz von zusätzlichen Raumdimensionen hinweisen, wie sie von der Stringtheorie vorhergesagt werden. Diese Vorhersage soll sogar nur wenig von den gewählten Parametern abhängen.

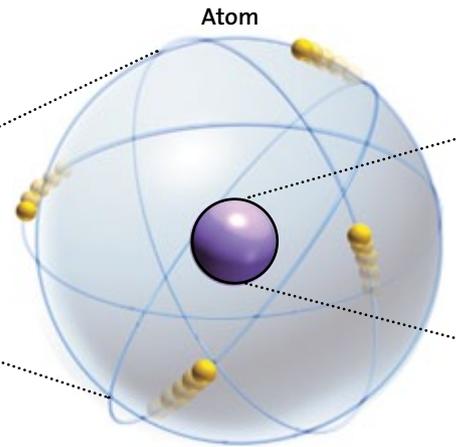
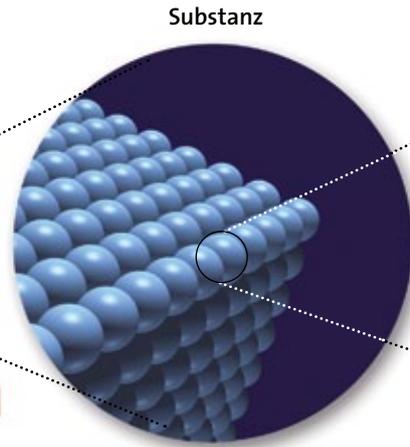
*Was versprechen Sie selbst sich von der Stringtheorie?*

**BETHKE:** Als experimenteller Physiker habe ich mich mit der ihr zu Grunde liegenden Supersymmetrie nie so recht anfreunden können. Schon im Standardmodell, mit dem Teilchenphysiker fast alle ihre Beobachtungen erklären können, gibt es rund 25 freie Parameter. Die können wir nicht aus der

# Was die Welt im Innersten zusammenhält

**Der Blick ins Innere eines Stückchens Materie** verrät, dass es letztlich nur aus ganz wenigen Sorten fundamentaler Bausteine besteht. Im Rahmen des Standardmodells der Elementarteilchen-

physik kennen die Physiker ein Dutzend elementarer Materieteilchen, so genannte Quarks und Leptonen. Jedes der zwölf Teilchen hat eine charakteristische Flavour-Quantenzahl (»Geschmack«).



## Quarks

**Aus ihnen bestehen** Protonen, Neutronen und ein regelrechter Zoo sehr kurzlebiger Teilchen. Quarks tragen eine so genannte Farbladung (rot, grün oder blau) und wurden nie einzeln beobachtet.

<b>up</b> elektrische Ladung: $+2/3$ Masse: 2 MeV Baustein der gewöhnlichen Materie. Zwei up-Quarks und ein down-Quark ergeben ein Proton.	<b>u</b>	<b>charm</b> elektrische Ladung: $+2/3$ Masse: 1,25 GeV Instabiler Verwandter des up-Quarks mit größerer Masse. Bestandteil des $J/\psi$ -Teilchens, das bei der Konzeption des Standardmodells eine Rolle spielte.	<b>c</b>	<b>top</b> elektrische Ladung: $+2/3$ Masse: 173 GeV Schwerstes bekanntes Teilchen. Seine Masse entspricht etwa derjenigen eines Wolframatoms.	<b>t</b>
<b>down</b> elektrische Ladung: $-1/3$ Masse: 5 MeV Baustein der gewöhnlichen Materie. Zwei down-Quarks und ein up-Quark ergeben ein Neutron.	<b>d</b>	<b>strange</b> elektrische Ladung: $-1/3$ Masse: 95 MeV Instabiler Verwandter des down-Quarks mit größerer Masse. Baustein des Kaons, eines sehr gründlich untersuchten Teilchens.	<b>s</b>	<b>bottom</b> elektrische Ladung: $-1/3$ Masse: 4,2 GeV Instabiler Verwandter des down- und des strange-Quarks mit noch höherer Masse. Bestandteil des intensiv untersuchten B-Mesons.	<b>b</b>

## Bosonen

**Jede Wechselwirkung wird** durch ein eigenes Teilchen / eine Teilchengruppe übertragen. Nur der endgültige Nachweis des Higgs-Teilchens steht noch aus.

<b>Photon</b> elektrische Ladung: 0 Masse: 0 Überträger der elektromagnetischen Kraft. Lichtquanten wirken über unbegrenzte Entfernungen hinweg auf elektrisch geladene Teilchen.	<b><math>\gamma</math></b>
<b>Z-Boson</b> elektrische Ladung: 0 Masse: 91 GeV Überträger der schwachen Wechselwirkung bei Reaktionen, welche die Identität der Teilchen nicht ändert. Seine Reichweite beträgt nur etwa $10^{-18}$ Meter.	<b>Z</b>
<b><math>W^+ / W^-</math>-Bosonen</b> elektrische Ladung: $+1$ oder $-1$ Masse: 80,4 GeV Überträger der schwachen Wechselwirkung bei Reaktionen, bei denen sich der »Geschmack« (Flavour) und die Ladung der Teilchen ändern. Auch ihre Reichweite beträgt nur $10^{-18}$ Meter.	<b>W</b>
<b>Gluonen</b> elektrische Ladung: 0 Masse: 0 Acht verschiedene Gluonen übertragen die starke Wechselwirkung, wobei sie auf Quarks und andere Gluonen wirken. Sie sind immun gegen die elektromagnetische und schwache Wechselwirkung. Ihre Reichweite beträgt weniger als $10^{-15}$ Meter.	<b>g</b>

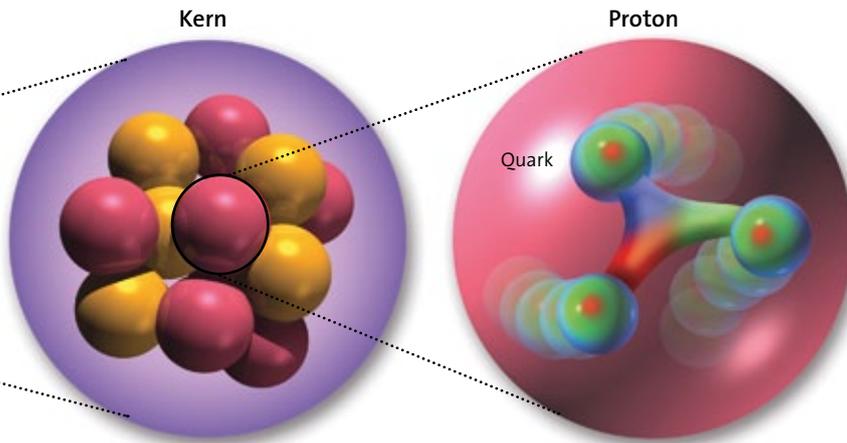
## Leptonen

**Diese Teilchen sind immun gegen die starke Kraft** und lassen sich einzeln beobachten. Die hier gezeigten Neutrinos treten in Wahrheit als Mischungen voneinander auf. Ihre genauen Massen sind unklar, betragen aber maximal einige wenige Elektronvolt.

<b>Elektron-Neutrino</b> elektrische Ladung: 0 Immun gegen die elektromagnetische und die starke Kraft. Es tritt deshalb kaum mit Materie in Wechselwirkung, spielt jedoch eine Rolle beim radioaktiven Zerfall.	<b><math>\nu_e</math></b>	<b>Myon-Neutrino</b> elektrische Ladung: 0 Taucht bei Reaktionen auf, die in Zusammenhang mit der schwachen Wechselwirkung stehen und an denen Myonen beteiligt sind.	<b><math>\nu_\mu</math></b>	<b>Tau-Neutrino</b> elektrische Ladung: 0 Eine weitere Variante des Neutrinos, die bei Reaktionen mit Tau-Leptonen eine Rolle spielt.	<b><math>\nu_\tau</math></b>
<b>Elektron</b> elektrische Ladung: $-1$ Masse: 0,511 MeV Das leichteste geladene Teilchen, bekannt als Träger elektrischer Ströme. Aus ihm besteht die Hülle von Atomen.	<b>e</b>	<b>Myon</b> elektrische Ladung: $-1$ Masse: 106 MeV Schwerere Variante des Elektrons mit einer Lebensdauer von 2,2 Mikrosekunden. Wurde in der kosmischen Strahlung entdeckt.	<b><math>\mu</math></b>	<b>Tau</b> elektrische Ladung: $-1$ Masse: 1,78 GeV Weitere instabile und noch schwerere Variante des Elektrons mit einer Lebensdauer von 0,3 Pikosekunden.	<b><math>\tau</math></b>

**Higgs** (2012 mutmaßlich am LHC beobachtet)  
 elektrische Ladung: 0  
 Masse: 125–126 GeV  
 Soll Quarks, Leptonen und Z-/W-Bosonen mit Masse ausstatten. Seine Existenz würde darauf hindeuten, dass der Kosmos von einem so genannten Higgs-Feld erfüllt ist.

Hinzu kommen die Bosonen. Diese sind Wechselwirkungsteilchen, sie übertragen also Kräfte. Das Standardmodell behandelt all diese Partikel als geometrische Punkte ohne Ausdehnung; die Größen spiegeln hier ihre Massen wider.

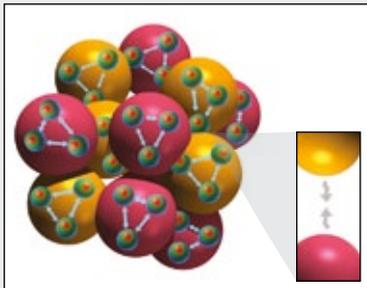


## Wie die Kräfte wirken

**Bei der Wechselwirkung** zwischen mehreren kollidierenden Teilchen können sich deren Energie, Impuls und Typ ändern. Aber auch ein einzelnes, isoliertes Teilchen kann auf Grund einer solchen Wechselwirkung spontan zerfallen.

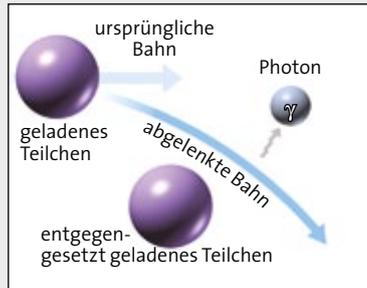
### STARKE WECHSELWIRKUNG

Sie wirkt auf Quarks und Gluonen und bindet diese aneinander, so dass Protonen, Neutronen und andere »Hadronen« entstehen. Indirekt bewirkt sie auch den Zusammenhalt zwischen Protonen und Neutronen in Atomkernen.



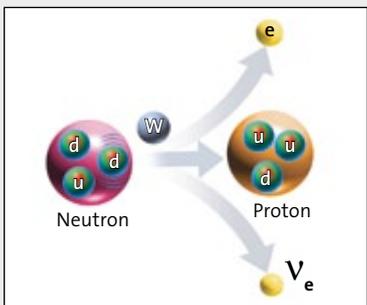
### ELEKTROMAGNETISMUS

Die elektromagnetische Kraft wirkt auf geladene Teilchen, ohne sie zu verändern. Sie sorgt dafür, dass sich entgegengesetzt geladene Teilchen anziehen und solche mit gleichnamiger Ladung abstoßen.



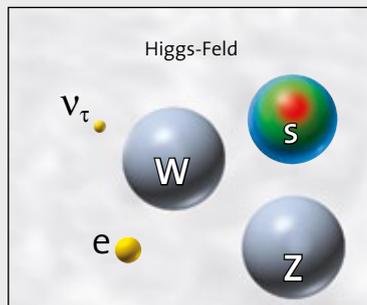
### SCHWACHE WECHSELWIRKUNG

Sie wirkt auf Quarks und Leptonen. Ihr bekanntester Effekt, der radioaktive Betazerfall, ist die Umwandlung eines d- in ein u-Quark. Dabei wird ein Neutron zu einem Proton; zusätzlich entstehen ein Elektron und ein Neutrino.



### HIGGS-WECHSELWIRKUNG

Laut Standardmodell erfüllt das Higgs-Feld den Raum wie ein Sirup, der die W- und Z-Bosonen bremst und so die Reichweite der schwachen Kraft herabsetzt. Quarks und Leptonen erhalten durch Wechselwirkung mit ihm eine Masse.



Theorie ableiten, sondern nur durch Messung ermitteln, darunter so wichtige wie die Massen der Teilchen und die Kopplungsstärken der fundamentalen Wechselwirkungen. Die Supersymmetrie ist zwar logisch und ästhetisch sehr rund. Aber sie vervielfacht die Zahl der freien Parameter und stellt jedem Elementarteilchen einen Superpartner zur Seite. Und das hilft mir natürlich überhaupt nicht weiter, wenn ich experimentell die Welt beschreiben will.

*Was ist zu tun, um die Identität des neuen Teilchens zweifelsfrei zu klären?*

**BETHKE:** Wenn Susy existiert, kommen bei den Protonenkollisionen am LHC auch supersymmetrische Quarks und so weiter ins Spiel. Dies würde die Zerfallsraten des Susy-Higgs stark beeinflussen. An den Abweichungen gegenüber den vom Standardmodell vorausgesagten Higgs würden wir es dann erkennen, denn außer der Masse wissen wir theoretisch alles über das Higgs. Wir brauchen jetzt also wesentlich mehr Messungen, um die Zerfallsraten zu bestimmen.

Da der LHC-Beschleuniger und die Detektoren sehr effektiv und rundlaufen, könnten wir allein in diesem Jahr fünfmal mehr Daten erfassen, als wir bis Ende 2011 gewonnen haben. Das wäre fantastisch. Außerdem wird der Beschleuniger einige Monate später als geplant zu Wartungszwecken heruntergefahren, nämlich erst im Februar oder März 2013. Die letzten vier Wochen sind allerdings wieder den Experimenten vorbehalten, bei denen statt Protonen schwere Bleiionen aufeinandergeschossen werden. Dabei geht es unter anderem darum, das so genannte Quark-Gluon-Plasma zu untersuchen, einen Materiezustand, wie er unmittelbar nach dem Urknall geherrscht haben dürfte (siehe »Die Jagd nach dem Quark-Gluon-Plasma«, SdW 5/2011, S. 86; die Red.).

*Welche Erkenntnisse bietet der LHC bislang noch?*

**BETHKE:** Die Suche gilt tatsächlich nicht nur dem Higgs. Natürlich wird der gesamte Masse- und Energiebereich auch nach anderen neuen Signalen abgesucht. Beispielsweise fahnden die Forscher mit viel Ehrgeiz nach Gluinos. Das sind die supersymmetrischen Partner der Gluonen, also jener Kraftteilchen, die die starke Kernkraft vermitteln. Und sie suchen nach den Superpartnern von Elektronen und Quarks. Außerdem könnten in den Daten Signale wie die von Dieter Lust vorher-

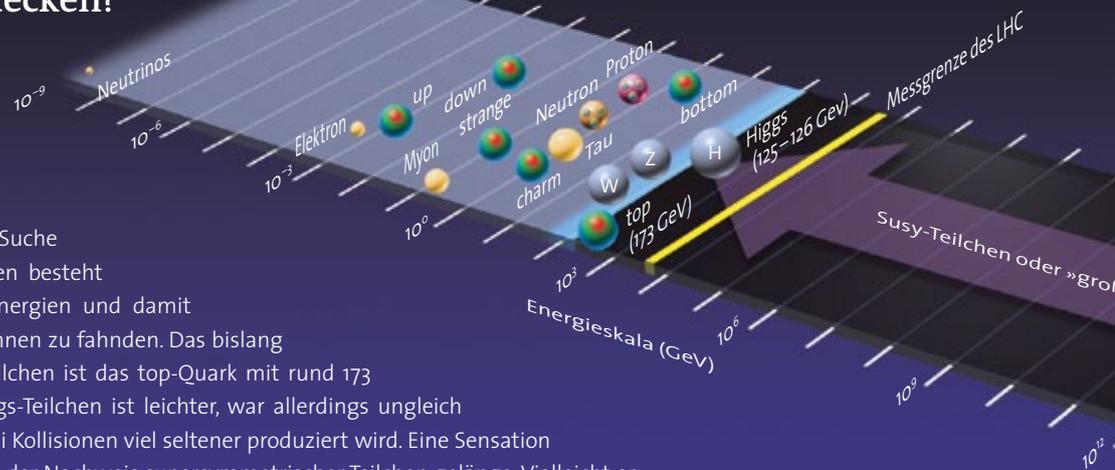
gesagten auftauchen, die auf höhere Dimensionen jenseits unserer dreidimensionalen Welt hinweisen.

Zudem haben die Forscher ein besonders ehrgeiziges Ziel. Die Supersymmetrie wird ja nicht nur deshalb geliebt, weil sie schön symmetrisch ist, wie die Physiker das immer wollen, sondern weil sie auch einen Kandidaten für die Dunkle

Materie liefert. Das war für mich persönlich ein vielleicht noch größerer Ansporn, am Bau des LHC mitzuwirken. Die Dunkle Materie stellt 85 Prozent der Masse im Universum, aber die Frage, woraus sie besteht, ist derzeit völlig ungeklärt. Der heißeste Kandidat ist das leichteste supersymmetrische Teilchen, das keine Ladung besitzt.

## Was könnten die Forscher als Nächstes entdecken?

Eine der Strategien bei der Suche nach neuen Elementarteilchen besteht darin, bei immer höheren Energien und damit auch höheren Massen nach ihnen zu fahnden. Das bislang schwerste nachgewiesene Teilchen ist das top-Quark mit rund 173 GeV. Das (mutmaßliche) Higgs-Teilchen ist leichter, war allerdings ungleich schwerer zu finden, weil es bei Kollisionen viel seltener produziert wird. Eine Sensation wäre, wenn am LHC nun auch der Nachweis supersymmetrischer Teilchen gelänge. Vielleicht erstreckt sich im Bereich höherer Energien aber auch eine »große Wüste«, in der selbst mit noch größeren Beschleunigern keine fundamental neuen Erkenntnisse mehr zu gewinnen wären. Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik würde dann bis zu jenen extrem hohen Energien Gültigkeit besitzen, wie sie kurz nach dem Urknall geherrscht haben. Damals waren die Naturkräfte noch in einer einzigen Kraft vereint.



## Die (fast) vergessenen Daten

*Sind veraltete Teilchenbeschleuniger und Experimente erst einmal abgeschaltet, gehen auch die gewonnenen Rohdaten allmählich verloren. Moderne Computer können die Speichermedien von einst schlicht nicht mehr lesen. LHC-Forscher Siegfried Bethke will die Daten retten, denn sie besitzen noch erheblichen wissenschaftlichen Wert.*

Immer größer werden die Beschleuniger, an denen Physiker ihre Theorien erproben und weitere fundamentale Bausteine unserer Welt zu entdecken hoffen. Ihre Vorgänger gehen derweil außer Betrieb. Zuletzt wurde 2011 das Tevatron am Fermilab in den USA abgeschaltet. 2007 ging die Hadron-Elektron-Ring-Anlage HERA am Hamburger DESY-Labor außer Betrieb. 2000 schossen die letzten Teilchen durch den Large Electron Positron Collider (LEP) am europäischen Forschungszentrum CERN. Er machte dem Large Hadron Collider (LHC) Platz, der im einstigen LEP-Tunnel errichtet wurde. PETRA, die Positron-Elektron-Tandem-Ring-Anlage am DESY, ist ebenfalls schon lange Geschichte, zumindest in ihrer ursprünglichen Ausbaustufe. 1979 hatte sie für Furore gesorgt, als Forscher darin erstmals das Gluon nachwiesen. Das Träger Teilchen der starken Wechselwirkung hält Quarks zusammen, und zwar so, dass je drei von ihnen die Protonen und Neutronen im Atomkern bilden.

Heute, so könnte man meinen, sind die damals gewonnenen Rohdaten für niemanden mehr von Interesse; sie wurden ausgewertet, und die Ergebnisse stehen fest. »Doch alte Daten aus der Teilchenphysik sind extrem wertvoll«, sagt Siegfried Bethke (siehe nebenstehendes Interview), einer der Direktoren am Münchener Max-Planck-Institut für Physik. »Teilweise wurden sie in niedrigen Energiebereichen gewonnen, in denen heute kein Mensch mehr misst«, erklärt er. »Unter anderem können sie uns zu neuen Erkenntnissen über die starke Wechselwirkung verhelfen.«

Als Bethke 1995 den Leibniz-Preis erhielt, nutzte er darum sein Preisgeld, um ein kleines Team aufzubauen. Mittlerweile konnten die Forscher unter anderem alte Messergebnisse von PETRA und LEP retten. Bis dahin hatten die Rohdaten das Schicksal aller digitalen Überlieferung geteilt: Meist waren sie nicht mehr lesbar, weil die Hardware von einst nicht mehr funktionierte, die um-

Wie steht es gegenwärtig um Hinweise auf diese neue Physik?

**BETHKE:** Viele der entsprechenden Analysen sind schon veröffentlicht, sie beruhen vor allem auf den Daten bis Ende 2011. Leider konnten die Wissenschaftler keinerlei weitere Entdeckungen vermelden. Das gute alte Standardmodell tri-

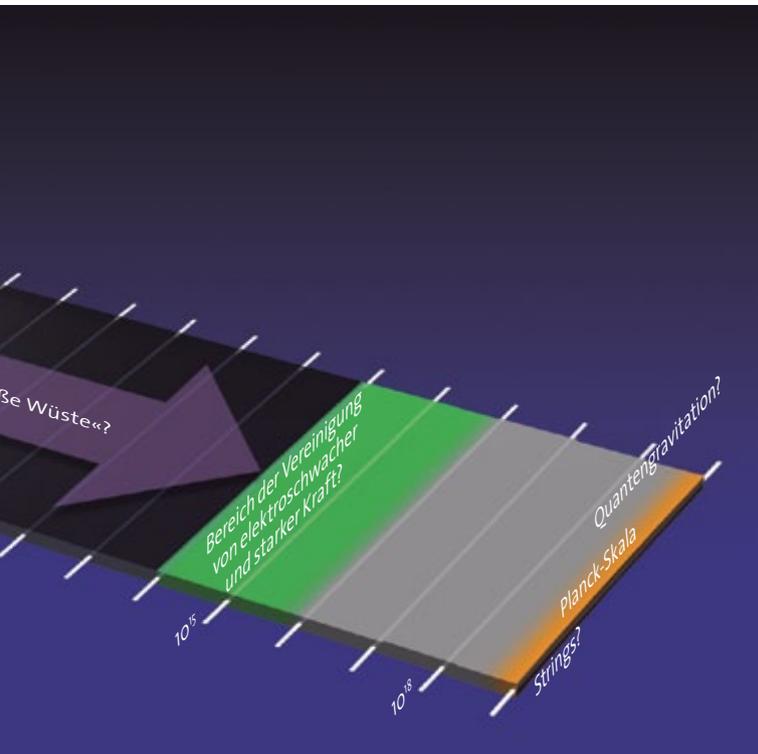
umphiert damit erneut. Aber es gelang, die Ausschlussgrenzen auszuweiten. Man weiß also: Unterhalb einer bestimmten Energie beziehungsweise Masse ist mit keinen neuen Effekten mehr zu rechnen. In fast allen Zerfallskanälen liegen diese Grenzen schon bei über einem Teraelektronvolt, zum Teil sogar erheblich darüber.

*Das klingt nach einer schlechten Nachricht.*

**BETHKE:** Das ist keine schlechte, aber eine enttäuschende Nachricht. Wir hofften eben, die Natur hätte uns in diesem Massebereich ein bisschen mehr Aufregendes zu bieten. Nun müssen wir bei höheren Energien weitersuchen. Derzeit läuft der LHC ja erst auf halber Energie. Ab 2014 gehen wir dann höher bis zur vollen Energie von 14 Teraelektronvolt. Und selbst danach können wir das Energiefenster noch weiter nach oben öffnen.

*Wie soll das gehen?*

**BETHKE:** Indem wir die Luminosität erhöhen. Dieser Begriff hängt eng mit der Strahlintensität zusammen und ist ein Maß für die Zahl der Protonenkollisionen, die im LHC-Tunnel pro Sekunde stattfinden. Je höher die Luminosität, desto mehr Daten bekommen wir also. Höhere Energie können wir teilweise durch höhere Strahlintensität ersetzen. Im LHC kollidieren in Wirklichkeit ja nicht Protonen, sondern die Quarks und Gluonen, aus denen sie sich zusammensetzen. Die drei Quarks jedes Protons besitzen jeweils nur etwa ein Drittel von dessen Energie. Kollidieren zwei Quarks miteinander, liegt die Energie der Kollision folglich bei nur etwa einem Neuntel des Maximalwerts. Doch das ist nur ein Mittelwert, denn die Quarks und Gluonen wechselwirken ständig miteinander, und dabei kann es schon einmal passie-



fangreiche Spezialsoftware auf heutigen Rechnern nicht mehr zum Laufen gebracht werden konnte oder niemand mehr ihre Funktionsweise verstand. Manchmal waren sie derart trickreich auf möglichst geringen Speicherplatzbedarf getrimmt worden, dass sie sich kaum rekonstruieren ließen. In wieder anderen Fällen waren die Magnetbänder nach einiger Zeit physisch zerstört worden – geschreddert –, weil man den Platz in den Archiven für Nachfolgeprojekte benötigte.

Ein wichtiger Datensatz beispielsweise, eine Luminositätstabelle, die zur Kalibrierung der PETRA-Messungen diente, schien unrettbar verloren. Doch dann holte ein ehemaliger DESY-Kollege Bethkes, als er sein Büro aufräumte, »meterweise altes Traktorpapier aus dem Schrank und fand dabei einen ASCII-Ausdruck der Tabelle, auf grünem Recyclingpapier und gerade noch lesbar«. In wochenlanger Handarbeit brachte Bethkes Sekretärin die Daten schließlich wieder in ein digitales Format.

**Solche Anstrengungen lohnen sich.** »Bei niedrigen Energien ver sagt die Theorie, weil die starke Wechselwirkung so extrem anwächst. Man ist daher auf experimentelle Daten angewiesen.« Diese Energieabhängigkeit der starken Wechselwirkung ist als

asymptotische Freiheit bekannt, für ihre theoretische Formulierung 1973 erhielten David Gross, David Politzer und Frank Wilczek 2004 den Nobelpreis. Zentrale Vorhersagen dieser Theorie ließen sich jedoch lange nicht experimentell nachweisen. Die entsprechenden Analysen lieferten erst Bethke und seine Kollegen. Dank theoretischer und methodischer Fortschritte sowie schnellerer Computer erzielten sie bei der erneuten Auswertung der geretteten Rohdaten in den Jahren von 1995 bis heute viel präzisere Ergebnisse, als es einst den PETRA-Kollegen möglich war. »Auf diese Weise haben wir auch eine Menge über die Hadronisierung gelernt«, also über die fundamentale Frage, wie sich jeweils zwei oder drei Quarks zu anderen Elementarteilchen zusammenlagern.

Mit dem Problem der Datensicherung in der Hochenergiephysik befasst sich mittlerweile auch die internationale »Study Group on Data Preservation and Long Term Analysis in High Energy Physics« (DPHEP). Bethke gehört zu ihren Pionieren. Die finanziellen Mittel der Forschungsförderer würden zwar vorwiegend »für aufregende Projekte« fließen, sagt der Teilchenforscher. »Doch es ist eigentlich eine Sünde, solche wertvollen wissenschaftlichen Daten ihrem Schicksal der Vergänglichkeit zu überlassen.«

tk



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / MANFRED ZENTSCH

»Die Eigenschaften des neuen Teilchens zu untersuchen, ist ein ganzes Stück komplizierter als die reine Massenanalyse, die zu seiner Entdeckung nötig war«, betont Siegfried Bethke (rechts) im Gespräch mit »Spektrum«-Redakteur Thilo Körkel.

ren, dass ein Quark zumindest kurzfristig fast die gesamte Energie des Protons in sich vereint. Solche Ereignisse sind zwar selten, aber wenn wir die Zahl der Kollisionen erhöhen, finden sie häufiger statt und treten daher in der Statistik besser hervor.

*Mit welchen Erkenntnissen können wir bis Ende des Jahres noch rechnen?*

**BETHKE:** Die Untersuchung des neuen Teilchens findet an den LHC-Detektoren ATLAS und CMS statt. Innerhalb des 3000-köpfigen ATLAS-Teams existiert eine Higgs-Gruppe mit rund 300 Mitgliedern, die von meiner MPP-Kollegin Sandra Kortner geleitet wird. Diese Gruppe hat sich auf das neue Teilchensignal gestürzt und untersucht seine Eigenschaften. Dies sind in erster Linie die schon angesprochenen relativen Zerfallsraten, also die Raten des Zerfalls in einen bestimmten Endzustand gemessen an der Gesamtheit der Zerfälle. Dann aber auch insbesondere der Spin. Dazu muss das Team unter anderem die Verteilung der Winkel bestimmen, unter denen die Zerfallsprodukte bei einer Kollision wegfliegen. Das ist ein ganzes Stück komplizierter als die reine Massenanalyse, die zur Entdeckung nötig war. Aber am Ende des Jahres wird man mit einiger Sicherheit sagen können, ob das Teilchen Spin 0 hat – und damit sicher ein Higgs-Boson wäre – oder vielleicht auch Spin 2, was allerdings sehr exotisch wäre. Aber letztlich lässt sich das alles nicht planen. Sind die Abweichungen von den vorhergesagten Ergebnissen groß, können wir mit wenig Daten früh eine Aussage treffen. Sind sie klein, müssen wir länger messen.

*Welche weiteren Auswertungen nimmt Ihr Team gegenwärtig vor?*

**BETHKE:** Eine der Analysegruppen in der ATLAS-Abteilung am MPP schaut sich die Physik des top-Quarks sehr genau an, im Wesentlichen die Masse, aber auch den Wirkungsquerschnitt. Das top ist das schwerste Elementarteilchen überhaupt. Es besitzt fast so viel Masse wie ein Wolframatom und taucht in sehr vielen Zerfallskanälen auf, unter anderem dort, wo nach Susy-Signalen gesucht wird. Je präziser wir seine Eigenschaften kennen, desto genauer können wir auch andere Dinge messen, unter anderem die Masse des Higgs. Eine weitere Gruppe beschäftigt sich mit Hadronen, also mit Quarks und Gluonen. Dieses Team hat einen Teil des hadro-

nischen Kalorimeters für ATLAS gebaut, das die Energie dieser Teilchen misst, und analysiert nun energiereiche Teilchenströme, die sich vom Kollisionspunkt wegbewegen – die so genannten hadronischen Jets.

*Es bleiben also weiterhin alle Augen auf den LHC gerichtet?*

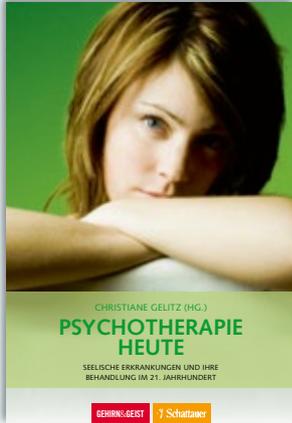
**BETHKE:** Das ist sicherlich so. Aber es gibt derzeit auch andere aufregende Entwicklungen. Das chinesische Daya-Bay-Experiment zum Beispiel hat im Frühjahr neue Werte für den dritten Mischungswinkel von Neutrinos veröffentlicht. Er ist ein Maß dafür, wie häufig Neutrinos sich von einem Typ in einen anderen verwandeln können – Physiker sprechen von Neutrino-Generationen. Er hängt mit der Verletzung der so genannten CP-Symmetrie und letztlich auch damit zusammen, warum im Universum praktisch nur Materie, aber keine Antimaterie existiert. Diese wichtige Frage können wir am LHC nicht klären, dafür brauchen wir spezielle Neutrinoexperimente.

Die Bedeutung des jüngsten Erfolgs am LHC mag für die Öffentlichkeit schwer fassbar sein. Umso mehr hat uns Teilchenphysiker das enorme öffentliche Interesse an diesen Ergebnissen und dem Projekt sehr positiv überrascht! Man sollte aber auch die unglaubliche technische und organisatorische Leistung der internationalen Forschergemeinde betonen, die allem vorangegangen ist. Allein zum ATLAS-Detektor haben rund 180 Institute unterschiedlichster Größe aus über 40 Ländern der Welt beigetragen, davon rund 15 Universitäten und Forschungsinstitute aus Deutschland, und das letztlich auf freiwilliger Basis. Es gibt zwar eine hochprofessionelle Managementstruktur mit dem so genannten »collaboration board« an der Spitze, in das jedes Institut einen Vertreter entsendet. Aber es gibt niemanden, der gegenüber den Institutsdirektoren eine Weisungsbefugnis gehabt hätte. Auch existieren praktisch keine rechtlich verbindlichen Verträge, sondern nur schriftliche Absichtserklärungen. Und schließlich verdankt sich der Erfolg einem oft zutiefst demokratischen Prozess. Als 2009 alle diese Anstrengungen darin mündeten, dass der LHC erfolgreich seinen Betrieb aufnahm, war das ein Schlüsselerlebnis für mich. ☺

Die Fragen stellte »Spektrum«-Redakteur **Thilo Körkel**.

»Unsere neue Buchreihe »Gehirn&Geist« ist das Ergebnis einer erfolgreichen Kooperation des Verlags **Spektrum der Wissenschaft** mit dem renommierten Medizin-Verlag **Schattauer**. Die ersten Bände vereinen die besten Essays aus unserem Magazin zu drei ausgewählten Forschungsgebieten und beleuchten diese aus verschiedensten Blickwinkeln.«

(Katja Gaschler, Redakteurin bei Gehirn&Geist)



Christiane Gelitz (Hg.)

## PSYCHOTHERAPIE HEUTE

Seelische Erkrankungen und ihre Behandlung im 21. Jahrhundert

2011, 200 S., 16 Abb., kart., Schattauer

Bestell-Nr. 3469 € 19,95 (D), € 20,60 (A)

ADHS bei Erwachsenen, Computerspielsucht, soziale Phobie, Borderline – Begriffe, die wie nie zuvor durch sämtliche Medien geistern. Aber was steckt dahinter? Wo sind die Grenzen zwischen Alltagsproblemen und ernsten psychischen Störungen? Und welche innovativen Therapieansätze gibt es dafür?

In wissenschaftlich fundierten und zugleich verständlichen Beiträgen stellen Psychologen, Psychiater, Psychotherapeuten und Medizinjournalisten das Spektrum der wichtigsten psychischen Störungen sowie erfolgreiche Therapieansätze vor.

*Psychotherapie Heute* verschafft einen ebenso instruktiven wie spannenden Überblick über neue Störungsbilder und die Fortschritte der Therapieforschung. Dieser ist nicht nur für Mediziner und Therapeuten von Bedeutung, sondern auch für alle an Psychotherapie und den Neurowissenschaften Interessierten.



Andreas Jahn (Hg.)

## WIE DAS DENKEN ERWACHT

Die Evolution des menschlichen Geistes

2011, 160 S., 20 Abb., kart., Schattauer

Bestell-Nr. 3470 € 19,95 (D), € 20,60 (A)

Wie entstanden unser Denken und unsere Sprache? Wie intelligent sind wir wirklich? Was empfinden wir als attraktiv?

Über alle Fachgebiete hinweg belegen renommierte Verhaltensforscher, Genetiker, Psychologen, Philosophen und Biologen, dass unser Denken und Verhalten auf unserem biologischen Erbe beruhen: Der Mensch ist ein Kind der Evolution. Erfahren Sie, wie und wieso wir wurden, was wir heute sind.

*Wie das Denken erwachte* empfiehlt sich allen Leserinnen und Lesern, die mehr über Neurowissenschaften und Evolution erfahren möchten. Das Buch ist gleichzeitig eine Fundgrube für Psychologen und Naturwissenschaftler.



Katja Gaschler, Anna Buchheim (Hg.)

## KINDER BRAUCHEN NÄHE

Sichere Bindungen aufbauen und erhalten

2011, 160 S. m. 27 Abb., kart., Schattauer

Bestell-Nr. 3468 € 19,95 (D), € 20,60 (A)

Dieses Buch ist kein Erziehungsratgeber im üblichen Sinn. Vielmehr präsentiert es wichtige Ergebnisse der Bindungsforschung und leitet daraus ab, wie sich eine vertrauensvolle Beziehung zu Kindern aufbauen lässt. Denn eine sichere Bindung ist nicht nur entscheidend für eine gelingende Erziehung. Sie fördert auch nachweislich die seelische Gesundheit und den sozialen Erfolg im späteren Leben.

Vor diesem Hintergrund bietet *Kinder brauchen Nähe* profunde Einblicke in Themen wie kindliche Schlafprobleme, Schreibabys, Trotzverhalten und Scheidungskinder. Pädagogen, Psychologen und Psychotherapeuten zeigen in forschungsbasierten und zugleich unterhaltsamen Beiträgen, wie prägend die Qualität der Bindungen eines Kindes für seine Entwicklung ist.

**Portofreie Lieferung nach Deutschland und Österreich**

**Besuchen Sie uns im Internet unter: [www.science-shop.de](http://www.science-shop.de)**

**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

SOZIOLOGIE

# Vielfalt der Familie: Problem, Herausforderung, Chance

In den letzten Jahrzehnten haben sich neue Familienformen etabliert. Sozial- und Familienpolitiker orientieren sich aber nach wie vor an der traditionellen Institution der Ehe. Doch wegen der in Kindheit und Alter anfallenden Betreuungsaufgaben müssen sie dringend umdenken.

Von Klaus Haberkern

Zwei Frauen lieben einander und entscheiden sich für ein gemeinsames Leben, wollen dabei aber auf Mutterschaft nicht verzichten. Dank der Möglichkeit, eine Lebenspartnerschaft eintragen zu lassen, anonymisierten Samenbanken und In-vitro-Fertilisation sind das heutzutage in der Bundesrepublik durchaus erfüllbare Wünsche. Die Kinder wachsen dann unter der Obhut der gleichgeschlechtlichen Eltern als Geschwister auf, ohne biologisch miteinander verwandt zu sein. Ihre beste Freundin hingegen lebt in einer traditionellen Kleinfamilie, in der die leiblichen Eltern verheiratet sind und einen gemeinsamen Haushalt führen. Ein anderer Spielkamerad wiederum kommt aus einer Patchworkfamilie oder ist von einem kinderlosen Paar adoptiert worden.

Schon jetzt erscheint unsere soziale Welt vielfältig, mit Stief-, Patchwork- oder Ein-Eltern-Familien als Varianten des traditionellen Modells. Gesetzgeber und soziale Einrichtungen wie Krankenkassen und Versicherungen stellen sie jedoch vor erhebliche Probleme, denn diese orientieren sich noch weitgehend an der althergebrachten Form des Zusammenlebens. Um beim obigen Beispiel zu bleiben: Wenn eine der homosexuellen Mütter eines fernen Tages stirbt, wie sind dann die Pflege im Alter, Erbschaft und Unterstützung zwischen der Witwe und der nichtleiblichen Tochter geregelt?

Familie war bis ins 20. Jahrhundert unhinterfragt die mit der Heirat beschlossene Gemeinschaft zwischen Mann und Frau und den darin geborenen Kindern. Rechtlich wurde nur sie geschützt. Andere Lebensformen waren selten akzeptiert, mitunter gesetzlich verboten und sozial geächtet. Homosexualität etwa war hier zu Lande bis in die 1970er Jahre strafbar. Die Möglichkeit einer eingetragenen Lebenspartnerschaft als rechtliches Äquivalent zu der heterosexuellen Ehe wurde am 1. August 2001 in Deutschland rechtskräftig. Laut einem Mikrozensus von 2010 hatten immerhin 19 000 Paare dieses Angebot genutzt. Heute kaum noch vorstellbar ist, dass man noch vor wenigen Jahrzehnten Müttern unehelich Geborener die Befähigung absprach, ein Kind überhaupt erziehen zu können. Es wurde unter Vormundschaft gestellt und hatte überdies hinsichtlich Unterhalt und Erbschaft gegenüber ehelichen Geschwistern das Nachsehen. Heutzutage scheinen Ehe und Elternschaft geradezu entkoppelt voneinander: Während vor 20 Jahren nur jedes siebte Kind unehelich geboren wurde, gilt das heute für jedes dritte, in den neuen Bundesländern sogar für zwei von drei Kindern.

## AUF EINEN BLICK

### AUSLAUFMODELL FAMILIE?

- 1 Die klassische Familie aus Ehemann und Ehefrau, Kindern und Großeltern wird zunehmend durch andere **Gemeinschaftsformen** ergänzt und ersetzt, in denen die verwandtschaftlichen Bindungen weniger klar sind.
- 2 Wenn Geschiedene wieder heiraten oder Homosexuelle eine **Lebenspartnerschaft** eingehen, geraten die an der klassischen Familienform orientierten Gesetze über die Rechte und Pflichten zur Betreuung von Kindern und Älteren in eine Schieflage.
- 3 Neue Formen des Zusammenlebens halten die Familie als Basis der Gesellschaft lebendig. Sie müssen aber auch seitens der **Sozial- und Familiengesetzgebung** gefördert werden, um beispielsweise die Herausforderungen der Berufswelt zu meistern.



GROSSFAMILIE 1918. AIG-IMAGES, MUTTER MIT TOCHTERN. ISTOCKPHOTO / COLOR OF TIME

Diese Entwicklung wurzelt im Umfeld der 1968er-Bewegung. Damals argumentierten Sozialwissenschaftler und Intellektuelle, die ganz und gar auf den Vater als Patriarch zugeschnittene Ehe bringe keine aufgeklärten Bürger hervor, sondern unmündige Untertanen. Viel zu vieles und nicht nur Gutes spiele sich zudem unter dem Schutz des Privaten ab. Solche Fundamentalkritik förderte die Liberalisierung der Gesetze, was die Rechtslage alternativer Formen des Zusammenlebens verbesserte – und damit deren Verbreitung förderte. Als beispielsweise mit einer Scheidung nicht mehr nur das Risiko verbunden war, auf Grund eines Schuldspruchs das Sorgerecht für die gemeinsamen Kinder zu verlieren und erhebliche finanzielle Einbußen in Kauf nehmen zu müssen, konnte sich der Fokus der Partner von einer Zweck- und Solidargemeinschaft immer mehr auf die Qualität ihrer Beziehung verlagern. Heute bedeutet Scheidung nicht mehr nur Risiko, sondern auch eine Chance zu mehr Familienglück in einer anderen Konstellation. Die ökonomische Sicherheit der Ehe wurde gegen mehr Freiheiten, freilich auch gegen mehr Eigenverantwortung in der Lebensführung eingetauscht.

### Jede zweite Ehe wird geschieden

Ob das ein guter oder ein schlechter Handel ist, darüber gehen die Meinungen auseinander. Aus einer christlich-konservativen Perspektive gilt die Entwicklung als Entwertung der klassischen Familie. Weil diese aber als Fundament des Gemeinwesens gesehen wird, als der Ort, an dem Solidarität, Verlässlichkeit, Gerechtigkeit, Anstand und Disziplin vermittelt werden, bedeute eine Erosion des Modells Ehe eine ernsthafte Gefahr für die Gesellschaft.

**Die Wirklichkeit von einst mutet heute nostalgisch an: Die Großfamilie ist anderen, unsichereren Formen wie der Ein-Eltern-Familie gewichen.**

Zu einem Verfall von Moral und Anstand im prophezeiten Umfang kam es zwar nicht, doch die Institution Familie ist brüchiger geworden: Jede zweite Ehe wird inzwischen geschieden; laut dem Bundesministerium für Familie, Senioren, Frauen und Jugend wächst fast jedes zweite Kind zeitweise mit nur einem Elternteil auf, fast immer bei der Mutter. Damit erlebt ein Großteil der Heranwachsenden Familie als temporären Zustand. Sie lernen früh, dass die vermeintlich enge Solidargemeinschaft aufgelöst und mitunter durch eine neue ersetzt werden kann. Gemäß Michaela Schier vom Deutschen Jugendinstitut in München verliert etwa jedes fünfte Kind den Kontakt zum nun abwesenden Elternteil. Eine prägende Erfahrung, wie die Soziologin Sonja Schulz von der Universität Mannheim 2009 zeigte: Wer aus Scheidungsfamilien stammt, lässt sich mit größerer Wahrscheinlichkeit eines Tages selbst scheiden – und transportiert den Trend weiter.

Einer Studie des Staatsinstituts für Familienforschung an der Universität Bamberg zufolge lebt bereits jedes vierte Kind mit nur einem Elternteil oder in einer Stieffamilie (siehe Tabelle S. 70). Letztere ist dabei immer auch eine neue Familie, oder wie Soziologen es nennen: eine Fortsetzungsfamilie, die gleichzeitig für das Scheitern und Festhalten am traditionellen Modell steht. Häufig müssen sich Kinder nicht nur an Stiefvater oder -mutter gewöhnen, sondern auch an neue

Geschwister; man spricht von Patchworkfamilien. Auch der nun nicht mehr dazugehörige Elternteil geht vielleicht eine neue Partnerschaft mit oder ohne Kinder ein. Trennungskinder machen deshalb häufig Erfahrungen mit zwei Stieffamilien. Für den Gesetzgeber stellen solche Konstellationen eine Herausforderung dar. Wer gehört noch dazu, wer ist wem gegenüber verantwortlich? Wer soll Zugang zu staatlichen Leistungen wie Erziehungszeit oder -geld haben?

Doch nicht nur die Familienstrukturen, auch die alltägliche Lebensführung in Familien hat sich verändert. In der Nachkriegszeit war die Familie in der BRD von einer strikten Arbeitsteilung geprägt. Während die Männer erwerbstätig und für das Familieneinkommen verantwortlich waren,

übernahmen Frauen die Erziehung der Kinder und die Pflege der älteren Angehörigen. Der amerikanische Ökonom Gary Becker vergleicht die arbeitsteilige Familie mit einer effizienten kleinen Fabrik. Doch rund läuft sie nur, wenn die Ehe stabil bleibt. Bei einer Trennung droht nicht oder nur gering berufstätigen Frauen die Armut.

### Ungewisse Zukunft der Kinderbetreuung

Mit den Scheidungsraten wuchs deshalb auch der Anteil erwerbstätiger Frauen. Übt 1970 nicht einmal jede zweite im Alter zwischen 25 und 54 Jahren einen Beruf aus, sind es heute acht von zehn Frauen. Indem die so gewonnene finanzielle Unabhängigkeit die mit einer möglichen Trennung verbundenen Risiken reduziert, fördert sie andererseits auch die Bereitschaft, über Alternativen zu einer unglücklichen Ehe beziehungsweise Lebenspartnerschaft nachzudenken.

In einer Studie im Auftrag der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) fragten meine Kollegen und ich nach Konsequenzen dieser Entwicklung. Dabei interessierten uns zwei Aspekte: Wie wird im Jahr 2030 die Betreuung von Kindern, wie die Versorgung älterer Menschen organisiert sein? Gibt es steuernde Maßnahmen, die wir jetzt schon ergreifen müssen, um Fehlentwicklungen vorzubeugen? Demografische Trends wie die Altersstruktur lassen sich für die nächsten 20 Jahre mit großer Genauigkeit vorhersagen, soziale Entwicklungen hingegen nur schwer. Wir haben daher verschiedene Szenarien entworfen, wobei wir insbesondere zwischen einer stabilen und einer instabilen wirtschaftlichen Entwicklung und zwischen einer schnellen und einer langsamen Adaption von neuen Technologien unterschieden. Deutschland ist in diesem Zusammenhang ein Land mit einer eher moderaten, aber tendenziell stabilen wirtschaftlichen Entwicklung und einer zögerlichen Aufnahme technologischer Innovationen.

Von den heute 45-Jährigen – den zukünftigen Alten – wurden hier zu Lande bereits zwei- bis dreimal so viele geschieden wie von den heute über 70-Jährigen (siehe Grafiken rechts). Der Trend dürfte sich fortsetzen, so dass Solidarität unter Verwandten in naher Zukunft nicht mehr zwingend vorausgesetzt werden kann. Davon wird in der Pflegeversicherung jedoch noch ausgegangen. Diese ist explizit als Ergänzung zur familialen Pflege und als Teilkaskoversicherung konzipiert. Tatsächlich wurden 2004 noch mehr als 80 Prozent der Pflegeempfänger zu Hause von Partnern oder Kindern versorgt. Meist erbringen Frauen die Betreuungsleistungen in der Familie, doch deren wachsende Erwerbsbeteiligung sowie die Erhöhung des gesetzlichen Rentenalters sorgen zusätzlich dafür, dass die Kleinfamilie als Hauptsäule der Pflege immer stärker wegbricht. Auch dass Frauen die Kinder erziehen und betreuen, ist nicht mehr in vollem Umfang gewährleistet. Bislang greift hier oft die Unterstützung durch die Großeltern. Laut der Züricher Soziologin Corinne Igel betreut etwa jede/r vierte von ihnen mindestens einmal pro Woche Enkelkinder. Aber die Erosion der klassischen Kleinfamilie stellt auch dieses Modell in Frage.

## Familienformen in Deutschland

**Nach wie vor ist die klassische** Kleinfamilie die häufigste Form des Zusammenlebens hier zu Lande. Doch der Anteil Alleinerziehender und der von Stieffamilien wächst.

<b>Normalfamilie</b> (biologische Eltern mit Kind), dabei gleichzeitig verheiratet	71,5 % 65,4 %
<b>Alleinerziehende</b>	14,8 %
<b>einfache Stieffamilie</b> (ein Elternteil mit Kind aus vorheriger Beziehung)	9,1 %
<b>komplexe Stieffamilie beziehungsweise Patchworkfamilie</b> (Paar mit Kindern aus mindestens zwei Beziehungen)	4,5 %
<b>Regenbogenfamilie</b> (gleichgeschlechtliche Partnerschaft mit Kind aus vorheriger, meist heterosexueller Beziehung oder aus aktueller Beziehung mit Hilfe von künstlicher Befruchtung, Samenspendern, Leihmüttern oder Adoption)	etwa 0,05 %

(Zahlenangaben in Prozent der Familienhaushalte mit Kindern unter 18 Jahren)

QUELLEN: STATISTISCHES BUNDESAMT, BEVÖLKERUNG UND ERWERBSTÄTIGKEIT, HAUSHALTE UND FAMILIEN, ERGEBNISSE DES MARZENSUS IN FACHBEREICH REIHE, WIESBADEN 2011 UND STEINBACH, A.: STIEFFAMILIEN IN DEUTSCHLAND, IN: ZEITSCHRIFT FÜR BEVÖLKERUNGSWISSENSCHAFT, 33, S. 153–180, 2008



Die Hippiebewegung der 1960er Jahre stellte bürgerliche Werte in Frage, praktizierte die freie, außereheliche Liebe und suchte alternative Formen des Zusammenlebens.

Bis 1969 war Homosexualität in Deutschland grundsätzlich strafbar. Seit 2001 besteht die Möglichkeit, eine Lebenspartnerschaft eintragen zu lassen und damit einen rechtlichen Status zu erhalten, der einer konventionellen Ehe weit gehend gleichgestellt ist. Das ermöglicht Männern auch, ein Kind zu adoptieren.

Diese Probleme sind inzwischen bekannt. Bislang verfolgen Sozial- und Familienpolitiker zwei Lösungsansätze dazu. Erstens lagern professionelle Angebote wie Kindertagesstätten und ambulante Pflege die Betreuung von Kindern oder Alten ganz oder teilweise aus der Familie aus. Diesen Weg der Entlastung von Angehörigen gehen vor allem Dänemark und Schweden schon seit Jahrzehnten. Er ist allerdings so kostspielig, dass Schwedens kommunale Verwaltungen den Zugang zu solchen Angeboten seit ein paar Jahren auf Personen einschränkt, die einen hohen Pflegebedarf haben oder sich nicht auf ein familiäres Netzwerk stützen können. Mit anderen Worten: Die Angehörigen werden wieder in die Pflicht genommen, die Betreuung wird »refamiliarisiert«.

Der zweite Lösungsansatz sieht vor, Familien so zu unterstützen, dass sich ein Mitglied den Betreuungsaufgaben widmen kann. So erlauben der Bezug von Elterngeld und eine Arbeitsplatzgarantie, für den Nachwuchs eine Auszeit vom Beruf zu nehmen. Deutlich schlechter sind Arbeitnehmer gestellt, die sich vorübergehend freistellen lassen, um beispielsweise behinderte oder demenzkranke Angehörige zu versorgen: Die Zeit ist auf ein halbes Jahr begrenzt, das Pflegegeld beträgt maximal 700, das Elterngeld hingegen maximal 1800 Euro. Die Unterstützung des Staats für junge Familien ist also umfassender als die für pflegebedürftige ältere Menschen und ihre Angehörigen. Hier besteht offenkundig Handlungsbedarf, denn der Anteil der Familien mit Kindern

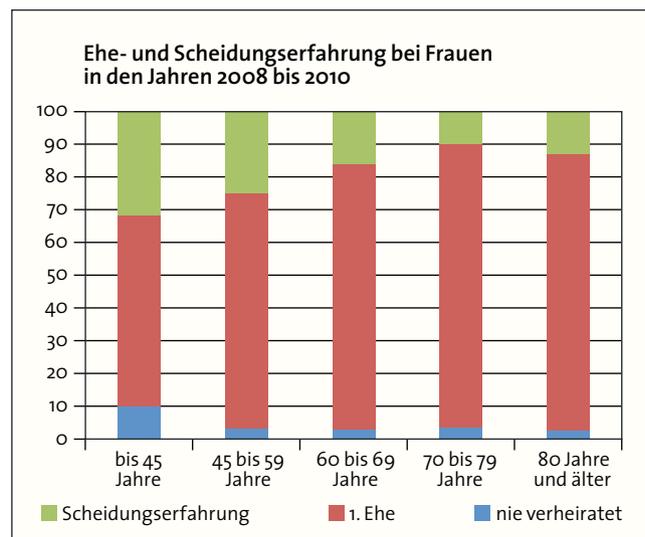
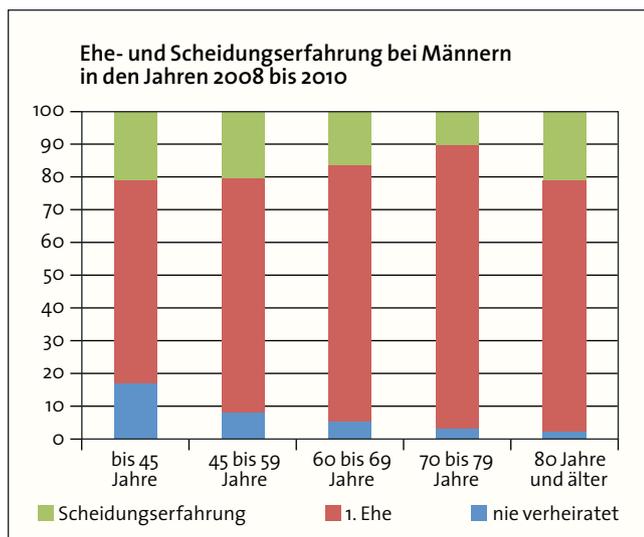
**Seit eine Scheidung gesellschaftlich akzeptiert ist, wächst die Bereitschaft, die Qualität einer Ehe zu hinterfragen und gegebenenfalls neue Partner zu suchen.**



schrumpft, während immer mehr Personen ein hohes Alter erreichen und somit der Anteil Pflegebedürftiger an der Bevölkerung wächst.

Beide Lösungsansätze richten sich überdies vorwiegend an die klassische Kleinfamilie, die entlastet oder unterstützt werden soll. Denn die enge gesetzliche Definition von Familie fokussiert die möglichen Leistungsempfänger vor allem auf nahe Angehörige der zu Betreuenden. Versorgen beispielsweise die Großeltern ihre Enkel, weil weder Vater noch Mutter eine Auszeit nehmen wollen oder können, verfällt der Anspruch auf Elterngeld, die »Dienstleistung« erfolgt unentgeltlich. Gelder aus der Pflegeversicherung dürfen zwar flexibel verwendet werden und stünden auch einem Freund des Bedürftigen zur Verfügung. Doch die geringe Honorierung und die zeitliche Begrenzung animieren kaum dazu, eine Erwerbstätigkeit ganz oder teilweise aufzugeben.

In unserer Studie zur Zukunft der Familie bis 2030 konstatieren wir dementsprechend eine wachsende Kluft zwischen der Sozial- und Familienpolitik einerseits und den Familienbiografien und individuellen Lebensarrangements andererseits. Während der Gesetzgeber nächste Angehörige in die Pflicht nimmt, wenn es um die Kinder- oder Altenbetreuung



QUELLE: FRICK, J.R. ET AL.: FAMILIENBIOGRAFISCHE VERLÄUFE IM KOHORTENVERGLEICH. IN: SOCIO-ECONOMIC PANEL (SOEP)-PAPERS 439, 2012 UND SURVEY OF HEALTH, AGEING AND RETIREMENT IN EUROPE (SHARE)

Das Verschwinden der Großfamilie und die aktuelle Erosion der Kleinfamilie reißen Löcher in das soziale Netz. Mehrgenerationenwohnprojekte wie das »Ökodorf Sieben Linden« in Sachsen-Anhalt könnten eine Antwort darauf sein. Die Bereitschaft zur Solidarität, auch zur Betreuung von Kindern und Senioren, wird von allen erwartet (ganz rechts: eine gemeinsam gefeierte Hochzeit).

geht, bedeutet enge Verwandtschaft längst nicht mehr automatisch emotionale Nähe und Solidarität zwischen diesen Menschen. Andererseits erhalten viele Personen, die umfassende Betreuungsaufgaben übernehmen, keine sozialstaatlichen Leistungen. Das betrifft insbesondere Stieffamilien, deren Mitglieder aus mehreren Fortsetzungsfamilien stammen, sowie Regenbogenfamilien, in denen die Erziehungsrechte oft nur bei einem Elternteil liegen. Dass Freundschaften heutzutage länger halten können als Familienbände, nimmt der Gesetzgeber kaum zur Kenntnis. In der Konsequenz wird also ein Familienmodell gegenüber anderen bevorzugt und damit die Wahlfreiheit zwischen verschiedenen Arrangements eingeschränkt. Zudem bleiben erhebliche Solidaritäts- und Unterstützungspotenziale in der Gesellschaft mangels Förderung schlicht ungenutzt.

Mit Blick auf die Zukunft gilt es, den Fokus auf die Familie als alleinige Solidargemeinschaft zu hinterfragen. Insbesondere Kleinfamilien haben nur eingeschränkte Möglichkeiten, um den Anforderungen der heutigen Arbeits- und Familienwelt gerecht zu werden. Kinder großzuziehen und womöglich gleichzeitig einen Elternteil zu pflegen, dürfte die meisten überfordern, schränkt oft die Erwerbstätigkeit ein – und belastet zusätzlich das Familienleben.

### Gemeinsamkeit macht flexibel

Ein viel versprechender Lösungsansatz besteht darin, die Solidargemeinschaft in einer größeren Gruppe zu organisieren. Ein Zusammenschluss von mehreren Familien sowie von jüngeren und älteren Menschen verringert jeweils den Betreuungsaufwand und gibt gleichzeitig die Möglichkeit, auf berufliche Anforderungen flexibler zu reagieren, etwa kurzfristig angesetzte Dienstreisen oder Meetings durch Betreuungsleistung aus dem direkten Umfeld aufzufangen.

Vor allem in den skandinavischen Ländern, den Niederlanden und den USA erleben solche generationen- und familienübergreifenden Wohnformen wieder eine Renaissance. Beim so genannten »Cohousing« etwa schließen sich bis zu 40 Familien zusammen, die Wert auf Gemeinschaft und wechselseitige Unterstützung legen, ohne ihre Privatsphäre aufzugeben. Sie bewohnen benachbarte Häuser, vielleicht sogar eine neu gegründete Siedlung am Stadtrand. Dank der »kritischen Masse« ist beispielsweise eine selbst organisierte Einrichtung zur Kinderbetreuung machbar. Erst langsam zeigt sich ein Trend zu gemeinschaftlichen Wohnformen auch in Deutschland, wo laut dem »Nationalatlas« des Leibniz-Instituts für Länderkunde 2011 etwa 500 Projekte liefen: von den »Kleehäusern« – zwei Mehrfamilienhäuser mit



24 Mietparteien in Freiburg – bis hin zur Siedlungsgenossenschaft »Ökodorf Sieben Linden« bei Beetzendorf in Sachsen-Anhalt mit derzeit 120 Bewohnern (siehe Bilder oben).

Dergleichen weist den Weg in die Zukunft, denn es bietet das, was Familien immer weniger leisten können: ein über den gesamten Lebenslauf bestehendes und belastbares Unterstützungsnetzwerk. Besonders bedeutsam ist auch, dass Alleinstehende integriert werden können. Unterstützungsnetzwerke setzen jedoch kein gemeinschaftliches Wohnen voraus – das zeigen die knapp 500 seit 2006 in Deutschland vom Bund geförderten »Mehrgenerationenhäuser«-Begegnungsstätten. Dort können Alt und Jung Erfahrungen austauschen und sich bei Alltagsproblemen gegenseitig helfen.

Auch wenn solche Lösungen deutlich günstiger als professionelle Arrangements wie Kitas oder Altenbetreuungs-einrichtungen sind, gratis sind sie nicht. Unterstützungsnetzwerke benötigen eine Infrastruktur, also Räumlichkeiten sowie technische Lösungen für Organisation und Pflege des Netzwerks. Zudem ist eine regelmäßige professionelle Beratung sinnvoll.

Freilich vermögen Personen ohne entsprechende Ausbildung anspruchsvolle Betreuungsaufgaben nur bis zu gewissen Grenzen auszuüben. Senioren mit fortgeschrittener Demenz, Personen mit schwerster Behinderung oder Kinder mit ausgeprägt aggressivem Verhalten zu versorgen, überschreitet diesen Rahmen.

Eine weitere Möglichkeit, die Belastungen zu schultern, die sich im Zusammenleben ergeben können, bieten neue Technologien. Die kontinuierliche Überwachung medizinischer Parameter wie Blutdruck oder Pulsschlag bei älteren Menschen gibt ihnen Sicherheit und entlastet Angehörige – gegebenenfalls alarmiert das Monitoringsystem einen Arzt oder den Pflegeservice. Kritisch sehen manche die Bestre-



© DOKORF SIEBEN LINDEN / NICOLETTA GIEBERSBACH

bungen, Roboter für die Reinigung von Räumen, für die Nahrungszubereitung, ja sogar als Unterstützung beim Aufstehen, Gehen und Waschen der Patienten einzusetzen. Ein leistungsfähiger Pflegeroboter schlägt heute noch mit mehreren zehntausend Euro zu Buche, doch dürften sich die Kosten mit der weiteren technischen Entwicklung deutlich verringern. Besteht dann nicht aber die Gefahr, dass Maschinen den Menschen ersetzen und ihren Arbeitsplatz gefährden? Diese Angst ist unbegründet. Denn zum einen sind Pflegekräfte heute auch mit anderen Aufgaben wie dem Führen von Pflegeprotokollen beschäftigt, was die Zeit begrenzt, die sie Patienten widmen können. Zum anderen gibt es bereits ohnehin zu wenige ausgebildete Kräfte. Daher ist es geradezu wünschenswert, mit Hilfe von neuen Technologien Arbeitsabläufe effizienter zu gestalten und das Personal von Routinen zu entlasten. Das kommt aber den Patienten zugute, denn es bleibt mehr Raum für Gespräche und andere Formen der Zwischenmenschlichkeit.

Welche Familien- und Solidaritätsformen sich in Zukunft etablieren können, hängt letztlich von den gesetzlichen Rahmenbedingungen ab, die immer weniger der gelebten Realität entsprechen. Die Frage »Wer gehört zur Familie?« lässt sich oft nicht mehr ohne Weiteres beantworten. Daher sollten die nach klassischem Verständnis direkten Angehörigen sehr viel weniger in die Pflicht genommen werden – sofern es sie überhaupt gibt. Zudem gilt es, den Zugang zu Sozialleistungen individueller und unabhängiger von einem gesetzlich definierten Familienmodell zu gewähren. Das bedeutet auch, dass die Betroffenen das Recht haben müssen, die obige Frage selbst zu beantworten. Beantragen leibliche Eltern keine Auszeit, sollten sie ihren Anspruch an Dritte wie Großeltern oder Vertraute weitergeben dürfen, die sich dann um die Kinder kümmern. All diese Maßnahmen helfen mit,

soziale Sicherheit und Lebensarrangement voneinander zu entkoppeln. Gleichzeitig entsteht ein Freiraum, in dem sich verschiedenste Familien- und Lebensformen zum Wohle aller entwickeln können. Der Preis, den wir dafür zahlen: mehr Eigenverantwortung. ~

#### DER AUTOR



**Klaus Haberkern** promovierte 2008 in Soziologie. Er ist Oberassistent am Soziologischen Institut der Universität Zürich und forscht zu den Themen Familie und Pflege im internationalen Vergleich.

#### QUELLEN

- Beier, L. et al.:** Familyplatform. Existential Field 1: Family Structures & Family Forms in the European Union – An Overview of Major Trends and Developments. Working Report, 2010. Zu beziehen unter: [www.familyplatform.eu/en/doc/g6/EF1\\_Family\\_Structures%26Family\\_Forms.pdf](http://www.familyplatform.eu/en/doc/g6/EF1_Family_Structures%26Family_Forms.pdf)
- Haberkern, K. et al.:** The Role of the Elderly as Providers and Recipients of Care. In: OECD 2012: The Future of Families to 2030. OECD Publishing, Paris 2012. DOI: 10.1787/9789264168367-6-en
- Igel, C.:** Großeltern in Europa. Generationensolidarität im Wohlfahrtsstaat. VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden, 2. Auflage 2011
- Schulz, S.:** Intergenerationale Scheidungstransmission und Aufwachsen in Stieffamilien. Gibt es den Transmissioneffekt auch bei Stiefkindern? In: Zeitschrift für Familienforschung 1/2009, S. 5–29

#### WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1159810](http://www.spektrum.de/artikel/1159810)

# Dreiecksbeziehungen

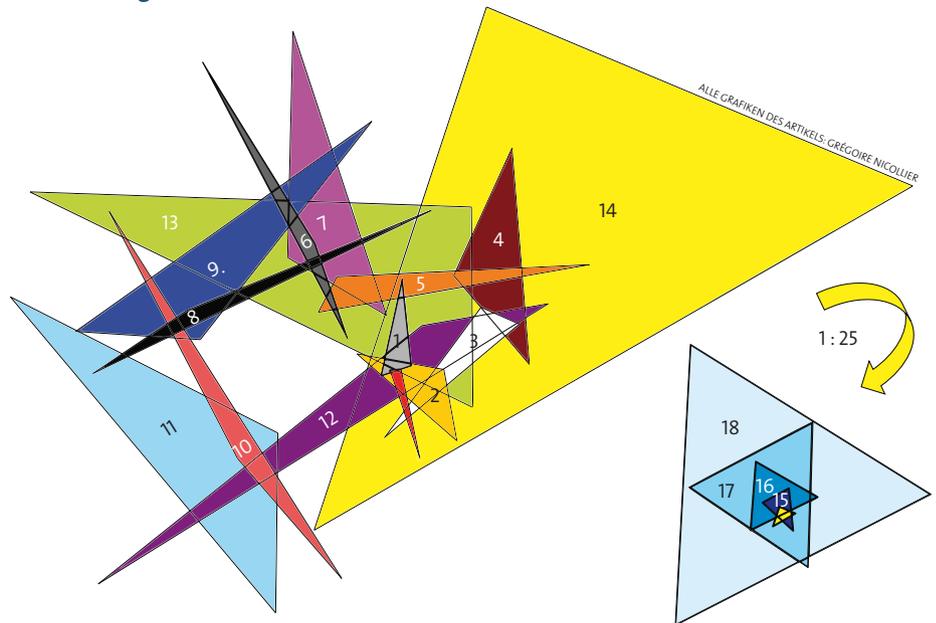
Aus einer schlichten Konstruktionsvorschrift wird ein chaotisches dynamisches System mit den überraschendsten Eigenschaften.

VON GRÉGOIRE NICOLLIER

Eigentlich ist ein Dreieck nichts weiter als eine Menge von drei Punkten in der Ebene – seinen Eckpunkten. Aber die klassische Geometrie kennt eine Fülle von Objekten, die man aus diesen drei Punkten konstruieren kann, sowie von Beziehungen dieser Objekte untereinander. Beispiele sind die speziellen Punkte aus der Schulgeometrie, in denen sich bemerkenswerterweise jeweils drei gleichartige Geraden schneiden: die Mittelsenkrechten, die Winkelhalbierenden, die Höhen und die Seitenhalbierenden.

Entsprechend viele Möglichkeiten gibt es, aus einem Dreieck ein anderes zu machen. Man kann zum Beispiel als Eckpunkte des neuen Dreiecks die Mittelpunkte der Seiten des alten nehmen. Oder die »Fußpunkte« der Winkelhalbierenden – das sind die Punkte, an denen eine Winkelhalbierende die gegenüberliegende Seite trifft. Oder die Fußpunkte der Höhen, also der Senkrechten von einem Eckpunkt auf die gegenüberliegende Seite oder deren Verlängerung.

Jede dieser Vorschriften, aus einem Dreieck ein neues zu konstruieren, ist eine Abbildung (»Funktion«) im mathematischen Sinn, und zwar von der Menge aller Dreiecke in dieselbe Menge. Auf das neue Dreieck kann man dieselbe Vorschrift wieder anwenden, auf das so entstandene Dreieck noch einmal, und so weiter – im Prinzip unendlich oft; man nennt das »die Abbildung iterieren«. Und schon gerät die biedere Zirkel-und-Lineal-Konstruktionsvorschrift in Verbindung mit einem sehr modernen Teilgebiet der Mathematik. Denn iterierte Abbildungen sind ein zentrales Thema der Theorie dynamischer Systeme, besser bekannt unter dem etwas zu



Nach 14 Schritten des Spiegelungsvorgangs ist das kleine rote Dreieck endlich spitzwinklig (gelbes Dreieck) und reist zu seiner gleichseitigen Grenzform weiter. Wie verläuft sein Weg?

eng gefassten Namen »Chaostheorie« (siehe Spektrum der Wissenschaft Spezial 1/2010, »Zufall und Chaos«).

Über die Mathematik hinaus hat diese Theorie wegen ihrer philosophischen Implikationen Aufsehen erregt. Sie weist nämlich nach, dass zwei sehr gegensätzliche Eigenschaften miteinander vereinbar sind: Determinismus und Unvorhersagbarkeit. Selbst wer den Anfangszustand eines Systems – zum Beispiel das erste Dreieck der Iterationsfolge – beliebig genau kennt, ist außer Stande, irgendwelche brauchbaren Aussagen über das Verhalten der »späten« Folgenglieder zu machen.

Natürlich suchen die Mathematiker der generellen Unvorhersagbarkeit zum Trotz nach Struktur im deterministischen Chaos – und werden tatsächlich auch fündig. Insbesondere habe ich für ein dynamisches System, das durch eine Dreiecksabbildung definiert wird,

nicht nur chaotisches Verhalten gefunden, sondern auch eine Einteilung der Menge aller möglichen Systemzustände in »ordentliche« und »anarchistische«. Dieses System möchte ich Ihnen im Folgenden vorstellen.

## Es kommt nur auf die Form an

Zuvor noch ein paar Bemerkungen über iterierte Dreiecksabbildungen im Allgemeinen. Für deren Studium erweist es sich als zweckmäßig, auf einige Eigenschaften der Dreiecke keine Rücksicht zu nehmen. So interessiert man sich nicht dafür, wo in der Ebene sie liegen und wie sie orientiert sind. Man hat also die Freiheit, sie nach Belieben zu verschieben und zu drehen oder, was auf dasselbe hinausläuft, den eigenen Betrachterstandpunkt in der Ebene entsprechend zu verändern: Es bleibt trotzdem »eigentlich« dasselbe Dreieck. Zudem soll es nicht darauf ankommen, ob

man das Dreieck aus der Nähe oder aus der Ferne anschaut; die absolute Größe spielt also keine Rolle. Im Endeffekt betrachten wir zwei Dreiecke schon dann als »gleich«, wenn sie die gleiche Form haben, das heißt durch Drehung, Spiegelung, Verschiebung und Verkleinerung oder Vergrößerung miteinander zur Deckung gebracht werden können. Für diese Art der Gleichheit (»Ähnlichkeit«) genügt es, wenn die Dreiecke die gleichen Winkel haben.

Diese Betrachtungsweise hilft, die Eigenschaften einiger Iterationsabbildungen besser herauszuarbeiten. Nimmt man als Eckpunkte des neuen Dreiecks die Seitenmittelpunkte des alten, so ist das neue (das »Seitenmittendreieck«) eine Kopie des Mutterdreiecks, mit dem Faktor  $1/2$  verkleinert und um  $180^\circ$  gedreht. Die Iterationsfolge konvergiert gegen einen Punkt: den gemeinsamen Schwerpunkt aller Dreiecke. Wenn man aber ähnliche Dreiecke als gleich ansieht, also nur die Winkel betrachtet, tut die Abbildung gar nichts. Sie bildet jedes Dreieck auf sich selbst ab.

Interessanter ist es, die Fußpunkte der Winkelhalbierenden als die neuen Eckpunkte zu nehmen. Auch hier zieht sich die Folge der echten Dreiecke auf einen Punkt zusammen (den man diesmal nicht zu berechnen weiß); wenn man aber wieder die absolute Größe und die Orientierung ausblendet, ergibt sich, dass sie gegen eine gleichseitige Form streben. Das ist alles andere als offensichtlich; erst 2006 gelang Dan Ismailescu und Jacqueline Jacobs an der Hofstra University in Hempstead (New York) der Beweis.

Diese Iterationsabbildung ebnet in der Tendenz Unterschiede zwischen

Dreiecken ein: Wendet man sie auf zwei ungleiche Dreiecke an, so unterscheiden sich deren Bilder schon weniger als die Originale, die Bilder der zweiten Iteration noch weniger und so weiter, bis alles in der vorhersagbaren Einheitsform des gleichseitigen Dreiecks endet. Das ist das genaue Gegenteil von chaotischem Verhalten.

Damit das Chaos eine Chance hat auszubrechen, muss die Iterationsabbildung vorhandene Unterschiede verschärfen – zumindest manchmal. Das trifft zum Beispiel auf die Vorschrift zu, welche die Fußpunkte der Höhen zu den Eckpunkten des neuen Dreiecks erklärt. Sie verdoppelt vorhandene Differenzen – im Wesentlichen.

Natürlich kann die Abbildung nicht einfach alle Winkel verdoppeln; denn dann hätte das Höhendreieck die doppelte Winkelsumme des Ursprungsdreiecks, aber beide Winkelsummen müssen gleich  $180^\circ$  sein. Die korrekte Aussage ist: Ein Winkel  $\alpha$  des Ursprungsdreiecks findet sich im Höhendreieck als  $2\alpha$ ,  $180^\circ - 2\alpha$  oder  $2\alpha - 180^\circ$  wieder. Nehmen wir zwei geringfügig verschiedene Ursprungsdreiecke mit den Winkeln  $\alpha_1, \beta_1, \gamma_1$  und  $\alpha_2, \beta_2, \gamma_2$ . Dann wird der Unterschied zwischen  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  immer dann verdoppelt, wenn sowohl  $\alpha_1$  als auch  $\alpha_2$  nach derselben unter den drei obigen Vorschriften transformiert werden – also meistens. Entsprechendes gilt für die anderen Winkel.

Dass daraus deterministisches Chaos entsteht, will allerdings noch eigens bewiesen werden. Ein Kennzeichen von Chaos ist die empfindliche Abhängigkeit von den Anfangsbedingungen. Auf unser System bezogen besagt das, dass aus zwei Dreiecken, die sich beliebig

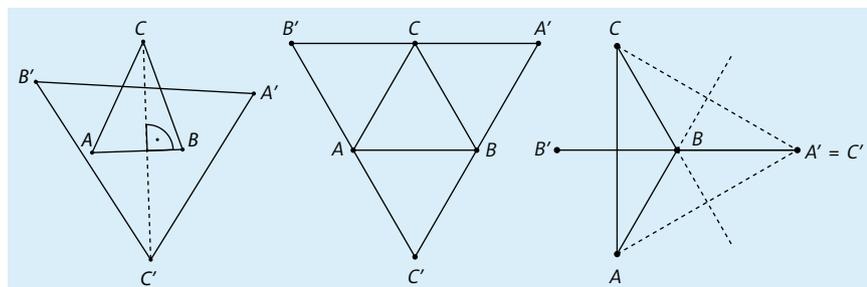
wenig unterscheiden, völlig verschiedene Folgen von Höhendreiecken hervorgehen können. Das folgt unmittelbar aus der oben beschriebenen Verdopplungseigenschaft.

Ein anderes Kennzeichen ist die Ergodizität oder auch Mischungseigenschaft: Die Dreiecke der Folge kommen im Prinzip jeder denkbaren Form beliebig nahe. Das haben 1990 – nach Vorarbeiten anderer Wissenschaftler – Peter D. Lax, Abelpreisträger von 2005 (Spektrum der Wissenschaft 6/2005, S. 21), und Peter Ungar am Courant Institute in New York nachgewiesen.

Man kann sich den abstrakten Raum aller denkbaren Systemzustände (in unserem Fall Dreiecke) wie einen großen Kochtopf vorstellen. Das dynamische System, das aus jedem Dreieck sein Höhendreieck macht, wirkt dann wie ein gigantischer Rührlöffel, der den Topfinhalt perfekt durchmischt. Auf die Dauer kommt jedes Partikel der Brühe überall hin – fast jedes, um genau zu sein. Wie bei dynamischen Systemen üblich, gibt es Ausnahmepunkte, die der Durchmischung nicht unterliegen. Aber die Menge dieser Punkte ist vom Maß null, das heißt, man findet sie praktisch nicht durch Zufall, und sie spielen für das Gesamtbild keine Rolle.

## Spiegelungsdreiecke

In diesem Artikel soll es nun um eine weitere Dreiecksfolge gehen. Und zwar spiegeln wir zu einem gegebenen Dreieck  $ABC$  jeden Eckpunkt an der ihm gegenüberliegenden Seite beziehungsweise deren Verlängerung. Wir gehen also von einem Eckpunkt nicht nur zu dessen Höhenfußpunkt, sondern noch einmal denselben Weg darüber hinaus.



So konstruiert man aus einem Mutterdreieck  $ABC$  sein Spiegelungsdreieck  $A'B'C'$  (links). Bei einem gleichseitigen Mutterdreieck ist die Tochter wieder gleichseitig (Mitte), bei einem Dreieck mit den Winkeln  $30, 30$  und  $120^\circ$  Grad ist sie zum geraden Strich entartet (rechts).

Das ergibt die Ecken des neuen Dreiecks, des »Spiegelungsdreiecks«  $A'B'C'$  (Bild S. 75, links).

Das zugehörige dynamische System ist in der Tat chaotisch. (Wieder sehen wir Dreiecke mit gleichen Winkeln als gleich an.) Seine Struktur ist noch weit- aus reichhaltiger als die des Systems mit den Höhendreiecken. Im letzten Jahr ist es mir gelungen, diese Struktur vollständig aufzuklären.

Zunächst einige Beobachtungen: Das Spiegelungsdreieck eines gleichseitigen Dreiecks ist wieder gleichseitig (Bild S. 75, Mitte). Ein Dreieck mit Winkeln von 30, 30 und 120 Grad wird unter der Iterationsabbildung zum entarteten Dreieck, dessen Seiten alle auf derselben Geraden liegen (Bild S. 75, rechts). Ein einmal entartetes Dreieck bleibt unter allen weiteren Iterationen entartet.

Einzelne Iterationsfolgen sehen schon recht chaotisch aus (Bilder S. 74 und unten). Wenn jedoch kein Winkel des Anfangsdreiecks 90 Grad übersteigt, sieht es ganz so aus, als würden die aufeinander folgenden Spiegelungsdreiecke nicht nur immer größer, sondern strebten auch einer gleichseitigen Grenzform zu (Bild S. 74).

Für die weitere Erforschung wäre es hilfreich, wenn man die Winkel des Spiegelungsdreiecks aus denen des Mutterdreiecks ausrechnen könnte. Das ist weitaus schwieriger als beim Höhendreieck. Um den Rechenauf-

wand in erträglichen Grenzen zu halten, verwendet man an Stelle der Winkel  $\alpha$ ,  $\beta$  und  $\gamma$  deren Sinuswerte. Darüber hinaus erweist es sich als zweckmäßig, die Form eines Dreiecks durch die beiden Größen

$$s = \sin^2\alpha + \sin^2\beta + \sin^2\gamma \text{ und} \\ p = \sin^2\alpha \sin^2\beta \sin^2\gamma$$

(Summe und Produkt der Quadrate der Sinuswerte) auszudrücken. Aus  $s$  und  $p$  lassen sich die Dreieckswinkel zurückgewinnen. Zwei Größen genügen, denn wenn man zwei Winkel hat, ist auch der dritte bestimmt, weil die Winkelsumme im Dreieck stets 180 Grad ist. Ein ganzes Teilgebiet der Mathematik, die Trigonometrie, stellt für den Umgang mit den Winkelfunktionen Sinus und Cosinus zahlreiche Formeln bereit. Einige trigonometrische Akrobatikeinlagen führen von  $s$  und  $p$  zu den entsprechenden Größen des Spiegelungsdreiecks:

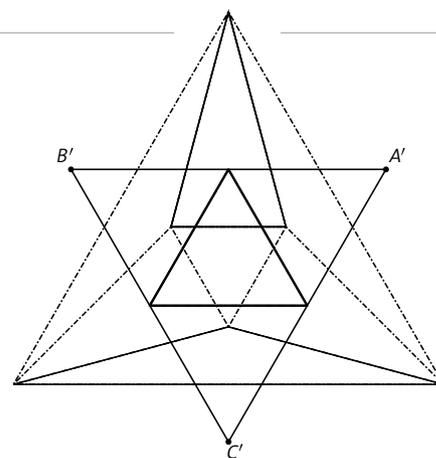
$$S = \frac{(s + 16p)(4s - 5)^2}{4s + 1 + 64p(4s - 7)}$$

und

$$P = \frac{p(4s - 5)^6}{(4s + 1 + 64p(4s - 7))^2}$$

Der niederländische Geometer, Statistiker und Jurist Jan van IJzeren (1914–1998) hat diese Formeln 1984 erstmals veröffentlicht. Seine auf Niederländisch verfasste Arbeit geriet in Vergessenheit – zum Glück für mich, sonst wäre vielleicht ein anderer mir zuvor gekommen. Erst durch das Internet kam sein Werk wieder ans Tageslicht. Van IJzerens verzwickte Formeln lassen sich zähmen und so weit ausnutzen, dass sie schlussendlich alle Geheimnisse des Problems preisgeben.

Daraus, dass gewisse trigonometrische Gleichungen nicht nur eine Lösung haben, erschließt man, dass die Iterationsabbildung nicht umkehrbar ist. Zu einem Dreieck (der »Mutter«) gibt es zwar nur ein Spiegelungsdreieck (die »Tochter«); aber eine Tochter hat fünf bis sieben Mütter, wenn sie nicht gerade zum Strich entartet ist, und genau sieben, wenn sie gleichseitig oder



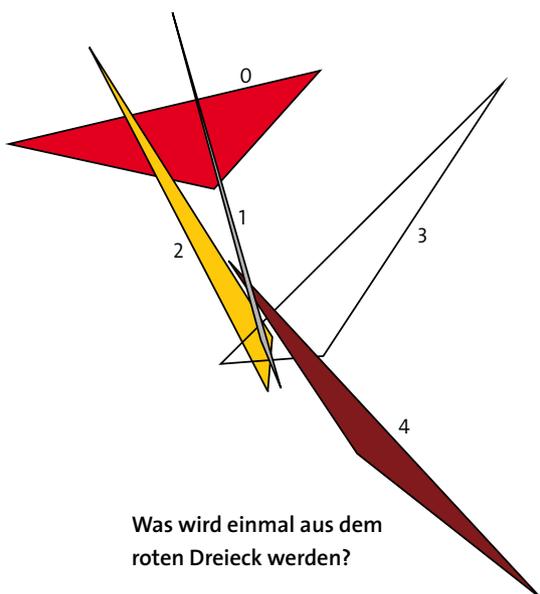
Ein gleichseitiges Spiegelungsdreieck  $A'B'C'$  mit seinen sieben Mutterdreiecken.

fast gleichseitig ist. Insbesondere kann ein gleichseitiges Dreieck entweder von einem gleichseitigen Dreieck oder drei gleichschenkligen Dreiecken mit den Winkeln 75, 75 und 30 Grad und drei gleichschenkligen Dreiecken mit den Winkeln 15, 15 und 150 Grad abstammen (Bild oben; eigentlich sollten diese jeweils drei gleichförmigen Dreiecke als ein und dasselbe gelten, aber für die Mütterzählung erweist es sich als zweckmäßig, sie als echte Dreiecke und damit als verschieden zu betrachten).

Der Eindruck aus den ersten Beobachtungen bestätigt sich: Beginnt man mit einem spitzwinkligen oder rechtwinkligen Dreieck (kein Winkel über 90 Grad), so nähern sich die sukzessiven Spiegelungsdreiecke tatsächlich der gleichseitigen Form an. Eine andere Grenzform ist daher nur möglich, wenn das Anfangsdreieck stumpfwinklig ist.

Ein entartetes Dreieck entsteht genau dann aus einem nicht entarteten, wenn dieses den  $s$ -Wert (die Summe der Quadrate der Sinuswerte seiner Winkel)  $s = 5/4$  hat. Es gibt unendlich viele solche Dreiecksformen. Das Dreieck mit den Winkeln 30, 30 und 120 Grad ist das einzige gleichschenklige Dreieck mit dieser Eigenschaft.

Grenzen wir das Chaos noch mehr ein, indem wir nach weiteren Formen von Ordnung suchen. Das wären zum Beispiel Dreiecke, die unter der Abbildung in ihrer Form unverändert bleiben (»Fixpunkte« der Iteration) oder eine kleine Anzahl von Zuständen immer wieder durchlaufen.



Was wird einmal aus dem roten Dreieck werden?

Neben dem gleichseitigen Dreieck und den entarteten finden sich nur zwei Fixpunkte der Iteration. Das erste dieser Dreiecke hat ungefähr die Winkel 17,027, 32,132 und 130,84 Grad (diese Zahlen stehen wahrscheinlich nicht in einem rationalen Verhältnis zu 180 Grad) und die Werte

$$s = \frac{6 - \sqrt{5}}{4} \quad \text{und} \quad p = \frac{8\sqrt{5} - 17}{64}.$$

Setzt man sie in van IJzerens Formeln ein, so ergibt sich  $S=s$  und  $P=p$ . Das zweite ist das heptagonale Dreieck mit  $s=7/4$  und  $p=7/64$ , dessen Winkel  $1/7, 2/7$  und  $4/7$  von 180 Grad betragen, also ungefähr 25,7, 51,4 und 102,9 Grad. Man erhält es, indem man von einem regelmäßigen Siebeneck den ersten, den zweiten und den vierten Eckpunkt nimmt.

Es gibt sieben Dreieckspaare, bei denen jeder Partner (bezüglich der Form) Spiegelungsdreieck des anderen ist, die Folge der Iterierten also die Periode 2

hat, sowie 32 Gruppen aus drei Dreiecken, die durch die Abbildung immer wieder durchlaufen werden. Zyklen von 4, 5, 6, ... Spiegelungsschritten existieren ebenfalls.

In unendlich vielen Fällen strebt die Folge der Spiegelungsdreiecke eines Mutterdreiecks weder gegen eine stabile Grenzform noch gegen einen Grenzzyklus wiederkehrender Gestalten, sondern irrt ziel- und endlos durch die weite Welt der stumpfwinkligen Dreiecke.

### Gute Dreiecke kommen in den Himmel, böse überallhin

Um einen gewissen Überblick über das Chaos zu gewinnen, empfiehlt sich die Anfertigung einer Art Landkarte. Wir stellen jedes Dreieck durch einen Punkt dar, dessen Koordinaten seine beiden kleinsten Winkel  $\alpha$  und  $\beta$  sind (Kasten auf der nächsten Seite).

Jedem Punkt auf dieser Landkarte (das heißt jedem Dreieck) ist genau ein Punkt zugeordnet, der dessen Spiege-

lungsdreieck entspricht. Stellen wir uns den Lebenslauf eines Dreiecks so vor, dass es von seiner Urform in sein Spiegelungsdreieck verwandelt wird, dieses dann wieder in sein Spiegelungsdreieck und so weiter bis ins Unendliche. Das Leben eines Dreiecks ist also durch seine Urform in alle Ewigkeit vorherbestimmt: Das System ist deterministisch. Aber es ist deterministisches Chaos, zumindest stellenweise.

Wenn für ein Dreieck die Gleichseitigkeit so etwas ist wie die ewige Seligkeit, dann darf sich ein spitzwinkliges Dreieck von Anfang an glücklich schätzen. Es bleibt nicht nur sein Leben lang spitzwinklig, es kommt auch der Seligkeit immer näher.

Die Dreiecke, die nicht das Glück hatten, spitzwinklig geboren zu werden, müssen deswegen noch nicht verzweifeln. Wer sich im grünen Bereich (Bild im Kasten S. 78) befindet, ist nach einer einzigen Iteration hellblau (spitzwinklig) und damit auf dem Pfad der Tu-

## WISSEN, WAS WICHTIG IST – IMMER UND ÜBERALL!

Mit dem Digitalabo von **Spektrum der Wissenschaft**



Jahresabonnenten (Privatnutzer) können nicht nur die aktuelle Ausgabe direkt als PDF abrufen, sondern haben auch noch vollen Zugriff auf das komplette Onlineheftarchiv!

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

gend. Dreiecke aus den dunkelblauen Bereichen sind nach einem Schritt im Grünen und damit nur unwesentlich weiter von der Seligkeit entfernt, solche aus den roten brauchen insgesamt drei Schritte (über Dunkelblau und Grün), bis sie spitzwinklig sind.

Außer der ewigen Seligkeit gibt es allerdings auch die ewige Verdammnis. Das ist der Zustand des zum Strich entarteten Dreiecks, der bei  $\alpha = \beta = 0$  in der linken unteren Ecke des Bilds im Kasten zu finden ist. Einmal entartet, immer entartet: Der Zustand  $(0, 0)$  ist ein Fixpunkt der Iterationsabbildung, aus ihm gibt es kein Entkommen.

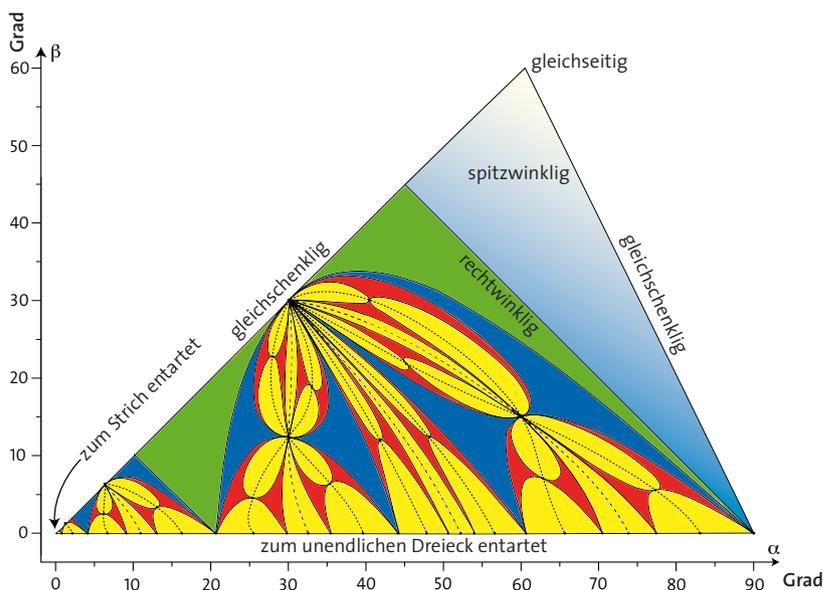
**Das Schicksal ist gnädig**

Anders als die Seligkeit, der man sich im Allgemeinen sehr allmählich nähert, schlägt die Verdammnis plötzlich zu. Wer auf die strichpunktierete Linie im Bild gerät, findet sich im nächsten Schritt in der Hölle wieder. Von einem Punkt auf einer gestrichelten Linie führt der Weg erst auf die strichpunktierete und dann schnurstracks ins Verderben; Punkte auf einer der punktierten Linien haben noch einen Iterationsschritt länger zu leben.

In einem gewissen Sinn ist das Schicksal allerdings gnädig. Ein hinreichend kleiner Fehltritt tut der Seligkeit keinen Abbruch, während ein noch so kurzer geschickter Rettungssprung einen vor der Verdammnis bewahrt. Genauer gesagt: Jeder »gute«, das heißt zur ewigen Seligkeit bestimmte Punkt hat um sich eine ganze Umgebung guter Punkte, und in jeder Umgebung eines »verdammten«, das heißt irgendwann in der Entartung endenden Punktes gibt es gute Punkte. Nirgends ist der Weg zur Seligkeit so einfach wie hier: Die Guten können einfach dem Schicksal seinen Lauf lassen, und alle anderen müssen ihr Leben nur ein bisschen gezielt ändern – ein beliebig kleines bisschen. Die Mathematiker drücken die Sache etwas prosaischer aus: Die Menge der Zustände, die zur Gleichseitigkeit konvergieren, ist offen und dicht.

Was ist mit den Dreiecken, die wir bislang weder auf den Inseln der Seligen noch auf den Wegen zur Verdamm-

**Die Landkarte der Dreiecke**



**Die Gestalt eines Dreiecks** ist durch seine beiden kleinsten Winkel bereits vollständig bestimmt; der dritte Winkel ergibt sich aus dem Satz über die Winkelsumme.

Bezeichnen wir den kleinsten Winkel eines Dreiecks mit  $\alpha$ , den zweitkleinsten mit  $\beta$ , dann entspricht jeder Punkt in dem gefärbten Teilfeld der  $(\alpha, \beta)$ -Ebene (Bild) einem Dreieck. Das gleichseitige Dreieck ist der Punkt an der Spitze. Alle spitzwinkligen Dreiecke befinden sich in dem hellblauen Feld rechts oben. Gleichschenklige und rechtwinklige Dreiecke sind auf den entsprechend bezeichneten Linien angesiedelt.

Der Punkt  $(0, 0)$  entspricht allen Dreiecken, die zum Strich entartet sind. Die zwei Winkel an den Enden des Strichs sind null. Der dritte beträgt  $180$  Grad und liegt an einem Punkt irgendwo auf dem Strich, auf dessen genaue Lage es nicht ankommt. An der Unterkante des gefärbten Felds ( $\beta = 0, \alpha > 0$ ) liegen entartete Dreiecke einer anderen Art, von denen im Haupttext nicht die Rede ist: Zwei der drei Seiten sind parallel und treffen sich im Unendlichen mit dem Winkel  $\beta = 0$ . Die dritte Seite ist eine gewöhnliche (endlich lange) Strecke und bildet mit den Parallelen den Winkel  $\alpha$ .

**Aus der Konstruktion des Spiegelungsdreiecks** ergibt sich eine Abbildung, die jeden Punkt des gefärbten Felds (jedes Dreieck) auf denjenigen Punkt abbildet, der dem zugehörigen Spiegelungsdreieck entspricht. Jedes spitzwinklige Dreieck wird wieder auf ein spitzwinkliges abgebildet. Wendet man die Abbildung auf den Bildpunkt eines solchen Dreiecks an, dann auf dessen Bildpunkt und so weiter (Iteration der Abbildung), so strebt die Folge dieser Dreiecke gegen das gleichseitige Dreieck.

Jedes grüne Dreieck, das heißt jeder Punkt in dem grünen Teilbereich, wird auf ein spitzwinkliges abgebildet, jedes dunkelblaue auf ein grünes und jedes rote auf ein dunkelblaues. Insbesondere sind alle roten Dreiecke nach drei Iterationsschritten spitzwinklig und damit auf dem Weg zur Gleichseitigkeit.

Alle Dreiecke auf der strichpunktierten Linie werden durch die Abbildung zu entarteten Dreiecken, geraten also in den Punkt  $(0, 0)$  und verbleiben dort unter allen weiteren Iterationen. Punkte auf den gestrichelten Linien entarten nach zwei, solche auf den gepunkteten Linien nach drei Iterationsschritten.

In meiner Arbeit ermittle ich auch auf der Landkarte zu jedem nichtentarteten Tochterdreieck den genauen Standort seiner fünf bis sieben Mütter. G. N.

nis finden (im Bild im Kasten gelb gefärbt)? Man kann die Analyse weiter treiben, also allen Punkten, die nach einem Schritt im Roten landen, eine neue Farbe geben, dann allen, die nach zwei Schritten im Roten landen, und so weiter. Entsprechend findet man Linien aus Punkten, die nach einem, zwei, drei ... Schritten auf eine punktierte Linie geraten. Wie bei Iterationsabbildungen üblich, werden die neu eingefärbten Bereiche und die Zusatzlinien immer zahlreicher und sind zu den bereits vorhandenen Bereichen irgendwie ähnlich – nicht im Sinn einer einfachen Vergrößerung oder Verkleinerung, sondern einer komplizierteren (stetigen) Deformation. Die Verteilung der Dreiecke weist eine fraktale, selbstähnliche Struktur auf: Gewisse Teile enthalten verkleinerte (mehr oder weniger verformte) Kopien ihrer selbst, die folglich auch verkleinerte Kopien ihrer selbst enthalten, und so weiter.

Die neu eingefärbten Bereiche und die neuen Linien zur Verdammnis überdecken die gelben Bereiche schließlich so vollständig, dass mit bloßem Auge nichts mehr davon zu sehen ist. Gleichwohl bleiben unendlich viele gelbe Punkte übrig. Das sind solche wie das heptagonale Dreieck, die weder gut noch verdammt sind. Ihre Lebenswege verlaufen früher oder später zyklisch, durchlaufen also nach einer gewissen Zeit immer wieder dieselbe Folge von Punkten; oder sie irren scheinbar regellos durch den verfügbaren Raum, alle guten und alle verdammten Punkte meidend.

Nennen wir alle Punkte, die weder gut noch verdammt sind, »böse«. Dann kann man beweisen: Es gibt einen bösen Punkt, der im Lauf seines Lebens jedem bösen und jedem verdammten Punkt unendlich oft beliebig nahe kommt. Es gibt sogar unendlich viele solche superbösen Punkte. Durch beliebig kleine Veränderung eines bösen Dreiecks kann man aus ihm ein gutes, ein verdammtes oder ein böses mit besonderen Eigenschaften (zum Beispiel zyklisch werdend mit wählbarer Periode) machen. Auf der Teilmenge der bösen und der verdammten Punkte ist

das dynamische System mischend ebenso wie das oben genannte System mit den Höhendreiecken: Zu zwei gegebenen Dreiecken  $D_1$  und  $D_2$  ohne gleichseitige Grenzform findet sich in beliebig kleiner Entfernung von  $D_1$  ein Dreieck, das auf seinem Lebensweg  $D_2$  exakt trifft, also ein Vorfahr von  $D_2$ .

### Symbolische Dynamik

Woher weiß man das alles? Durch viel Detailarbeit. Man muss von der Darstellung durch  $\alpha$  und  $\beta$  zur gleichwertigen durch  $s$  und  $p$  (Summe und Produkt der Quadrate der Sinuswerte) übergehen und dann aus den oben genannten Formeln wesentliche Beweisschritte herausholen. Die Existenz von Zyklen jeder Periode folgt aus einem Fixpunktsatz, der von van Ilzerens Landsmann Luitzen Egbertus Jan Brouwer (1881–1966) stammt.

Schließlich kann man in einem iterativen Verfahren jedem Punkt eine »Adresse« zuweisen: eine Folge von Ziffern, die nicht nur diesen Punkt lokalisiert, sondern auch über sein Schicksal Auskunft gibt. Damit ist die Dynamik des Systems in eine »symbolische Dynamik« übersetzt. In ihr geht es nicht mehr um die geometrischen Einzelheiten, sondern nur noch um die innere Struktur des Systems: Ein Dreieck wird zur Anschrift, der Wechsel zum Spiegelungsdreieck ist nur noch eine einfache Adressenänderung. Aus dieser Darstellung lassen sich viele Erkenntnisse gewinnen.

Als krönenden Abschluss stellen wir noch zwei offene Fragen vor, die mit unserem Problem zusammenhängen. Als Eckpunkte des Tochterdreiecks kann man die Punkte auf jeder Mutterdreiecksseite wählen, die auf halbem Weg zwischen der Seitenmitte und dem Höhenfußpunkt liegen. Es stellt sich heraus, dass das so entstehende Dreieck dieselben Winkel hat wie das Spiegelungsdreieck. In unserer auf Klassen ähnlicher Dreiecke eingeschränkten Sichtweise ist die neue Iterationsabbildung somit dieselbe wie zuvor. Die echten Dreiecke werden allerdings im Gegensatz zu den Spiegelungsdreiecken tendenziell kleiner; für spitzwinklige

Dreiecke ist sogar die Tochter vollständig in der Mutter enthalten und der Gleichseitigkeit noch näher als sie. Also strebt zumindest für gute Dreiecke die Folge gegen einen Grenzpunkt. Die naheliegende Frage lautet: Wo liegt dieser Grenzpunkt? Und existiert er vielleicht auch für nicht gute Dreiecke?

Die zweite Frage taucht auf, wenn unser Problem in drei Dimensionen übertragen wird: Wie verhält sich die Folge der Spiegelungspyramiden einer Mutterpyramide mit dreieckiger Grundfläche, wenn die neuen Ecken durch Spiegelung der alten an der gegenüberliegenden Grund- oder Seitenfläche entstehen?  $\approx$

### DER AUTOR



Der Bergführer **Grégoire Nicollier** unterrichtet Mathematik für Ingenieure an der zweisprachigen Fachhochschule Westschweiz in Sion (Sitten), mitten in den Walliser Alpen unweit des Matterhorns. 1984 schloss er sein Studium an der ETH Zürich mit einer Dissertation über homologische Algebra ab.

### QUELLEN

- Alexander, J.C.:** The Symbolic Dynamics of the Sequence of Pedal Triangles. In: Mathematics Magazine 66, S. 147–158, 1993
- Ismailescu, D., Jacobs, J.:** On Sequences of Nested Triangles. In: Periodica Mathematica Hungarica 53, S. 169–184, 2006
- van Ilzeren, J.:** Driehoeken met gegeven spiegelpuntdriehoek. In: EUT Report 84-WSK-03, Technische Universiteit Eindhoven 1984, S. 356–373. Online unter <http://alexandria.tue.nl/repository/books/256699.pdf>
- Lax, P.D.:** The Ergodic Character of Sequences of Pedal Triangles. In: The American Mathematical Monthly 97, S. 377–381, 1990
- Nicollier, G.:** Reflection Triangles and Their Iterates. In: Forum Geometricorum 12, S. 83–129, 2012. Online unter <http://forumgeom.fau.edu>
- Ungar, P.:** Mixing Property of the Pedal Mapping. In: The American Mathematical Monthly 97, S. 898–900, 1990

### WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1159821](http://www.spektrum.de/artikel/1159821)

## Hunger und Gehirn

»Durch das Tierexperiment wurde bewiesen, daß von bestimmten Stellen des Gehirns Fettsucht erzeugt werden kann. Die Durchforschung dieser Hirnregion mittels elektrischer Reizungen oder punktförmiger elektrischer oder mechanischer Zerstörung von Hirnsubstanz zeigten, daß die Ausschaltung bestimmter kleiner Kerngruppen im Boden der 3. Hirnkammer mit Verlust des Sättigungsgefühls verbunden war, die Versuchstiere erkrankten und innerhalb 6 bis 8 Wochen ihr Körpergewicht verdoppelten. Seitlich von diesen Kerngebieten wurden Formationen entdeckt, die mit der Funktion eines ›Freß-Zentrums‹ verknüpft sind, so daß eine Zerstörung zu rapider Abmagerung führt.« Umschau 20, 1962, S. 642

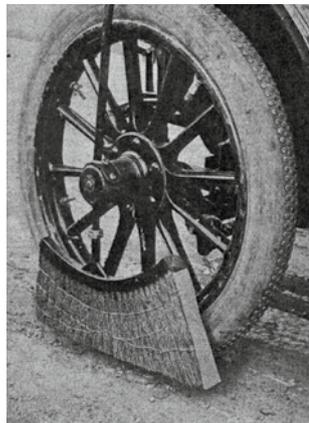
## Tempo 200 für die Schiene

»Heute arbeiten Techniker der Bundesbahn daran, eine Höchstgeschwindigkeit von 200 km/h in die Tat umzusetzen. Der vorhandene Oberbau läßt dies nach geringfügigen Verbesserungen zu. Anders ist es mit der Signaltechnik. Hier muß ein Signalsystem ausgearbeitet werden, das sicherstellt, daß dem Lokomotivführer rechtzeitig die Stellung der Signale mitgeteilt wird. Auch das Triebfahrzeug stellt eine Reihe neuer Aufgaben an die Technik. Ein Problem ist die Stromabnahme vom Fahrdrabt bei 200 km/h.« Umschau 20, 1962, S. 647



## Schutz gegen Spritzschmutz

»Unzweifelhaft ist es höchst unangenehm für den Passanten, wenn ein rasch vorübersausendes Auto ihn mit Schmutz bespritzt, und es verdient daher gewiß Anerkennung, daß jüngst der französische Automobilclub durch ein Preisausschreiben die Aufmerksamkeit der Erfinder auf diesen Punkt gelenkt hat. Im ganzen haben sich mehr als 30 Firmen beteiligt, unter denen schließlich Dreuer den ersten Preis erhielt. Es handelt sich um eine Platte, die vor dem Rad befestigt



Der preisgekrönte Dreckschutz.

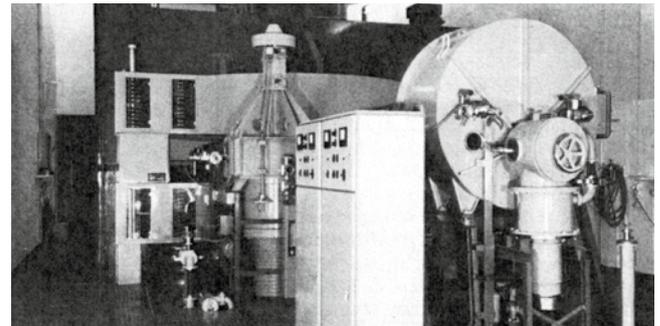
ist. Als Resultat dieses Wettbewerbs kam eine an die Deputiertenkammer gerichtete Eingabe zustande, die gesetzlichen Zwang zur Anbringung von Spritzschutzvorrichtungen beantragt.« Technische Monatshefte 10, 1912, S. 313–315

## Sternstunde der Kernphysik in Göttingen



»... wurde am 12. Juli der Universität Göttingen ein Synchro-Zyklotron übergeben.

Unter Einfluss eines hochfrequenten Wechselfeldes werden die in der Kammer eingeschlossenen geladenen Teilchen auf einer spiralförmigen Bahn beschleunigt. Nach rund 5000 Umläufen haben die Teilchen eine Geschwindigkeit von 50 000 km/sek erreicht. Mit diesen energiereichen Teilchen bombardiert man bestimmte Stoffe, um darin Kernreaktionen auszulösen.« Elektronik 10, 1962, S. 315



Forschung im strahlungssicheren Betongebäude: Der neue Göttinger Ionenbeschleuniger.

## Feuer in der Grube

»Einstweilen glaubt man Wirtschaftlichkeit dadurch erreicht zu haben, daß man die zu Tage geförderten Kohlen durch Verbrennung in Elektrizität verwandelt oder sie direkt vergast. Einen Schritt weiter will Sir William Ramsay gehen, der kürzlich die Möglichkeit erörterte, die Kohle in der Grube zu vergasen. In einem amerikanischen Patent aus dem Jahr 1909 ist das Problem schon angeschnitten worden. Der Erfinder wollte Kohlenflöze dadurch ausbeuten, daß er sie anbohrte und entzündete.« Prometheus 1197, 1912, S. 16

## Ein Zwergsaurier

»Seinem ungeheuren Vetter gegenüber (gemeint war der Allosaurus; die Red.) kann Podokesaurus holyokensis nur eine Größe von 18 cm aufweisen. Wenn auch den Laien die großen Saurier eher interessieren, so sind doch die kleinen, besser erhaltenen Tiere für die wissenschaftliche Bearbeitung wertvoller. Um so mehr ist es zu begrüßen, daß neuerdings von Prof. Fraß, Stuttgart, in der deutschen Trias bedeutende Funde solcher Kleinsaurier gemacht wurden.« Die Umschau in Wissenschaft und Technik 41, 1912, S. 872–873



**Damit aus Neugier  
Wissen wird.**

Für alle Wissbegierigen zwischen 10 und 14 Jahren, die nicht nur das »Was«, sondern auch das »Wie« und »Warum« interessiert, gibt es jetzt **Spektrum NEO**. In jeder Ausgabe wird ein großes Thema behandelt – im aktuellen Heft »Die Welt im Jahr 2050« und in der nächsten Ausgabe »Nano – Expedition ins Unsichtbare«

In Zusammenarbeit mit dem Leibniz-Institut für die Pädagogik der Naturwissenschaften und Mathematik in Kiel

**f facebook**

Jetzt die Heftreihe oder einzelne Hefte bestellen:  
**[www.spektrum-neo.de](http://www.spektrum-neo.de)**



# Ökosysteme erforschen

Um den Gesetzen ökologischer Systeme auf die Schliche zu kommen, entwickeln Forscher ausgeklügelte Experimente. Oft müssen sie dabei jedoch auf verheerenden Eingriffen des Menschen aufbauen.

Von Robert M. Pringle

»» **W**ie anziehend es ist, ein mit verschiedenen Pflanzen bedecktes Stückchen Land zu betrachten, mit singenden Vögeln in den Büschen, mit zahlreichen Insekten, die durch die Luft schwirren, mit Würmern, die über den feuchten Boden kriechen, und sich dabei zu überlegen, dass alle diese so kunstvoll gebauten, so sehr verschiedenen und doch in so verzwickter Weise voneinander abhängigen Geschöpfe durch Gesetze erzeugt worden sind, die noch rings um uns wirken.«

So beginnt Charles Darwin den letzten Absatz seines 1859 erschienenen Werks »Über die Entstehung der Arten«. Er war damals den ineinandergreifenden Regeln und Kräften der Evolution auf der Spur, die er im Wesentlichen erkannt hatte. Was allerdings ökologische Gesetzmäßigkeiten betrifft – also Beziehungen und Wechselwirkungen zwischen Organismen und ihrer lebenden und unbelebten Umwelt –, so haben die Forscher auch heute noch große Mühe, die jeweils wirkenden Einflüsse und Entwicklungsmuster zu verstehen. Selbst scheinbar simple Fragen entpuppen sich oft als reichlich kompliziert – etwa warum eine bestimmte Population gerade an jenem Ort vorkommt und an einem anderen ganz

ähnlichen nicht oder weshalb von einer Eidechse in einem Waldgebiet pro Hektar rund 500 Exemplare leben und nicht 50 oder 5000. Verblüffend ist oft auch, wie stark sich Artenbestände mit der Zeit verändern können. Welche Faktoren jeweils in den Vordergrund treten, kann sogar von der Größe des betrachteten Ausschnitts eines Ökosystems abhängen.

Zur Umwelt eines Organismus gehören zum Beispiel: andere Vertreter der eigenen Art sowie Angehörige weiterer Spezies, deren Verteilung und Raumnutzung, zudem Faktoren wie Temperatur, Lichtmenge, Wasser oder auch verschiedenste chemische Stoffe. Mit vielen dieser Komponenten tritt ein Organismus auf diverse Weise in Wechselwirkung, etwa wenn er sich Nährstoffe beschafft, Paarungspartner sucht, sich vor Fressfeinden schützt und wenn er sich gegen Kälte, Überhitzung oder Austrocknung wappnet.

Die dabei auf ganz verschiedenen Ebenen auftretenden Wechselwirkungsmuster möchten Ökologen verstehen. Wegen der großen Anzahl von Einflussfaktoren existieren allerdings zu manchen beobachteten Zuständen eine Reihe teils widersprüchlicher Erklärungsansätze.

Dazu ein Beispiel aus der afrikanischen Savanne: In einer Gegend gibt es viele Löwen, einige Gnus und einen recht hohen Pflanzenbewuchs. Woanders wurden die Löwen ausgerottet, die Gnus haben sich stark vermehrt, und das Gras ist überall kurz gefressen. Man ist versucht, den kahlen Zustand der zweiten Landschaft dem Fehlen von Löwen zuzuschreiben, weil sie den Bestand der Gnus niedrig gehalten hätten. Damit verträte man eine etablierte Ansicht. Nur muss das nicht zutreffen. Vielleicht wächst Gras am zweiten Standort schon deswegen schlechter, weil dort weniger Regen fällt. Auch Buschfeuer der letzten Zeit wären in Betracht zu ziehen, ebenso die Bodenqualität. Und womöglich gibt es unterschiedlich viele andere weidende Arten. Nicht zuletzt könnten sich die Pflanzen der ersten Gegend sogar mechanisch oder chemisch besser vor Fraß schützen. Das bedeutet: Bevor ein Forscher aus seinen Beobachtungen Schlüsse zieht, muss er viele Hypothesen abklären. Aber selbst wenn es ihm schließlich gelingt, hinsichtlich der beiden Orte einen überzeugenden

## AUF EINEN BLICK

### LEBENSÄRÄUME INSPIZIEREN

**1** Noch hat die Ökologie keine allgemeinen wissenschaftlichen Gesetze zur inneren **Dynamik von Ökosystemen** gefunden. Dennoch zeichnen sich langsam die wichtigen übergeordneten Prozesse ab.

**2** Im Labor lässt sich die **Funktionsweise ökologischer Systeme** nur unzureichend aufklären. Eher gewinnen Wissenschaftler Erkenntnisse in der **Wildnis** selbst: an zerstörten Lebensräumen; bei Versuchen, ein Gebiet wieder aufzubauen; und mit gezielten Manipulationen.

**3** Einen früheren Zustand nochmals exakt wiederherzustellen, ist **utopisch**. Was als ursprünglich gilt, entspringt **kulturellen Vorstellungen**. Und zukünftige Entwicklungen lassen sich selbst bei kontrollierten Studien nur bedingt vorhersagen.



»Rainforest Cube«, Würfel vom Regenwald, nannte der amerikanische Künstler Frank Ippolito dieses Bild, das er 2004 malte. Ein Ökosystem wirkt nur auf den ersten Blick chaotisch. Denn genaue Betrachtung enthüllt Stoffflüsse und Beziehungsmuster zwischen Organismen.

den Zusammenhang herzustellen, kann es geschehen, dass ein akademischer Jungspund in einer dritten Gegend herausfindet, dass dort alles ganz anders funktioniert.

Die neuen Ideen werden meist im Elfenbeinturm ausgebrütet – dann aber, auf der Suche nach dem immer komplizierten Warum, folgen viel harte Arbeit vor Ort sowie heftige Diskussionen mit Kollegen. Das alles machen Forscher nicht nur aus akademischem Interesse. Uns alle betrifft es, ob und wie Klimawandel, Vernichtung von Wäldern, Artensterben oder sich ausbreitende fremde Arten Einfluss nehmen zum Beispiel auf Luftqualität, Wasserversorgung, Krankheiten oder Fischbestände und vieles mehr (siehe SdW 9/2008, S. 68). Die Gesellschaft fordert von der Wissenschaft Antwort-

ten. Nur können wir Forscher die erst liefern, wenn wir wissen, wie sich die Bausteine zusammenfügen.

Selbst die einfachsten Ökosysteme erweisen sich als so verwoben, dass es fast unmöglich erscheint, sie mit allgemeinen Gesetzen zu beschreiben. Nur wenige der ganz großen Rätsel ließen sich bisher einigermaßen zufrieden stellend beantworten. Bei den meisten Fragen sind wir seit Jahrzehnten nicht wirklich weitergekommen.

Das bedeutet nicht, dass es auf anderen Ebenen keine Fortschritte gab. Die Wissenschaftler haben für Ökosysteme Muster und Regeln aufgedeckt, die weithin zutreffen – einige vielleicht sogar überall. Manche Forscher halten die krampfhaftige Suche nach absolut allgemein gültigen Gesetzen ohne-



ROBERT W. PRINGLE

Mit solchen umzäunten, einen Hektar großen Parzellen simuliert das Team des Autors im Mpala-Forschungszentrum in Kenia stufenweise das Verschwinden von Pflanzenfressern verschiedener Größe. Die hohen Drähte halten Elefanten mit Elektroschlägen fern, die tiefer gezogenen unter anderem größere Antilopen. Maschendraht sichert das Gelände gegen die hasen großen Dikdiks.

hin für überholt, für ein Überbleibsel physikzentrierter Wissenschaftsauffassung. Besser solle man sich damit zufriedengeben, aus den anwachsenden Einzelerkenntnissen ein immer genaueres Gesamtbild zu zeichnen. Da kommt die Forschung tatsächlich gut voran.

Auf vielen Feldern der Biologie bringen experimentelle Studien oft die überzeugendsten Einsichten. Gleiches gilt für die Ökologie. Allerdings lassen sich die in dieser Disziplin hinterfragten Zusammenhänge selten im Labor, Käfig oder Gewächshaus untersuchen. Selbstverständlich erforschen Ökologen manche Teilfragen auch dort – im Bewusstsein, dass sie dann stark vereinfachte Systeme vor sich haben, sozusagen Abstraktionen der Natur.

### Warum Berge am Äquator für Tiere und Pflanzen höher sind

Zufällig schreibe ich diesen Text in Bhutan, mit Blick aus einem Tal auf einen kleinen, mit Tannen bewachsenen Berg. Zwischen den Felsbrocken am nebligen Gipfel stehen die Bäume vereinzelt. Zum Tal hin wird ihr Bestand immer dichter. Um die Gründe für dieses Verteilungsmuster unter streng kontrollierten Bedingungen zu untersuchen, müssten mir eine Anzahl gleicher, abgeschirmter Berge zur Verfügung stehen. Dann könnte ich eine berühmte These des amerikanischen Evolutionsökologen Daniel (Dan) Janzen testen. 1967 äußerte er, in den Tropen seien die Berge für die Lebewesen wohl scheinbar höher. Er meinte damit, tropische Tiere und Pflanzen hätten mehr Schwierigkeiten, Höhenbarrieren zu überwinden, weil sie weniger als Organismen gemäßigter Breiten daran angepasst seien, ausgeprägte Temperaturunterschiede zu tolerieren. Denn hier wie dort nimmt die Temperatur je 1000 Meter Anstieg um rund sechs Grad Celsius ab.

In der Stadt Princeton in New Jersey an der amerikanischen Ostküste betragen die mittlere Minimal- und Maximaltemperatur  $-6$  und  $+24$  Grad Celsius. In Liberia im Nordwesten von Costa Rica sind es  $+22$  und  $+35$  Grad, eine deutlich kleinere Differenz. Wie gut eine Art mit höheren oder tieferen Temperaturen zurechtkommt, lässt sich im Labor testen; und die erzielten Ergebnisse passen zu Janzens These. Zudem haben Freilandstudien an zigtausend Tier- und Pflanzenspezies aus ganz Nord- und Südamerika bestätigt, dass in der Natur Organismen nördlicherer Gebiete tatsächlich größere Höhenunterschiede aushalten.

Die Hypothese selbst ist damit allerdings noch nicht erschöpfend geklärt. In ihr stecken weitere Annahmen, die sich nicht so leicht direkt überprüfen lassen. Zum Beispiel muss bei einem Gebirgszug nicht zwangsläufig Kälte das Verbreitungshindernis darstellen, denn auch andere Parameter ändern sich mit der Höhe. Ein sauberer Versuch zu dem Berg in Bhutan würde erfordern, jeweils mehrere identische Berge in verschiedene Gebiete der Erde zu stellen, alles Leben von ihnen zu entfernen, eine neue Besiedlung zu ermöglichen und dann die Entwicklungen des Baumbewuchses jahrzehntelang zu verfolgen.

Ökologen müssen sich auch dessen bewusst sein, dass sie nicht über praktische, gut handhabbare Modellsysteme für klar definierte Experimente verfügen. Das ist in Fächern wie Genetik oder Zellbiologie der Fall, wo man in der Regel mit wenigen Modellorganismen arbeitet, etwa mit *E.-coli*-Bakterien, Bäckerhefe, der Taufliege *Drosophila* oder der Labormaus. Hauptsächlich dieser Beschränkung verdanken jene Disziplinen ihre Erfolge. Denn viele Prozesse auf molekularer und zellulärer Ebene gelten gleichzeitig für eine große Anzahl von Arten. So stark sich Elefanten und Mäuse in vielen zellulären Prozessen ähneln – ökologisch sind beide

durchaus verschieden: Sie ernähren sich anders und haben nicht die gleichen Feinde, und gegenüber Artgenossen sowie fremden Spezies verhalten sich beide ziemlich unterschiedlich. In einem meiner Forschungsprojekte untersuchen wir derzeit die ökologische Bedeutung von Elefanten für Mäuse und andere kleine Tiere.

Dazu starteten Jacob Goheen von der University of Wyoming in Laramie, Todd Palmer von der University of Florida in Gainesville und ich vor einigen Jahren in Zentralkenia ein Projekt auf dem Laikipia-Plateau im Mpala-Schutz- und Forschungszentrum. Wir versuchen dort das Verschwinden großer Tiere nachzuahmen, indem wir sie von einzelnen Flächen fernhalten, und die Folgen für die Pflanzen- und übrige Tierwelt zu beobachten. Gleichzeitig berücksichtigen wir an diesen Orten Unterschiede einiger Klimavariablen, denn die können schon auf geringe Entfernungen voneinander abweichen.

Die vor Ort lebenden Huftiere teilen wir in drei Größenklassen ein: Elefanten und Giraffen gehören zu den so genannten Megaherbivoren; Impalas (Schwarzfersenantilopen) und Zebras sowie einige andere Arten rechnen wir zu

**Sehr kleine Bahamasinseln eignen sich als Versuchsgelände, um einzelne Arten hinzuzufügen oder zu entfernen. Im geschilderten Fall testen Forscher an kleinen *Anolis*-Echsen, wie sich miteinander konkurrierende Spezies ökologisch verhalten und ob sich daran etwas ändert, wenn ein neuer Fressfeind auftritt – in diesem Fall Rollschwanzleguane.**

mittelgroßen Herbivoren; und zur Klasse der kleinsten zählen vor allem die allgegenwärtigen Dikdiks – Zwergantilopen, die nur ungefähr fünf Kilogramm wiegen und wenig größer als Hasen sind. Wir haben in dem Schutzgebiet 36 Flächen von jeweils einem Hektar ausgemessen, was je etwa einem großen Fußballfeld entspricht. Neun davon dienen zur Kontrolle, werden von uns also nicht manipuliert, 27 Flächen erhielten eine elektrische Umzäunung in einer von drei Varianten. Jede Sorte Feld ist zudem an Standorten mit verschiedenen viel Niederschlag angelegt.

### **Schrittweises »Artensterben« simuliert**

Wo wir nur die sehr großen Pflanzenfresser von einer Parzelle fernhalten wollen, zogen wir auf zwei Meter Höhe von Solarzellen gespeiste Drähte, die jedem Elefanten, der dagegenkommt, einen Schlag von 7000 Volt verpassen – was übrigens auch ein Mensch verkraftet. Sollen zusätzlich auch die mittelgroßen Huftiere keinen Zugang haben, befestigten wir darunter bis zum Boden hin zwölf weitere horizontal verlaufende Elektrodrähte. Und gegen die kleinen Dikdiks verwenden wir im unteren Teil noch Maschendraht (siehe Bild links).

Elefanten lernen rasch, den Schlag zu meiden. Nur sind sie oft launisch, dann steht wieder einmal eine Zaunreparatur an. Giraffen sind begriffsstutziger – die müssen wir manchmal wegzagen. Doch es gelingt mit den Zäunen, für diese kleinen Flächen die ökologischen Folgen eines schrittweisen Artensterbens zu simulieren, wenn erst die großen, dann die mittleren und schließlich die kleinen Pflanzenfresser ver-



ROBERT M. PRINCIPLE

Rollschwanzleguane jagen am Boden und erbeuten dort vorkommende braune Bahama-anolis. Das sollte Letztere zwingen, sich trotz Konkurrenz an eine neue Nische höher im Strauchwerk zu gewöhnen – so die Hypothese von Evolutionsforschern.



ROBERT COX

schwinden. Wir verfolgen auf den Parzellen sowohl Veränderungen in der Dichte und Zusammensetzung der Pflanzen und Ähnliches als auch unter anderem die Bestandsentwicklung der Nagetiere. Außerdem erfassen wir eine Anzahl weiterer Parameter: etwa Nährstoffzyklen, Abbauraten organischen Materials, Niederschlagsmengen oder die Bodenzusammensetzung. Diese Studien hoffen wir 20 Jahre lang fortsetzen zu können.

Erste markante Unterschiede zeigten sich bald. Die Zäune hatten wir im September 2008 errichtet. Bereits im März 2009 lebten auf Flächen ohne große Huftiere mehr Beutelhammsterratten (*Saccostomus mearnsi*) als vorher, doch das betraf zunächst nur eher trockene Standorte. Wo es mehr regnete, erreichten sie erst ein Jahr später die gleiche hohe Dichte. Schon im November 2008 waren je nach Parzellentyp deutliche Auswirkungen auf die untere Vegetationsschicht zu sehen, sogar auf die Bandbreite der dort gedeihenden Arten. Es dürfte aber Jahre dauern, bis sich auch der Busch- und vor allem der Baumbestand merklich ändern. Wie sich das auswirkt, werden wir erst dann besser verstehen.

Nun verlieren natürliche Ökosysteme nicht nur Arten – wie wir es in dem Keniaexperiment nachahmen –, sondern gewinnen auch neue dazu, was sie ebenfalls entscheidend verändern kann. Oft greift beides sogar ineinander. Heute forciert der Mensch solche Prozesse in besonderem Maß. Deswegen untersuchen Evolutionsforscher und Ökologen mancherorts in kontrollierten Studien, wie sich Lebensräume wandeln und Organismen anpassen, wenn sie dort gezielt einzelne Arten einführen.

Die amerikanische sehr artenreiche Echsegattung *Anolis* eignet sich gut für Beobachtungen und Freilandexperimente vor allem zur Evolution. Die kleinen, meist nur etwas über eidechsen großen Reptilien kommen in mehreren hundert

Spezies unter anderem in Mittelamerika und in der Karibik vor. Zurzeit führen meine Kollegen und ich mit ihnen auf vorgelagerten Miniinseln der Bahamas ökologische Versuche durch (siehe Bild S. 85). Diese Inseln betrachten wir gewissermaßen als überdimensionierte Käfige, deren Insassen wir kontrollieren. Auch gibt es genügend davon, die wir vergleichen können.

### Künstliche Umweltzwänge für Echsen der Bahamas

Uns interessiert dabei, wie der braune Bahama-anolis (*Anolis sagrei*) auf »einwandernde« andere Echsenarten reagiert. *A. sagrei* gehört in dem Inselreich zu den häufig anzutreffenden Spezies. Auf größeren Inseln mit Baumbewuchs lebt er oft an denselben Stellen wie die grüne, sonst in vielem recht ähnliche Art *Anolis smaragdinus*. Dann teilen sich beide das Habitat gewissermaßen auf. »Smaragd«-Anolis bevorzugen Bäume, Bahama-anolis eher den Boden. Wahrscheinlich haben sie sich in der Vergangenheit aus Konkurrenzgründen in leicht verschiedene Nischen zurückgezogen und sich offenbar auch körperlich daran ein wenig angepasst, etwa an den Beinen und in der Farbe.

Winzige Eilande besiedelt der Bahama-anolis oft allein. Doch wenn wir dort »Smaragd«-Anolis aussetzen, scheint es für beide nicht schwierig zu sein, sich wie andernorts auch aus dem Weg zu gehen. Was geschieht aber, wenn plötzlich ein Raubfeind auftritt, der auf dem Boden jagt? Können die Bahama-anolis dann trotz der Konkurrenz unbeschadet auf die Bäume ausweichen? Um das zu beobachten, haben wir zusätzlich einige Rollschwanzleguane (*Leiocephalus carinatus*) auf unsere Versuchsinseln gebracht, die mehrfach größer sind als die *Anolis*-Echsen (siehe Bild oben). Nun sind wir gespannt, ob alle drei Spezies auf den Miniinseln koexistieren

können. Womöglich passt sich der Bahamaanolis körperlich stärker ans Baumleben an, wie Evolutionsforscher es teilweise bei ähnlichen *Anolis*-Arten beobachteten. Wir wollen auch erfassen, ob und wie sich das ganze Nahrungsnetz mitsamt Pflanzen, Insekten und Spinnen verändert.

Bei solchen Versuchen ist stets der ethische Aspekt zu berücksichtigen, wozu auch Umweltzerstörung und Faunenverfälschung zählen, ebenso tierisches Leid. Meines Erachtens sind die Grenzen nicht überschritten, wenn Dickhäuter unter den beschriebenen Umständen Stromstöße verpasst bekommen. Ebenso halte ich es für gerechtfertigt, Echsen von einer großen Insel wenige hundert Meter weiter auf kleine, karge Eilande zu verpflanzen. Allerdings würde ich sie niemals in eine Region bringen, wo sie ursprünglich nicht vorkommen – schon gar nicht etwa nach Hawaii, obwohl sie dort bereits eingeschleppt wurden. Stets sind der wissenschaftliche Nutzen und der ökologische Schaden gegeneinander abzuwägen – der sich einerseits schwer vorhersagen lässt und andererseits katastrophal sein könnte. Und nicht zuletzt müssen wir bei unseren Eingriffen mögliche Auswirkungen auf das Wohlbefinden von Menschen bedenken.

Viele theoretisch vorstellbare Studien verbieten sich schon aus solchen Gründen. Allerdings können die Forscher mitunter »natürliche« Experimente beobachten, wie sie sich von allein ereignen, jedoch oft auch als Nebenprodukt menschlichen Eingreifens zu Stande kommen – ob nach Regenwaldrodung, Zähmen von Flüssen, Schaffen von Stauseen, Einschleppen fremder Arten und vielem mehr.

Manche solche Maßnahmen lieferten sogar den Stoff für bahnbrechende Konzepte der modernen Ökologie. Als beispielsweise in den frühen 1980er Jahren mitten im brasilianischen

Amazonasgebiet 1000 Quadratkilometer Regenwald für Weideland abgeholzt werden sollten, konnten Forscher die Rancher zumindest überreden, eine Anzahl vergleichbarer Parzellen von einem, zehn und hundert Hektar Fläche stehen zu lassen (siehe Bild unten). Daraus entstand ein bedeutendes wissenschaftliches Projekt, in dem die biologische Dynamik von solchen Waldresten untersucht wird. Es lieferte wesentliche Einsichten unter anderem über die Auswüchse der Fragmentierung eines Lebensraums, den Wert von Randzonen, die Folgen einer mehr oder weniger scharfen Zerstückelung von Populationen sowie über Inseleffekte.

### Folgen ökologischer Zerstörung dokumentiert

So traurig es bleibt, dass dieser Urwald und damit unzählige Tiere und Pflanzen unwiederbringlich vernichtet wurden, erbrachte das Projekt bisher immerhin über 500 wissenschaftliche Publikationen. Nicht nur ermöglichen sie den Forschern bessere Vorhersagen zu den Konsequenzen von Rodungen. Auch hunderte Studenten aus Brasilien und anderen Ländern haben dabei viel gelernt und werden ihr ökologisches Wissen weiter tragen.

Ein anderes Beispiel dieser Art betrifft Venezuela. Durch ein Wasserkraftwerk entstand dort 1986 in einem ursprünglichen Waldgebiet eine 4300 Quadratkilometer große Wasserfläche mit zahlreichen neuen Inseln. Von diesen beherbergen die kleineren, wie sich bald herausstellte, keine großen Raubtiere mehr. Infolgedessen explodierten die Bestände ihrer Beutetiere, und die vielen Nager, Affen, Leguane und Blattschneiderameisen richteten die Vegetation auf den kleinen Inseln zu Grunde. Die Forscher, die dies beobachteten, sprachen von einem ökologischen Zusammenbruch.

Bei großflächigen Rodungen mitten im brasilianischen Amazonasregenwald bei Manaus konnten Bauern überredet werden, kleinere Waldflächen stehen zu lassen. Biologen nutzen diese grünen Inseln seitdem für zahlreiche Forschungsprojekte, um die Folgen von verschieden intensiver ökologischer Zerstückelung aufzuzeigen.



CORBIS / MINDEN PICTURES / MARK MOFFETT



Der berühmte Gorongosa-Nationalpark in Mosambik, einst einer der arten- und tierreichsten Afrikas, soll wiedererstehen. Er hat unter einem langen Bürgerkrieg und dessen Folgen für die Bevölkerung arg gelitten. Die Regierung des Landes spannt für ihr Ziel außer Anwohnern viele weitere Partner ein, an erster Stelle den Amerikaner Gregory Carr (Bildmitte).

Umgekehrt liefern auch Bestrebungen, zerstörte Ökosysteme wenigstens näherungsweise wieder aufzubauen, der Wissenschaft wertvolle Erkenntnisse. In Afrika etwa versuchen Forscher, in Gebieten mit weit gehend vernichteter Tierwelt Schutzzone zu deklarieren, den dort dezimierten Beständen Erholung zu gewähren und ausgerottete Arten wieder anzusiedeln. Ein besonderes Beispiel dafür stellt der berühmte Gorongosa-Nationalpark in Zentralmosambik dar. Er liegt im südlichen Ausläufer des Großen Afrikanischen Grabenbruchs. Als er 1960 eingerichtet wurde, noch unter der Kolonialherrschaft Portugals, galt die Region als eine der tier- und artenreichsten in Afrika. 1920 entstand hier ein Jagdgebiet für die Kolonialherren. 30 Jahre später wurde daraus allmählich eine Schutzzone, die viele Touristen anzog.

### **Klägliche Reste des Gorongosa-Nationalparks nach dem Bürgerkrieg**

Noch in den 1960er Jahren kamen in Gorongosa 29 Arten großer Pflanzenfresser zahlreich vor: Elefanten, Flusspferde, Zebras und Gnus ebenso wie Nyalas, Große Kudus und Rappenantilopen. Manche von ihnen bildeten riesige Herden. Rund 20 Raubtierspezies waren anzutreffen, von Löwen bis zu Zorillas, schwarz-weiß gestreiften Mardern. Als das Land nach einem langen Kolonialkrieg 1975 unabhängig geworden war, folgten bald darauf 16 Jahre Bürgerkrieg, die von diesen Tierbeständen wenig übrig ließen. Ohnehin war der Tourismus in dem zerstörten, gelähmten, völlig unterentwickelten Land am Ende.

Bemühungen, Gorongosa wieder zu beleben, scheiterten zunächst. Dabei hätte ein Ökotourismus eine große Chance geboten, in Mosambik eine nachhaltige ökonomische Entwicklung in Gang zu bringen. Allerdings waren es anfangs nicht vor allem Schwierigkeiten ökologischer Art, die einem

Wiederaufbau des Reservats im Weg standen. Denn tatsächlich fehlte es der Region dafür praktisch an allem: an technischen und administrativen Infrastrukturen, an Geldmitteln, vor allem aber am Vertrauen der Menschen, die im und um den Nationalpark lebten und ihren Lebensunterhalt mit seinen Ressourcen bestritten. Sie mussten in das Vorhaben einbezogen werden, und es waren mit ihnen erst wieder Vereinbarungen zu treffen. Nur dann würden Rodungen und die starke Wilderei aufhören.

Die Situation begann sich erst ab 2004 langsam zu verbessern, als die Regierung von Mosambik den amerikanischen Philanthropen Gregory Carr dafür gewann, sich der Sache anzunehmen. Der einstige Unternehmer, Jahrgang 1959, widmet sich seit Jahren humanitären Projekten. Im Jahr 2007 kam ein auf 20 Jahre angelegtes Abkommen zur Wiedererrichtung des Nationalparks zu Stande. Unter anderem soll es dafür sorgen, dass sich die stark dezimierten Bestände der meisten größeren Tierarten von Gorongosa allmählich wieder erholen. Manche Tiere werden zudem aus Nachbarländern hierhergebracht. Zu den vielen anderen Aspekten des Projekts gehört etwa die Aufforstung von Flächen mit ruiniertes Vegetation mit Setzlingen, so bisher mit über drei Millionen Bäumen.

Bei dem Riesenprojekt stehen zwar humanitäre und Umweltziele im Vordergrund, doch gibt es genügend Möglichkeiten für begleitende ökologische Erhebungen. Sogar eine biologische Feldstation wird eingerichtet. Die Forscher möchten unter anderem verfolgen, wie die Pflanzengesellschaften und die Bestände der kleinen Säugetiere reagieren, wenn große Pflanzenfresser und deren Raubfeinde wieder auftauchen und die Landschaft verwandeln. Das wird sich auch auf die für ein solches Ökosystem charakteristischen Buschfeuer auswirken, die frischen Graswuchs fördern. Zudem dürften

sich die Nährstoff- und Wasserkreisläufe verändern. Manche der Huf- und Raubtiere scheinen sich rasch zu erholen, andere nur sehr langsam, wie etwa die bis auf wenige Dutzend Tiere verschwundenen Löwen. Es fragt sich, ob in solchen Fällen Inzuchteffekte den stark geschrumpften Bestand schwächen und ob es ratsam ist, neue Tiere zuzusetzen.

Bei einem Wiederaufbauprojekt wie in Gorongosa muss man sich darüber klar werden, welche Verhältnisse man anstrebt. Soll man beispielsweise den Zustand direkt vor 1975 anpeilen? Zum damaligen Tierbestand liegt gutes Zahlenmaterial vor. Allerdings leben in dem Gebiet heute mehrere tausend Menschen. Die Portugiesen errichteten die Schutzzone hingegen mit der Prämisse, dass ein Nationalpark menschenleer zu sein habe. Also warfen sie die Bewohner hinaus – aus einer Gegend, die der Homo sapiens seit jeher besiedelt hatte. Das machte Jäger und Bauern zu Wilderern und illegalen Landnutzern. Wer heute so einen Park aufbaut, muss zudem berücksichtigen, dass Mosambik gegenwärtig dreimal so viele Einwohner hat wie 1960. Und die meisten sind extrem arm. Die Planungen müssen diese Menschen mit einbeziehen, und das ist auch ausdrücklich so vorgesehen.

### Die Illusion von einer unberührten Natur

Die früheren Vorstellungen von einer sozusagen unberührten, jungfräulichen Natur gelten heute als überholt. Denn was wäre darunter zu verstehen? Der »Vater der amerikanischen Nationalparks« John Muir (1838–1914), der spätere Ökobewegungen stark beeinflusste, hatte ein Amerika vor der Zeit der Europäer vor Augen. Bereits die amerikanischen Ureinwohner verursachten jedoch Zerstörung – indem sie jagten, rodeten, Land bebauten und vermutlich auch zum Aussterben vieler großer Tiere beitrugen. Jede zeitliche Grenzziehung ist willkürlich und kulturell geprägt. Wer den entscheidenden Wandel bei der Entwicklung der Dampfmaschine sieht, dem würde ich die Erfindung des Speers vor mehreren hunderttausend Jahren entgegenhalten, oder besser noch die viel frühere Beherrschung des Feuers. Man könnte sogar bis zum Erscheinen der Menschengattung vor zwei Millionen Jahren zurückgehen.

Einfach ist nicht einmal die Entscheidung, welche Tiere in den Gorongosapark gehören, nähme man kurzerhand den Stand von 1975. Pferde- und Leierantilopen wurden dort vor 1970 ausgerottet. Breitmaulnashörner hingegen, die es seit etwa 1940 nicht mehr gab, hatte man nach 1970 wieder angesiedelt – ebenso 1973 Geparden.

Viel schwieriger ist aber die Handhabung der Zebras. Ihre Herden gehören einfach in die afrikanische Savannenlandschaft, allein schon als Touristenattraktion. Außerdem stellen sie für Löwen, den besonderen Besuchermagneten, eine wichtige Beute dar. Ökologisch gesehen halten sie die Landschaft offen, weil sie auch hohes Gras vertilgen – womit sie für mehr Wuchs und Vielfalt der Pflanzen sorgen und diversen anderen Grasfressern die Weide bereiten. In Gorongosa ist das Steppenzebra heimisch, das hier eine eigene Zeichnung hat und von dem nach dem Bürgerkrieg nur ein winzi-

ger Restbestand übrig geblieben war. Derzeit mögen es kaum 30 Tiere sein. Ob daraus jemals wieder eine große und gesunde Population heranwachsen kann, zumal in absehbarer Zeit, ist fraglich. Weiter nördlich und südlich leben jeweils etwas anders gezeichnete Steppenzebras, vielleicht eigene Unterarten. All diese Formen unterscheiden sich genetisch nur wenig voneinander. Derzeit diskutieren die Verantwortlichen heftig, ob sie zumindest für eine genetische Auffrischung sorgen sollen, auf Kosten der Besonderheit der ansässigen Zebras, oder sogar die Population mit eingeführten Tieren aufstocken.

Hierfür, wie in anderen Fragen auch, gibt es keine ideale Lösung. Ökosysteme lassen sich streng genommen eben nicht rekonstruieren. Wer sich um Wiederherstellung bemüht, kann zwar versuchen, die alten Bedingungen – so gut es geht – in Erfahrung zu bringen. Er muss aber dann mögliche Entwicklungen nach seinem Ermessen vorhersehen und seine Arbeit daran ausrichten. Dennoch lässt sich mit dem heutigen Wissen nicht prognostizieren, was letztlich wirklich geschehen wird und welche Arten einmal zu den Gewinnern oder Verlierern zählen. Bei solchen Projekten ist der Mensch eher Gärtner und Künstler, so die Botschaft der Ökologen. Das hat auch etwas Befreiendes. 

### DER AUTOR



**Robert M. Pringle** ist Assistenzprofessor für Ökologie und Evolutionsbiologie an der Princeton University (New Jersey) und Junior Fellow der Harvard Society of Fellows.

### QUELLEN

**Bullock, J.M. et al.:** Restoration of Ecosystem Services and Biodiversity: Conflicts and Opportunities. In: Trends in Ecology & Evolution 26, S. 541–549, 2011

**Ghalambor, C.K. et al.:** Are Mountain Passes Higher in the Tropics? Janzen's Hypothesis Revisited. In: Integrative and Comparative Biology 46, S. 5–17, 2006

**Laurance, W.F. et al.:** The Fate of Amazonian Forest Fragments: A 32-Year Investigation. In: Biological Conservation 144, S. 56–67, 2011

### LITERATURTIPPS

**Kareiva, P., Marvier, M.:** Mensch und Natur – keine Gegner. In: Spektrum der Wissenschaft 9/2008, S. 68–75  
*Ohne Rücksicht auf menschliche Belange kann Naturschutz nicht funktionieren.*

**Marris, E.:** Die »neuen« Ökosysteme. In: Spektrum der Wissenschaft 2/2010, S. 68–73  
*Auch Landschaften mit neuen Arten können wertvoll sein.*

### WEBLINK

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1159811](http://www.spektrum.de/artikel/1159811)

# Neues aus der Supercomputer-Szene

Bis 2020 sollen die Supercomputer eine Trillion Multiplikationen pro Sekunde bewältigen. Um das zu erreichen, müssen die Entwickler allerdings die Energieeffizienz der Rechner dramatisch verbessern. Ein Bericht von der Internationalen Supercomputer-Konferenz 2012.

Von Hans Günther Kruse

Wenn sich zweimal im Jahr – im Frühjahr in Deutschland, im Herbst in den USA – die Gemeinde der Fachleute zur Supercomputer-Konferenz (ISC beziehungsweise SC) trifft, dann dient diese Veranstaltung wie jede derartige Konferenz dem Fortgang der Wissenschaft und dem Informationsaustausch zwischen Herstellern und Anwendern von Hochleistungsrechnern. Aber zugleich ist sie ein Ereignis, auf dem im Wettstreit der Nationen die Punkte gezählt werden. Wie bei den Olympischen Spielen verstehen die Beteiligten ihr Abschneiden als eine Frage der nationalen Ehre. An die Stelle des Medaillenspiegels tritt die »TOP500«, der Liste der 500 schnellsten Computer der Welt (Kasten S. 95), die seit 1993 regelmäßig zu Beginn der Konferenz veröffentlicht wird.

Lange Zeit führten die USA unangefochten die Liste an, hauptsächlich mit Systemen der Firmen Cray und IBM. Nur ab 2002 konnten das japanische System »Earth Simulator« und sein Nachfolger »Earth Simulator 2« sie für einige Jahre auf die Plätze verweisen, indem sie ein eigentlich als überholt geltendes Bauprinzip auf fantasievolle Weise wiederbelebten: den Vektorrechner (Spektrum der Wissenschaft 9/2002, S. 14, und 7/2003, S. 74).

## AUF EINEN BLICK

### DIE SCHNELLSTEN RECHNER DER WELT

**1** Das **Nachfolgemodell des »Roadrunner«**, des Rekordrechners von 2008, hat – mit 20-facher theoretischer Leistung – den ersten Platz in der Liste der 500 schnellsten Supercomputer zurückerobert.

**2** Bis 2020 sollen die Hochleistungsrechner **eine Trillion ( $10^{18}$ ) Multiplikationen** pro Sekunde (1 Exaflops) bewältigen.

**3** Eines der drängendsten Probleme ist die **Energieeffizienz**. Der Strombedarf pro Rechenoperation muss drastisch sinken, damit der Verbrauch eines Exaflops-Rechners nicht überhandnimmt.



LEIBNIZ-RECHENZENTRUM (IBZ) DER BAYERISCHEN AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN

Mit der Maschine »Roadrunner« durchbrachen die Amerikaner 2008 als Erste die Petaflops-Schranke (Spektrum der Wissenschaft 8/2008, S. 19). Damit schien ihr Vorsprung auf Jahre hinaus gesichert. Welch ein Irrtum! Schon zwei beziehungsweise drei Jahre später gingen das chinesische System »Tianhe-1A« und der japanische »K computer« in Betrieb; und deren Leistung lag deutlich über der des »Roadrunner«.

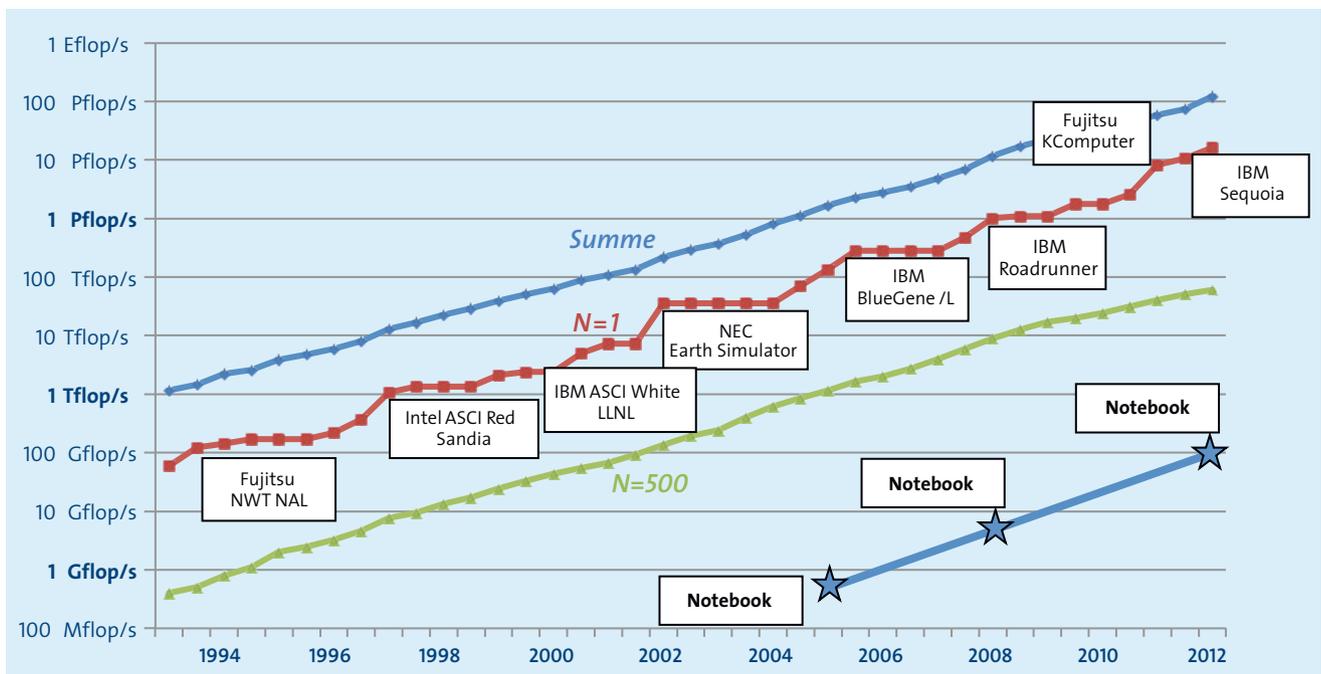
Damit erlebten die Amerikaner nach dem »Earth Simulator« einen zweiten »Computenik-Schock«. Entsprechend viel Mühe gaben sie sich, bald wieder die Nase vorn zu haben – mit Erfolg: Die neuen »BlueGene/Q«-Computer von IBM landeten auf den Plätzen 1, 3, 7 und 8 und verdrängten damit ihre fernöstlichen Konkurrenten auf die Ränge 2 und 5.

Auch unterhalb der Spitzenplätze gibt es von einer Ausgabe der Liste bis zur nächsten heftige Bewegung. Der illustre Kreis der ersten 50 verliert alle halbe Jahre mehr als die Hälfte

seiner Mitglieder. Und die Helden von gestern sind die Verlierer von übermorgen: Wenn der bisherige Trend sich fortsetzt, wird der nagelneue »Hermit« der Universität Stuttgart (Platz 24), mit ungefähr einem Petaflops der Stolz des Technologielandes Baden-Württemberg, in drei Jahren von der Liste verschwunden sein. Erstaunlich, dass sich unter den ersten zehn Listenplätzen überhaupt ein (fast) rein europäisches System behauptet! Die »Curie thin nodes« (Platz 9) stammen von der französischen Firma Bull.

Der zurzeit schnellste deutsche Rechner SuperMUC (Platz 4 auf der internationalen Rangliste) besteht wie jeder Supercomputer aus unspektakulären grauen Kästen, die eine ganze Halle füllen. Nur die Verbindungsleitungen zwischen den Teilsystemen verlaufen nicht im Boden, sondern in den auffälligen gelben Rinnen.





PETER GRÄMBITZER, MIT FRIEDRICH VON HANS GÜNTHER KRUSE

Im halblogarithmischen Diagramm erscheint der exponentielle Anstieg der Rechnerleistung mit der Zeit als Gerade – mit geringen Abweichungen. Nur auf Platz 1 der Liste TOP500 ( $N=1$ ) gibt es gelegentlich merkliche Sprünge, so 2002, als der Earth Simulator

seinen Vorgänger um das Fünffache überbot. Bei der Leistung des Letztplatzierten ( $N=500$ ) und der Summe über alle Listenmitglieder gehen solche Ausreißer in der statistischen Mittelung unter. Unten zum Vergleich die Leistung eines Notebook-Computers.

Supercomputer sind selbst für hoch entwickelte Volkswirtschaften kein wirklich preiswertes Mittel, um den Nationalstolz zu befriedigen. Immerhin kostet das einzelne Gerät um die 100 Millionen Dollar, und richtig Freude daran hat man nur für ungefähr zwei Jahre – dann ist das Nachfolgemodell angesagt. Gleichwohl geht allem Anschein nach das Wettrennen zwischen den USA, China, Japan und Europa weiter, wie deren Entwicklungsprogramme eindrucksvoll zeigen. Auf der aktuellen Konferenz wurden sie in sehr unterschiedlicher Weise präsentiert, aber alle haben im Prinzip das gleiche Ziel: bis 2020 Maschinen mit der 100-fachen Leistung des heutigen Spitzenreiters zur Verfügung zu stellen. Das wäre dann ein Exaflops oder auch 1000 Petaflops ( $10^{18}$  Flops).

### Platz 1: Ein weiterentwickelter Roadrunner

Dieses Datum ergibt sich auch, wenn man die bisherige Entwicklung (Grafik oben) in die Zukunft extrapoliert. In dieser Beziehung ist die Computertechnik wahrhaft einzigartig: Sie erreicht ungefähr alle elf Jahre eine Leistungssteigerung um den Faktor 1000 und nötigt damit ihre Anwender, ein neues, im Übrigen ungebräuchliches griechisches Präfix zu lernen – und das seit immerhin 40 Jahren. Dieses »mooresche Gesetz« bleibt weiterhin unangefochten gültig, obgleich die Miniaturisierung der Schaltkreise, bislang die wesentliche Triebkraft des Fortschritts, an physikalische Grenzen stößt (Spektrum der Wissenschaft 2/2011, S. 90).

Wie haben die USA diesmal ihren Spitzenplatz zurückerobert? Eine erste vorläufige Antwort lautet: mit Masse. In ge-

wissen Grenzen ist das möglich. Wenn man doppelt so viele Rechenknoten zu einem Cluster zusammenschaltet, könnte der theoretisch fast doppelt so viele Berechnungen pro Sekunde erledigen – sofern der erhöhte Datenverkehr zwischen den Einzelrechnern ohne größeren Verzug abläuft und es gelingt, alle Prozessoren so intensiv auszulasten wie zuvor.

Es ist in der Tat bemerkenswert, dass IBM seinen ersten Platz nicht mit einem grundsätzlich neuen Konzept erzielt hat, sondern mit derselben Architektur namens »BlueGene«, mit der schon vor vier Jahren der »Roadrunner« die Petaflops-Marke knackte. Allerdings haben die Erbauer des Systems »Sequoia« die ungefähr 98 000 Rechenknoten mit je 16 Prozessorkernen nicht einfach genauso zusammengestöpselt wie das Vorgängermodell. Fast 1,6 Millionen Prozessoren gleichzeitig zu beschäftigen, erfordert erhebliche Anstrengungen in der Programmierung. Dass die Überschreitung der Millionenschwelle gelungen ist, wird für die nächsten zwei Jahre Maßstäbe setzen – wenn bis dahin nicht das Prinzip der Cluster-Architektur (Kasten S. 96) ohnehin einem überlegenen weichen muss.

Darüber hinaus hat IBM viel Mühe in die Verbesserung der Compiler gesteckt, jener Programme, die das vom Anwender geschriebene Programm in Einzelinstruktionen zerlegen. Dabei wird jeder Elementarbefehl – etwa eine Multiplikation zweier Zahlen – seinerseits in Teilschritte zerlegt, die gestaffelt ausgeführt werden: Während ein Teil des Prozessors die Spätphase von Befehl 1 erledigt, kümmert sich ein anderer um den ersten Schritt von Befehl 2. Diese Fließband-

technik spart grundsätzlich Zeit; wenn aber das Ergebnis von Befehl 1 darüber entscheidet, welcher von mehreren möglichen Befehlen als Nächstes ausgeführt werden soll, müsste eigentlich das Fließband angehalten werden, und der Zeitgewinn wäre dahin. Stattdessen lässt man den Prozessor eine der beiden Alternativen (möglichst die wahrscheinlichere) oder sogar beide durchrechnen und verwirft hinterher diejenige, die sich als die falsche herausgestellt hat. Diese »spekulative Ausführung«, die auf den ersten Blick wie unnötige Doppelarbeit aussieht, bringt – geschickt programmiert – einen großen Zeitgewinn, weil das Fließband nicht angehalten werden muss.

Insgesamt kommt »Sequoia« damit auf eine Maximalleistung von 16,3 Petaflops – immerhin mehr als das Zehnfache von »Roadrunner«. Für den Linpack-Test (Kasten S. 95), die Grundlage für den Eintrag in die Liste TOP500, löste die Maschine in 23 Stunden ein lineares Gleichungssystem mit ungefähr zwölf Millionen Unbekannten. Dabei waren ihre Prozessoren durchschnittlich 81 Prozent der Zeit beschäftigt, ein Effizienzwert im Mittelfeld.

Für die Zukunft will IBM die Leistung seiner Maschine einerseits auf herkömmliche Weise steigern: durch weitere Verkleinerung der Bauteile. Dadurch passen mehr Prozessorkerne auf einen Chip, und die Signallaufzeiten verkürzen sich. Während in »Sequoia« die Referenzlänge für einzelne Ele-

mente eines Mikrochips 45 Nanometer beträgt, arbeitet man im Labor an der Größenordnung 10 Nanometer. Dann allerdings machen sich die physikalischen Grenzen bemerkbar.

### Vom Handy lernen

Andererseits setzt man hier wie in allen, weiter unten skizzierten Projekten zur Leistungssteigerung auf das Prinzip »Co-Design«. Gemeint ist die verzahnte Entwicklung von Hard- und Software – in der Tat eine Neuigkeit, denn bisher pflegten die Hardwaredesigner eine neue Architektur zu entwerfen, und die Softwarespezialisten mussten sich beeilen, dem Gerät Programme auf den Leib zu schreiben, bevor das Nachfolgemodell auf den Markt kam. Die verschiedenen Entwicklungsprogramme wollen den guten Vorsatz »Co-Design« auf verschiedene Weisen realisieren:

➤ In Europa baut das von der EU geförderte Projekt »Mont-Blanc« auf einer Hardwaretechnik aus der Mobiltelefonie auf: ARM (advanced RISC machine) ist eine Weiterentwicklung der Architektur RISC (reduced instruction set computer) mit ihrem kleinen Sortiment aus einfachen Elementarbefehlen (Spektrum der Wissenschaft 5/2000, S. 26). Sie nutzt konsequent die Vorteile der RISC-Architektur, um aus der notorisch knappen Energie des Handyakkus ein Maximum an Rechenleistung herauszuholen. Dasselbe Problem in weit größerem Maßstab hat der Exaflops-Rechner der Zukunft.

ANZEIGE

## Zum Nachdenken, Weiterdenken und Miteinanderreden

### chrismon plus

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

### Jetzt 3 Ausgaben gratis testen

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

### \* Bestellen Sie jetzt:

**Internet:** [www.chrismon.de/testen](http://www.chrismon.de/testen)

**E-Mail:** [leserservice@chrismon.de](mailto:leserservice@chrismon.de)

**Telefon:** 0800 / 758 75 37 (gebührenfrei)

**Fax:** 069 / 580 98-226

The advertisement features a central image of a magazine cover for 'chrismon plus'. The cover has a woman's face as the main focus. Text on the cover includes 'chrismon plus', 'Das evangelische Magazin 08.2012', and 'www.chrismon.de'. Below the woman's face, it says 'Du kannst mehr, als du denkst' and 'Der Satz ihrer Lehrerin hat Ayla Tepe gerettet. Jetzt macht sie damit ihre eigenen Schüler stark. Seite 14-25'. To the right of the magazine is a red banner that reads 'Unser Dankeschön für Sie: Mini-Billardtisch'. Below the banner is a small, wooden mini-billiard table with a green felt top and two pool cues resting on it.

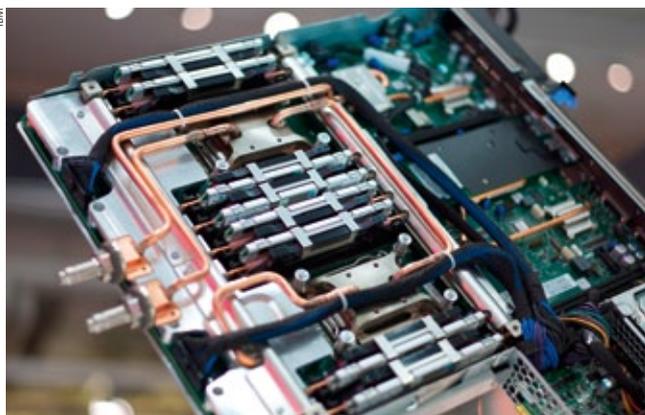
Selbst mit den BlueGene-Rechnern, die heute zwei Gigaflops pro Watt und damit weit mehr als die Konkurrenz abliefern, würde eine Exaflops-Maschine ein mittelgroßes Kernkraftwerk für sich allein beanspruchen. Um auf den angestrebten Verbrauch von 20 Megawatt herunterzukommen, muss sie einen Faktor 30 in der Energieeffizienz zulegen.

► Die High Performance Computing Initiative (HPCI) der japanischen Regierung will Chips der Firma Fujitsu (»Sparc-64VIIIfx« mit bis zu acht Rechenkernen) mit einem neuen Datennetzwerk verbinden, das einen Datendurchsatz von 85 Gigabyte pro Sekunde bewältigt. Vor allem sollen die Prozessoren eines Knotens unabhängig voneinander mit Kollegen in anderen Knoten kommunizieren können. Das ergibt denselben Effizienzgewinn, wie wenn den Mitarbeitern einer Firma zehn externe Telefonleitungen statt einer einzigen für Gespräche mit anderen Firmen zur Verfügung stehen.

► Die chinesische Weiterentwicklung des Projekts Tianhe-1A geht vom Prinzip des homogenen Clusters (Kasten S. 96) ab. Ein neu entwickeltes, leistungsfähiges Netzwerk verbindet ungleiche Partner, nämlich klassische Universalrechnerknoten und spezialisierte GPUs (graphical processing units).

► Das amerikanische Energieministerium (Department of Energy, DoE), dem der Betrieb der nationalen Forschungszentren und damit auch der wichtigsten Supercomputer-Standorte untersteht, ist zu der Überzeugung gekommen, dass die gegenwärtig von der Industrie betriebene Entwicklung nicht zu einem energieeffizienten Exaflops-Computer führen wird. Stattdessen entwickelt es einen Chip neuer Art, der aus drei Schichten bestehen wird: zuoberst die optische Kommunikation mit den Nachbarchips, darunter der Speicher und zuunterst die Prozessoren. Dazu gehört eine komplette Neuentwicklung der Software.

► Ob Europa sich in diesem Umfang an dem Rennen beteiligen soll, ist umstritten. Die Stärken des alten Kontinents liegen eindeutig nicht in der Hardwareherstellung, sondern in der Softwareentwicklung. Einige Experten plädieren dafür, den Kampf um die Spitzenplätze der TOP500 anderen zu überlassen und sich die benötigte Hardware einfach auf dem Weltmarkt zu kaufen.



Computer mit Wasserkühlung: Jedes Bauteil des SuperMUC hat nicht nur Strom- und Daten-, sondern auch Kühlwasseranschluss.

Mit dieser Strategie hat Deutschland es immerhin auf Platz 4 der aktuellen Liste gebracht, und zwar mit dem jüngst in Betrieb genommenen »SuperMUC« des Leibniz-Rechenzentrums der Bayerischen Akademie der Wissenschaften. Das Gerät (Bild S. 90/91) ist jetzt sogar die Nummer 1 in Europa. In der absoluten Leistung bietet er nur ungefähr ein Siebtel des Spitzenreiters Sequoia, glänzt aber mit einer erstaunlich guten Effizienz von 90 Prozent, und das ohne Beschleuniger! Der Rechner, dessen Prozessoren sämtlich von Intel stammen, verdankt seine guten Werte einer hybriden Architektur. Nicht alle Knoten sind gleich; vielmehr besteht die Maschine aus 18 »Inseln«, die jeweils 8192 Knoten des einen Typs (»Sandy-Bridge-EP«) enthalten, sowie einer weiteren Insel aus 8200 Knoten des anderen Typs (»Westmere-EX«). Das sind insgesamt 155 656 Prozessoren. (In der TOP500 sind nur die Knoten des ersten Typs mitgezählt.)

### Supercomputer als Heizkraftwerk

Neu am SuperMUC ist auch die Warmwasserkühlung (Bild links unten). Während das Kühlwasser typischerweise mit 16 Grad Celsius in die Maschine einläuft und mit 20 Grad herauskommt, betragen die entsprechenden Werte bei dem Münchener Gerät 40 und 70 Grad. Das auslaufende Wasser hat damit gerade die richtige Temperatur, um das Gebäude zu heizen; nach getaner Arbeit kann es – bei 40 Grad – wieder in die Computerkühlung eingespeist werden.

Ein Supercomputer in Deutschland, der nicht von IBM geliefert wurde, ist erst auf Platz 24 der Liste zu finden. Der Computer »Hermit« am HLRS (Höchstleistungsrechenzentrum der Universität Stuttgart) ist ein Produkt der Firma Cray und basiert auf dem Interlagos-Chip von AMD mit 16 Prozessorkernen. Interessanterweise wird derzeit beim NCSA (National Center of Supercomputer Applications) der University of Illinois in Urbana-Champaign ein System namens »Blue Waters« mit gleicher Architektur (Cray-XE6), aber deutlich höherer Leistung installiert. Diese kommt nicht nur von der weitaus größeren Anzahl an Rechenknoten, sondern vor allem von den 3000 zusätzlichen GPU-Chips.

Die Nummer 9 der Liste, das französische System »Curie thin nodes«, wurde von dem rein europäischen Unternehmen Bull gebaut. Träger ist GENCI (Grand Equipement National de Calcul Intensif), ein Teil der europäischen Initiative PRACE. Es handelt sich um ein hybrides System, das aus drei unterschiedlichen Knotentypen zusammengesetzt ist, jedoch auf der Basis des gleichen Intel-Chips wie der SuperMUC.

Unter den 500 Systemen finden sich noch weitere sehr interessante Architekturen, auch hinsichtlich der eingesetzten internen Netzwerke. Insgesamt sind das billige Gigabit-Ethernet und das wesentlich teurere InfiniBand bei den aktuellen Installationen ungefähr gleich häufig vertreten.

An und für sich sagt die Netzwerkleistung, ebenso wie die Effizienz, kaum weniger über die Qualität eines Supercomputers aus als die schiere Rechenleistung; aber alle diese Merkmale zusammen lassen sich eben in einer linearen Liste wie der TOP500 nicht augenfällig abbilden.

## Die schnellsten Rechner der Welt

Die Tabelle zeigt die ersten 20 Einträge der Liste TOP500 vom Juni 2012. Die Leistung eines Rechners wird an der Zeit gemessen, die er benötigt, um ein lineares Gleichungssystem mit einem vorgeschriebenen Algorithmus namens »Linpack« zu lösen.

Maßeinheit ist mittlerweile das Gigaflops (eigentlich Gigaflop/s), das sind eine Milliarde Gleitkommaoperationen pro Sekunde (floating-point operations per second, flops). 1000 Gigaflops sind ein Teraflops; unter 60 Teraflops kommt eine Maschi-

ne nicht mehr in die TOP500. Die Spitzenreiter leisten mehrere Petaflops, das sind 1000 Teraflops oder  $10^{15}$  (eine Billion) Flops.

Auch bei einer sehr strukturierten Aufgabe wie Linpack gelingt es nicht, alle Prozessoren permanent zu beschäftigen. Die Leistung bei der Lösung dieses (und jedes anderen) Problems liegt daher regelmäßig unter dem theoretischen Maximum. Das Verhältnis der beiden Größen ist die »Effizienz«, also der Anteil der Kapazität, der tatsächlich genutzt wird.

	Name	Hersteller	Betreiber	Land	Baujahr	Prozessoren	Ko- prozessoren	Leistung bei Linpack in Gigaflops	theoretische Maximal- leistung in Gigaflops	Effizienz in Prozent	Strom- verbrauch in Kilowatt	Energie- effizienz in Mflops/Watt
1	Sequoia	IBM	Lawrence Livermore National Laboratory	USA	2011	1572864	0	16324751	20132659,2	81,09	7890	2069,04
2	K computer	Fujitsu	RIKEN AICS	Japan	2011	705024	0	10510000	11280384	93,17	12659,89	830,18
3	Mira	IBM	Argonne National Laboratory	USA	2012	786432	0	8162376	10066330	81,09	3945	2069,04
4	SuperMUC	IBM	Leibniz-Rechenzentrum	Deutschland	2012	147456	0	2897000	3185050	90,96	3422,67	846,42
5	Tianhe-1A	NUDT	NSC Tianjin	China	2010	186368	100352	2566000	4701000	54,58	4040	635,15
6	Jaguar	Cray Inc.	Oak Ridge National Laboratory	USA	2009	298592	0	1941000	2627609	73,87	5142	377,48
7	Fermi	IBM	CINECA, Bologna	Italien	2012	163840	0	1725492	2097152	82,28	821,88	2099,45
8	JuQUEEN	IBM	Forschungszentrum Jülich (FZJ)	Deutschland	2012	131072	0	1380393	1677722	82,28	657,5	2099,46
9	Curie thin nodes	Bull SA	GENCI, Bruyères-le-Châtel	Frankreich	2012	77184	0	1359000	1667174	81,52	2251	603,73
10	Nebulae	Dawning	NSC Shenzhen	China	2010	120640	64960	1271000	2984300	42,59	2580	492,64
11	Pleiades	SGI	NASA/Ames Research Center	USA	2011	125980	0	1243000	1731836	71,77	3986,96	311,77
12	Helios	Bull SA	IFERC, Rokkasho	Japan	2011	70560	0	1237000	1524096	81,16	2200	562,27
13	Blue Joule	IBM	STFC, Warrington	Großbritannien	2012	114688	0	1207844	1468006	82,28	575,31	2099,47
14	TSUBAME 2.0	NEC/HP	GSIC, Tokio	Japan	2010	73278	56994	1192000	2287630	52,11	1398,61	852,27
15	Cielo	Cray Inc.	Los Alamos National Laboratory	USA	2011	142272	0	1110000	1365811,2	81,27	3980	278,89
16	Hopper	Cray Inc.	NERSC, Berkeley	USA	2010	153408	0	1054000	1288627,2	81,79	2910	362,2
17	Tera-100	Bull SA	Commissariat à l'Énergie Atomique	Frankreich	2010	138368	0	1050000	1254550	83,7	4590	228,76
18	Oakleaf-FX	Fujitsu	Universität Tokio	Japan	2012	76800	0	1043000	1135411	91,86	1176,8	886,3
19	Roadrunner	IBM	Los Alamos National Laboratory	USA	2009	122400	110160	1042000	1375776	75,74	2345	444,35
20	DiRAC	IBM	University of Edinburgh	Großbritannien	2012	98304	0	1035295	1258291	82,28	493,12	2099,48

Abkürzungen: RIKEN AICS = RIKEN Advanced Institute for Computational Science, Kobe; NSC = National Supercomputing Center; CINECA ist ein Forschungsvereinigung italienischer Universitäten; GENCI = Grand Equipement National de Calcul Intensif; IFERC = International Fusion Energy Research Center; STFC = Science and Technology Facility Council; GSIC = Global Scientific Information and Computing Center; NERSC = National Energy Research Scientific Computing Center. Nähere Einzelheiten unter: [www.top500.org/list/2012/06/100](http://www.top500.org/list/2012/06/100)

Auch dem Energieverbrauch eines Systems kommt zunehmende Bedeutung zu, und zwar nicht nur wegen der stark steigenden Kosten. Mittlerweile dient ein erheblicher Teil der Energie nicht zum Rechnen, sondern zum Abführen der dabei erzeugten Wärme. Diesen Teil des Aufwands könnte man einsparen, indem man entweder die Maschine in sehr kalten Gegenden aufstellt und die Luft das Kühlen erledigen lässt oder, wie beim SuperMUC, die Überschusswärme an einen weiteren Verbraucher verkauft. Besser als solche Lösungen wäre es, man änderte die Architektur so ab, dass man mit weniger Hardware und damit mit weniger Energie bei gleicher Leistung auskommt. Diese Strategie scheint aber gegenwärtig nicht die oberste Priorität bei den Entwicklern und Computerwissenschaftlern zu genießen.

### **Genaueres Nachrechnen spart 80 Millionen Dollar**

Kann man denn mit der gigantischen Rechenkapazität, die auf der Supercomputer-Konferenz und in der zugehörigen Liste zur Schau gestellt wird, über den Gewinn an nationalem Prestige hinaus überhaupt etwas anfangen? Allerdings! Die klassischen Anwender sind Wissenschaftler, die ein im Prinzip unendlich vielgestaltiges und komplexes System simulieren wollen. Die können eine höhere Rechenleistung ohne Weiteres nutzen, um ihr Problem etwas genauer zu beschreiben (und werden dabei an keine Grenze stoßen, denn die Realität ist komplizierter als jede Beschreibung):

## **Der Bauplan moderner Supercomputer**

**Die aktuelle Architektur im High-Performance-Computing (HPC)** ist der »homogene Cluster« (Spektrum der Wissenschaft 3/2002, S. 88). Zahlreiche gleichartige »Knoten« rechnen im Wesentlichen autonom und tauschen über ein Hochleistungsnetzwerk Daten in der Größenordnung von mehreren Gigabyte pro Sekunde aus. Ein Knoten besteht seinerseits aus einem oder mehreren »Multi-Core-Chips« sowie möglicherweise spezialisierten »Beschleunigern«, das sind Rechenchips mit eingeschränktem Funktionsumfang, aber höherer Geschwindigkeit. In den meisten Fällen handelt es sich bei den Letzteren um zweckentfremdete Grafikchips (graphical processing units, GPUs). Ein Multi-Core-Chip enthält mehrere Einzelrechner (Prozessoren, auch Prozessorkerne genannt), die sich einen gemeinsamen Speicher teilen.

In aller Regel sind die Knoten eines Clusters nicht nur untereinander baugleich, sie spielen innerhalb des Systems auch die gleiche Rolle. Auf allen läuft dasselbe Programm ab, mit jeweils verschiedenen Daten. Es gibt keinen »Chef«, der den anderen ihre Arbeit zuweist. Nur für die Kommunikation mit der Außenwelt ist ein spezielles Mitglied des Clusters allein zuständig.

Neuere Architekturen, die vom Prinzip des homogenen Clusters abweichen, heißen »hybrid«.

➤ Astrophysiker vollziehen die Entwicklung des Universums vom Urknall bis heute mit vielleicht dreimal so vielen simulierten Sternen nach wie bisher (Spektrum der Wissenschaft 11/2011, S. 84).

➤ Für medizinische Zwecke ist es sinnvoll, die Bewegung des menschlichen Herzens räumlich und zeitlich so fein aufzulösen, dass selbst die Nummer 2 der Liste am japanischen RIKEN-Institut für einen halben Herzschlagzyklus zwei Tage Rechenzeit benötigt.

➤ Einen ganzen Tag arbeitete das französische System Curie thin nodes an der Modellierung eines chemischen Prozesses, der bei neurodegenerativen Erkrankungen, insbesondere der Alzheimerdemenz, eine Rolle spielt.

➤ Klimaforscher rechnen das atmosphärische Geschehen für ein dichteres Netz von Punkten auf der Erdoberfläche durch, mit dem Effekt, dass sie das Klima der Zukunft auch für kleinere Regionen vorhersagen können. Dafür sind die Rückversicherungsgesellschaften bereit, viel Geld zu zahlen. Denn sie müssen künftige Schadenswahrscheinlichkeiten für eng begrenzte Regionen abschätzen können, und die Erfahrungswerte der letzten Jahrzehnte werden wegen des Klimawandels zunehmend unbrauchbar.

➤ Der spektakulärste Beleg im Rahmen der Konferenz für den Nutzen des Supercomputing kam aus der Erdölexploration. Durch eine Simulation hatte man die geologische Struktur im Untergrund einer bestimmten Region rekonstruiert und für viel versprechend befunden. Daraufhin wären Probebohrungen fällig gewesen, die einige Zeit gedauert und ungefähr 80 Millionen Dollar gekostet hätten. Beim Nachrechnen mit deutlich mehr Prozessoren und größerer Genauigkeit löste sich die vermeintlich ölhaltige geologische Struktur in nichts auf; es hatte sich um ein numerisches Artefakt gehandelt. Dieser Supercomputer hat also mit einer einzigen Anwendung seinen Anschaffungspreis bereits eingespielt, indem er der Firma vergebliche Bohrungen ersparte.

Für Aufgaben dieser Art macht der nicht unumstrittene Linpack-Test (Kasten S. 95), der die Problemgröße in das Belieben des Betreibers stellt, sogar einen gewissen Sinn: Der Anwender kann einfach sein Problem durch ein größeres, aber im Übrigen gleichartiges ersetzen. Dieses wiederum lässt sich in eine entsprechend größere Anzahl einigermaßen unabhängiger Teilprobleme zerlegen (»parallelisieren«), die ebenso viele Prozessoren beschäftigen.

Wenn aber die Software mit der Parallelisierung nicht Schritt hält, kann sie zusätzliche Einzelrechner nicht nutzen – oder nur um den Preis, dass der Aufwand für Kommunikation und Datenzugriffe enorm ansteigt. Dieser Aspekt macht allen Supercomputer-Betreibern enorm zu schaffen. Nicht von ungefähr hat sich daher das Prinzip des Co-Designs in allen Entwicklungsprojekten etabliert.

Die Entwicklung neuer und dem hohen Parallelisierungsgrad der Hardware angepasster Software scheint aber nicht richtig voranzukommen – vielleicht auch, weil die theoretische Informatik noch nicht den richtigen Zugang zu dieser Problematik gefunden hat.

Für einige zunehmend wichtigere Zwecke kommt es gar nicht mehr in erster Linie aufs Rechnen an. Für Data Mining, allgemeiner für Datenanalyse und insbesondere Genomanalyse müssen Zahlen nicht mehr addiert oder multipliziert, sondern nur noch auf Gleichheit überprüft werden. Das ist im Gegensatz zum Rechnen eine sehr einfache Operation, im Aufwand vergleichbar dem Transport und der Sortierung der zu vergleichenden Daten. Und die Datenmengen wachsen gerade in der medizinischen Informatik mit ungeheurem Tempo; man schätzt eine Verdopplung alle zwei Jahre. Supercomputer mit ihren riesigen Arbeitsspeichern und ihrem hohen Parallelitätsgrad sind höchstwahrscheinlich ein geeignetes Werkzeug zu deren Verarbeitung.

In Analogie zu Linpack haben Anwender aus dem Gebiet der Datenanalyse einen neuen Maßstab («Benchmark») geschaffen und führen eine eigene Bestenliste der Supercomputer. Sie heißt »Graph500«, weil diese Probleme in der Sprache der Graphentheorie formuliert werden.

Neue Problemtypen erfordern neue Architekturen. Es ist schwer vorstellbar, dass ein homogener Cluster für graphentheoretische Anwendungen besonders geeignet ist. Darüber hinaus könnte auf lange Sicht die gegenwärtig dominierende reine Rechenmaschine von einem Universal-Supercomputer abgelöst werden, dessen Leistungsmerkmale man sich heute allerdings noch kaum ausmalen kann. ~

## DER AUTOR



**Hans Günther Kruse** ist promovierter Physiker und leitete bis 2010 das Rechenzentrum der Universität Mannheim. Außerdem war er lange Jahre Chefredakteur und Mitherausgeber der Zeitschrift »Praxis der Informationsverarbeitung und Kommunikation« (PIK). Sein Interesse gilt seit einigen Jahren der Leistungsanalyse von Cluster-Computern und Server-Farmen.

## WEBLINKS

[www.isc-events.com/isc12/](http://www.isc-events.com/isc12/)

Internationale Supercomputer-Konferenz, Hamburg 2012

[www.top500.org/](http://www.top500.org/)

Die Liste der 500 leistungsfähigsten Computer der Welt, mit zahlreichen Zusatzinformationen und Weblinks zu jedem der Systeme der Liste

<http://computationalsciencesolutions.com/resources/exascale-computing-reports/international-exascale-software-project-iesp-roadmap/>

Dongarra, J. et al.: The International Exascale Software Project Roadmap. Protokoll mehrerer Tagungen eines internationalen Konsortiums, das sich über die Software-Herausforderungen im Supercomputing bis 2020 verständigt hat.

Diesen Artikel sowie weiterführende Informationen finden Sie im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1159812](http://www.spektrum.de/artikel/1159812)

ANZEIGE



**+30€**  
Gutschrift

Jetzt einfach wechseln:  
[www.naturstrom.de/spektrum](http://www.naturstrom.de/spektrum)

# 100 % ÖKOSTROM JETZT EINFACH WECHSELN!

- 100 % Strom aus Wind- und Wasserkraft
- unabhängig von Kohle- und Atomkonzernen
- Strom überwiegend von dezentralen Erzeugern in Deutschland
- keine RECS-Zertifikate
- Förderung und Bau regenerativer Kraftwerke
- günstiger Preis und faire Konditionen



NATURSTROM AG, Achenbachstraße 43,  
40237 Düsseldorf, Tel. 0211-77900-300,  
E-Mail: [info@naturstrom.de](mailto:info@naturstrom.de), [www.naturstrom.de](http://www.naturstrom.de)



**naturstrom**  
ENERGIE MIT ZUKUNFT

# Neuerscheinungen



## Unser besonderer Tipp:



Anthony Kenny

### GESCHICHTE DER ABENDLÄNDISCHEN PHILOSOPHIE, 4 BÄNDE

Antike – Mittelalter – Neuzeit – Moderne

2012, 1408 S. m. zahlr. SW-Abb., geb., Primus

Bestell-Nr. 3654

Einführungspreis € 99,90 (D), € 102,70 (A)

gültig bis 01.02.2013, danach kostet das Werk € 149,-

Die 4 Bände sind zum Preis von je € 49,90 auch einzeln erhältlich. Sparen Sie mit der günstigen Gesamtausgabe!

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



Stuart Clark

### KOSMISCHE REISE

Von der Erde bis zum Rand des Universums

2012, 240 S. mit 200 Farbabb., geb., Spektrum Akademischer Verlag

Bestell-Nr. 3645

€ 39,95 (D), € 41,10 (A)

Begeben Sie sich auf eine intergalaktische Mission, die Sie durch einen Raum von Hunderten von Trilliarden Kilometern und durch eine Zeitspanne von über 13 Milliarden Jahren führt. Ihr Startpunkt ist unser Heimatplanet Erde. Sie reisen mit Lichtgeschwindigkeit bis an den Rand des Universums und an den Anbeginn der Zeit. Jede Seite eröffnet Ihnen neue atemberaubende Einblicke. Sie durchfliegen Ansammlungen von Staub und Gas, die den Sternen als Brutstätten dienen, entdecken spektakuläre Nebel, beobachten sterbende Sterne und explodierende Supernovae und segeln an ausgedehnten Zonen Dunkler Materie entlang. Mehr als 300 spektakuläre astronomische Aufnahmen und informative Texte vermitteln nachhaltige Eindrücke von den 101 Stationen dieser großartigen kosmischen Reise.



Jörg Resag

### ZEITPFAD

Die Geschichte unseres Universums und unseres Planeten

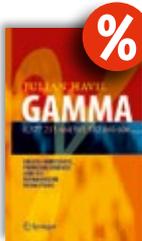
2012, 400 S. m. 177 Farbabb., geb., Spektrum Akademischer Verlag

Bestell-Nr. 3644

€ 29,95 (D), € 30,80 (A)

Das durchgängig vierfarbige und reich illustrierte Buch des Physikers Jörg Resag stellt das moderne Gesamtbild der Naturgeschichte umfassend dar und lädt den Leser zu einer Zeitreise ein, die beim Urknall beginnt und bis in die Zukunft des Universums führt. Dazwischen geht der Autor auch ausführlich auf erdgeschichtliche Epochen und die biologische Evolution ein. Diese Reise durch die Tiefen der Zeit verändert die Sicht auf unsere Welt und macht deutlich, wie wertvoll und zugleich wie kurz und zerbrechlich unsere eigene Existenz in diesem wundervollen Universum ist.

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



Julian Havil

### GAMMA

Eulers Konstante, Primzahlstränge und die Riemannsche Vermutung

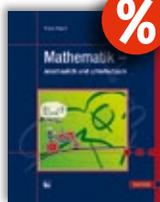
2007, XVI, 307 S. m. graph. Darst., geb., Springer

Bestell-Nr. 2359

früher € 32,95, jetzt nur € 9,95 (D), € 10,30 (A)

Ein einzigartiges und allgemein verständliches Buch über die Euler-Mascheroni-Konstante

Jeder kennt die Kreiszahl  $\pi = 3,14159\dots$ , viele kennen  $e = 2,71828\dots$  und einige die imaginäre Einheit  $i$ . Und dann? Die »viertwichtigste« Zahl ist  $0,5772156\dots$ , die meist mit dem griechischen Buchstaben Gamma abgekürzt wird.



Frank Paech

MATHEMATIK – ANSCHAU-  
LICH UND UNTERHALTSAM

1. Auflage 2010, 596 S., zahlr. farb. Abb., geb., Hanser

Bestell-Nr. 3700 früher € 29,90,

jetzt nur € 12,95 (D), € 13,30 (A)

Dieses fachübergreifende populärwissenschaftliche Buch ist ideal zur Vorbereitung auf ein naturwissenschaftliches oder technisches Studium und unterstützt die Studierenden auch noch während der Anfangssemester. Darüber hinaus eignet es sich hervorragend als gut lesbares Fortbildungsmedium für alle, die ihre Mathematikkenntnisse in Richtung Naturwissenschaft und Technik ausbauen wollen oder müssen.



Christian Hesse

### CHRISTIAN HESSES MATHE- MATISCHES SAMMELURIMUM

1 : 0 = ∞

2012, 256 S. m. 40 z. Tl. farb., kart., Beck

Bestell-Nr. 3721

€ 14,- (D), € 14,40 (A)

Unentbehrlich x Unermesslich x Unverbesserlich = Hesses mathematisches Sammelurium. Und zwar für alle: vom manischen Mathematiker bis zum Zahlenangsthäsen, für alle Freunde und Feinde dieser extremsten und coolsten aller Wissenschaften. Das Buch ist eine flammende Hommage an die Mathematik nach gut dreißigjähriger Beschäftigung mit ihr aus nächster Nähe.



Manfred Spitzer

### DIGITALE DEMENZ

Wie wir uns und unsere Kinder um den Verstand bringen

2012, 368 S. m. 40 Duoton-Abb., geb., Droemer/Knaur

Bestell-Nr. 3694

€ 19,99 (D), € 20,60 (A)

Digitale Medien nehmen uns geistige Arbeit ab. Was wir früher einfach mit dem Kopf gemacht haben, wird heute von Computern, Smartphones, Organizern und Navis erledigt. Das birgt immense Gefahren, so der renommierte Gehirnforscher Manfred Spitzer.



Stefan Palkoska

### GESUND & FIT FÜR INGENIEURE, MIT DVD

Alles Wichtige über Bewegung, Ernährung, Motivation, Veränderung, Leistungsfähigkeit, Nachhaltigkeit, Glück

2012, 112 Seiten, mit zahlr. farb. Abb., Palkoska

Bestell-Nr. 3642 € 29,90 (D), € 29,90 (A)

Einfach verständlich und in der Sprache der Ingenieure beschreibt der Autor den nachhaltigen Weg zu einem gesunden und fitten Aussehen. Die Hausaufgaben in jedem Kapitel sorgen für eine interaktive Nutzung des Buches und unterstützen Sie auf Ihrem Weg der Veränderung. Die beiliegende DVD zeigt Übungen, die zum Aufbau der Bauchmuskulatur ideal geeignet sind.



Josef Honerkamp

### WAS KÖNNEN WIR WISSEN?

Mit Physik bis zur Grenze verlässlicher Erkenntnis

2012, 224 S. 21 SW-Abb., geb., Spektrum Akademischer Verlag

Bestell-Nr. 3649

€ 24,95 (D), € 25,70 (A)

Was wissen Physiker über die Welt und wie sicher wissen sie es? – Den Autoren bewegten Begegnungen und Gespräche aus seinem Alltag dazu, über die faszinierendsten Fragen nachzudenken: Über Zeit, Materie, Quanten, Zufall und die Realität, bis zu kritischem Rationalismus, Emergenz, Vorwissen sowie die Physik aus der Gottesperspektive.

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



Werner Gruber,  
Heinz Oberhummer,  
Martin Puntigam

### GEDANKENLESEN DURCH SCHNECKEN- STREICHELN

**Was wir von Tieren über  
Physik lernen können**

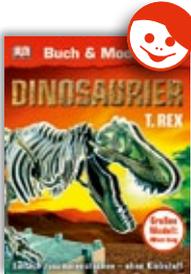
2012, 296 S., geb., Hanser

**Bestell-Nr. 3648**

€ 19,90 (D), € 20,50 (A)

Seit 2007 begeistern sie mit ihrer einzigartigen Kombination aus Wissenschaft und schwarzem Humor: Die Science-Busters.

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



### BUCH & MODELL-SET DINOSAURIER T-REX

**Einfach zusammenstecken  
– ganz ohne Klebstoff**

2012, Box mit Buch (32 S.) u. 81  
Teilen für ein T-Rex-Modell, Dorling  
Kindersley

**Bestell-Nr. 3720**

€ 19,95 (D), € 19,95 (A)

Ganz ohne Klebstoff entsteht aus 81 stabilen Pappteilen ein komplettes Tyrannosaurus-Rex-Skelett, das etwa 30 cm hoch und ganze 80 cm lang ist. Das Buch enthält eine verständliche Schritt-für-Schritt-Anleitung für den Aufbau des Modells, die die einzelnen Abschnitte mit den nötigen Informationen begleitet und dabei zusätzliches Wissen über Aussehen, Verhalten und Lebensraum von Dinosauriern liefert. Ab 7 Jahren.



Alexander Unzicker

### AUF DEM HOLZWEG DURCHS UNIVERSUM

**Warum sich die Physik  
verlaufen hat**

2012, 304 S. m. Abb., geb., Hanser

**Bestell-Nr. 3719**

€ 19,90 (D), € 20,50 (A)

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



Ken Taylor

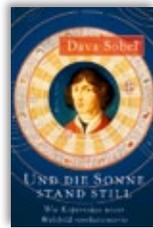
### KOSMISCHE KULTSTÄTTEN DER WELT

**Von Stonehenge bis zu  
den Maya-Tempeln**

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

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

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



Dava Sobel

### UND DIE SONNE STAND STILL

**Wie Kopernikus unser Weltbild  
revolutionierte**

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

**Bestell-Nr. 3697**

€ 22,99 (D), € 23,70 (A)

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



Alice Roberts (Hg)

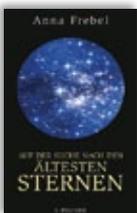
### DIE ANFÄNGE DER MENSCHHEIT

**Vom aufrechten Gang bis zu  
den frühen Hochkulturen**

2012, 256 S. m. über 800 farbige  
Abb. u. Ktn., geb., Dorling Kindersley

**Bestell-Nr. 3718 € 29,95 (D), € 30,80 (A)**

Woher kommen wir? Dieses imposante Werk dokumentiert mit mehr als 800 Abbildungen die Geschichte der menschlichen Evolution. Dabei geht es nicht nur um die biologische, sondern auch um die kulturelle Entwicklung bis zu den frühen Hochkulturen. Beeindruckende Schädelrekonstruktionen von den niederländischen Präparatoren und Künstlern Adrie und Alfons Kennis erwecken unsere Vorfahren zum Leben und halten uns die Schritte der Evolution vor Augen.



Anna Frebel

### AUF DER SUCHE NACH DEN ÄLTESTEN STERNEN

2012, 352 S., m. zahlr. Abb., geb., Fischer

**Bestell-Nr. 3684**

€ 19,99 (D), € 20,60 (A)

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



W. Engländer, H.-H. Bergmann

### DIE GROSSE KOSMOS VOGELSTIMMEN-DVD

**220 Vögel, Filme und Stimmen**

2012, 2 DVDs, Begleitbuch, in Box,  
INFO-Program. gem. § 14 JuSchG., Kosmos

**Bestell-Nr. 1859**

€ 44,99 (D), € 49,99 (A)

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



Bernd Pröschold

### STERNSTUNDEN, DVD-VIDEO

**Landschaften im Rhythmus  
des Kosmos**

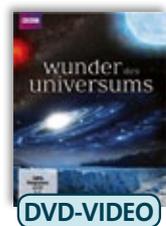
2011, Laufzeit ca. 53 Min.,  
10 Seiten Booklet

**Bestell-Nr. 3630**

€ 15,90 (D), € 19,90 (A)

Siebzehn Zeiträfferaufnahmen präsentieren den Sternenhimmel über aufregenden Orten unserer Erde! Das Sternennetz der Milchstraße, der Tanz der Polarlichter, das Wechselspiel von Tag und Nacht – das sind die Leitmotive dieser DVD. Die bis zu 24-stündigen Zeiträffer-Aufnahmen werden von Musik begleitet. Drehorte: Norwegen, Dänemark, Deutschland, Österreich, Schweiz, Frankreich, Kroatien, Kanar. Inseln, Chile. **Lieferbar auch als Blu-ray unter:**  
[www.science-shop.de/artikel/1151887](http://www.science-shop.de/artikel/1151887)

## Portofreie Lieferung nach Deutschland und Österreich



### WUNDER DES UNIVERSUMS BBC

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

**Bestell-Nr. 3656**

€ 14,99 (D), € 14,99 (A)

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

**Besuchen Sie uns im Internet unter:  
[www.science-shop.de](http://www.science-shop.de)**

Bequem  
bestellen:

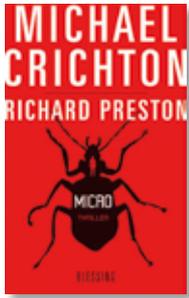
→ direkt bei  
[www.science-shop.de](http://www.science-shop.de)

→ 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



Michael Crichton und Richard Preston

**Micro**

Aus dem Englischen von Michael Beyer.

Karl Blessing, München 2012. 544 S., € 22,95

THRILLER

## Lehrreiches Gemetzel

Dieser Horrormoman transportiert durchaus interessante Wissenschaft. Man muss halt in der Lage sein, einige sehr schwache Stellen und die dünne Logik auszublenzen.

Wenn ein renommierter Thrillerautor ein Manuskript eines unglaublich erfolgreichen Thrillerautors vollendet, weckt das hohe Erwartungen. Der 2008 verstorbene Michael Crichton versuchte sich mehrfach an der Gratwanderung zwischen Science-fiction und lächerlichem Thrillerstoff, am besten glückte sie ihm in »Jurassic Park«. Die Verfilmung war ein Kassenschlager und verhalf nebenbei gleich mehreren wissenschaftlichen Themen zu hoher Aufmerksamkeit. Der Zweitautor Richard Preston hat sich mit wissenschaftlich angehauchten Gruselwerken wie »The Hot Zone« und »Panic in Level 4« einen Namen gemacht. Hinter dem Niveau dieser Werke bleibt »Micro« allerdings deutlich zurück.

Zum Inhalt: Kennen Sie den Film »Liebling, ich habe die Kinder geschrumpft«? Dort bringt ein klischeehaft verwirrter Wissenschaftler seine Kinder auf Ameisengröße, und die erleben daraufhin im eigenen Garten eine Safari zwischen den Monstern des Rasens. So ähnlich ist »Micro«, nur ohne Disney-Faktor, dafür mit Gemetzel nach Art von »Nightmare on Elm Street«.

Eine Gruppe ambitionierter Biologiestudenten – dazu ein Linguist – reist auf Einladung eines zwielichtigen Geschäftsmanns nach Hawaii, um dort mit der neuesten Technologie die Botanik nach Wirkstoffen für Me-

dikamente zu durchsuchen. Als der nach ein paar weiteren Seiten schon mehr als nur zwielichtige Geschäftsmann die Studenten im Forschungszentrum herumführt, wird klar, was diese neueste Technologie ist: eine Apparatur, die vom Flugzeug bis zum Piloten alles klein schrumpft, ohne dessen Funktion zu zerstören. Na ja, Leser können durchaus eine krude Idee verkraften, wenn daraus Spannung erwächst.

Das passiert gelegentlich, auch wenn dafür die Handlung noch den einen oder anderen Haken schlagen muss. Getötete tauchen wieder auf, Polizisten spielen sinnlose Nebenrollen, und die Gründe für Ortswechsel werden an den Haaren herbeigezogen. Sehr vorhersehbar werden die Studenten gegen ihren Willen geschrumpft. Irgendwann landen sie dort, wo sie eigentlich die Proben für ihre Forschungsarbeit hätten sammeln sollen: im Wald auf Hawaii. Sowohl an Zahl als auch in der Größe deutlich reduziert, müssen sie in erster Linie ums Überleben kämpfen – bei einer Körpergröße von 1,2 Zentimetern ist das Leben an den Hängen eines Vulkans in Hawaii eben nicht einfach.

Ameisen, Wespen, Hundertfüßer, Spinnen und später auch noch Fledermäuse stehen bereit, aufkommende Gruppendynamik auf drastische Weise zu beeinflussen. Aber die Helden sind Biologen und Toxikologen, Insek-

tenkenner und Spinnenspezialisten. Das gibt den Handelnden Chancen und dem Leser die Gelegenheit, etwas über Gifttiere, die Wirkung ihrer tödlichen Ausscheidungen, die Pflanzenwelt und andere Besonderheiten Hawaiis zu lernen. Das ist nett, informativ und auch dringend notwendig, denn ohne die wissenschaftskommunikativen Einsprengsel würde das Buch nur aus weitgehend sinnfreiem Gemetzel bestehen.

Die grauisigen Szenen sind mit merkbarer Hingabe oder zumindest mit routiniertem Sadismus gestaltet; das erste blutige Highlight verspricht sogar Spannung und vermittelt dem Leser das masochistische Vergnügen des Ausgeliefertseins. Der spätere Kampf der Minimenschen im Dschungel Hawaiis ist allerdings eher eine Blutorgie: Ameisen zerlegen noch zuckende Körper, zwei Vögel teilen sich eine geschrumpfte Studentin wie einen Wurm, und ein Protagonist hat mit den Larven einer Schlupfwespe zu kämpfen, die sich in seinem Arm entwickeln. So weit, so widerlich.

»Micro« ist eine Berg- und Talfahrt; und damit ist weniger die Spannung gemeint als vielmehr das schwankende Niveau des Textes. Auf gute Szenen und Dialoge folgen unvermittelt platte Charaktere und endlos durchgekaute Beziehungsdramen. Die Grundidee mit geschrumpften Menschen ist weder neu noch eine aufregende, durchdachte Vision, aber für deftige Schockmomente natürlich tauglich.

Dennoch ist das posthume Erscheinen nicht das Interessanteste an diesem Roman. »Micro« ist lehrreich und schmückt sich am Ende mit einer Literaturliste, die vom ethnobotanischen Lehrbuch bis zum Handbuch der klinischen Toxikologie von Tiergiften reicht. Für den Leser ist es genau dann ein Vergnügen, wenn es ihm gelingt, die richtigen Teile seines Gehirns abzuschalten.

**Jörg Wipplinger**

Der Rezensent hat Zoologie studiert; er ist Journalist und Videoblogger (<http://diewahrheit.at>) in Wien.



Egon Balas

### **Der Wille zur Freiheit**

*Eine gefährliche Reise durch Faschismus und Kommunismus*

Aus dem Englischen von Manfred Stern.

Springer, Berlin 2012. 438 S., € 49,95

WISSENSCHAFTSGESCHICHTE

## Rechts oder links?

Im erbitterten Kampf der politischen Systeme ist Egon Balas mehrmals nur mit knapper Not dem Verderben entronnen. Seine mathematische Karriere kam erst später.

Die wissenschaftliche Welt kennt den mittlerweile 90-jährigen Egon Balas als den großen alten Mann der ganzzahligen Optimierung. Das ist die Suche nach der besten Lösung für ein Problem, dessen Variable nur ganzzahlige Werte annehmen können, zum Beispiel: Ist es besser, für diesen Produktionsprozess vier oder fünf gleiche Maschinen einzusetzen? Oder, etwas abstrakter: Soll der viel zitierte Handlungsreisende auf seiner Tour diese spezielle Straße benutzen (dann steht an der entsprechenden Stelle im Gleichungssystem eine Eins) oder nicht (eine Null)? Einer von Balas' ersten Doktoranden ist Manfred Padberg, der den Lesern dieser Zeitschrift – gemeinsam mit Martin Grötschel – kombinatorische und insbesondere ganzzahlige Optimierung nahegebracht hat (Spektrum der Wissenschaft 4/1999, S. 76).

Ganz im Gegensatz zu dem Klischee, nach dem die Mathematiker ihre größten Leistungen in jungen Jahren zu erbringen pflegen, hat Balas erst mit 37 Jahren seine ersten Gehversuche in diesem Fach unternommen. Die Zeit davor war für ihn ereignisreicher als für einen Durchschnittsmenschen das ganze Leben, weswegen er sie auf Drängen seiner Freunde im vorliegenden Buch aufgeschrieben hat.

Egon Blatt wird 1922 in eine jüdisch-ungarische Familie in Klausenburg (Siebenbürgen) geboren, das nach dem Ersten Weltkrieg Teil Rumäniens wurde. Aus seiner Kindheit preist er frühe Erfolge im Schachspiel und im Tisch-

tennis sowie vor allem das reichhaltige Kulturleben seiner Heimatstadt, die von einem bunten Völkergemisch bewohnt wird. Gegen Ende seiner Schulzeit tritt er einem Diskussionszirkel bei, der sich auf gesellschaftliche Fragen konzentriert – und wird Kommunist aus Überzeugung.

Inzwischen haben die Nazis die Vorkherrschaft übernommen (und Siebenbürgen an Ungarn zurückübertragen), ohne in Ungarn oder Rumänien auf größeren Widerstand zu stoßen. In dieser Situation ist es für den jungen Kommunisten nur plausibel, in den Untergrund zu gehen.



Kleines Detail am Rande: Seine neuen Freunde empfehlen ihm nachdrücklich, seinen Namen – der wegen des deutschen Klangs leicht auf einen Juden schließen lässt – zu ändern; denn auch unter den Kommunisten gibt es einen mehr oder weniger latenten Antisemitismus. So wird aus Egon Blatt Egon Balász.

In der Folgezeit muss er ohnehin aus konspirativen Gründen häufig seinen Namen wechseln, aber das hilft nicht lange: Im August 1944 wird er von der »defensiven Abteilung« (DEF) des ungarischen militärischen Generalstabs für Spionageabwehr verhaftet und wochenlang gefoltert; doch im Gegensatz zu vielen seiner Parteifreunde verrät er keinen seiner Kontakte. Es gelingt ihm, unter den abenteuerlichsten Umständen und Verwendung weiterer falscher Namen zu fliehen und sich schließlich in die Hände der vorrückenden Roten Armee zu begeben.

Inzwischen gehört seine Heimatregion wieder zu Rumänien. Unter der neuen kommunistischen Regierung avanciert der junge Held des Untergrunds, der sich auch noch große Kenntnisse der marxistischen Wirtschaftstheorie angeeignet hat, rasch zu einem Angestellten der rumänischen



Im Jahr 1946 lernt der 24-jährige Autor die 17-jährige Edith Lövi kennen – eine der wenigen Überlebenden von Auschwitz – und verliebt sich auf der Stelle in sie. Egon und Edith sind bis heute verheiratet und haben zwei Töchter.



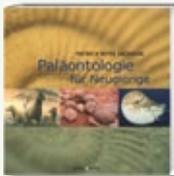
Ewald Weber

**Das kleine Buch der botanischen Wunder**

C.H.Beck, München 2012. 171 S., € 12,95

Pflanzen sind langweilig? Falsch! Bereits in den ersten paar Absätzen lässt der Potsdamer Botaniker Ewald Weber die Faszination der allgegenwärtigen Flora aufblitzen. Hier berichtet zweifellos jemand über seine Passion, und das so pointiert und plastisch, dass man nicht nur über die unglaubliche Größe des Küstenmammutbaums staunt, sondern auch die Begründung, warum er nicht höher als etwa 120 Meter wird, spannend findet. Im Vergleich zu der eingängigen und bildreichen Sprache wirken die wenigen blassen Bleistiftzeichnungen eher fade; dabei hätten sich eindrucksvolle Farbfotos bei dem Thema geradezu angeboten. Eine Geschichte voller Überraschungen von der unglaublichen Diversität, dem hemmungslosen Wachstum, verrückten Verbreitungsstrategien und dem knallharten Überlebenskampf im Pflanzenreich.

ARNE BAUDACH



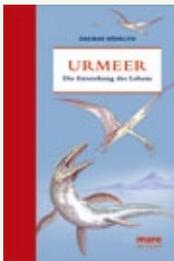
Patrick Wyse Jackson

**Paläontologie für Neugierige. Was Sie schon immer über Fossilien, Erdgeschichte und Evolution wissen wollten**

Aus dem Englischen von Sven N. Nielsen. Primus, Darmstadt 2012. 96 S., € 19,90

Patrick Wyse Jackson, Geologiedozent und Kurator am Geologischen Museum des Trinity College in Dublin, hat das Kunststück fertig gebracht, auf weniger als 100 Seiten einen allgemein verständlichen und inhaltsreichen Überblick über die Paläontologie zu geben. Dem Hobbypaläontologen erklärt er, was der beachten sollte, wenn er sich in den Steinbruch begibt. Damit überhaupt ein Fossil entsteht, muss der abgestorbene Organismus hinreichend rasch in anoxische Bereiche absinken und/oder unter hohen Druck geraten. Das ist nur an wenigen Stellen geschehen; Jackson erwähnt explizit prominente Lagerstätten wie Burgess Shale, den Solnhofener Plattenkalk und die Grube Messel. Der zweite Teil des Buchs ist einzelnen Gruppen von Fossilien gewidmet. Eine ansprechende Bebilderung und ein Glossar runden das Werk ab. Letzteres ist auch nötig, denn für ein populärwissenschaftliches Buch verwendet Jackson sehr viele Fachbegriffe.

MAREN EMMERICH



Dagmar Röhrlich

**Urmeer. Die Entstehung des Lebens**

mare, Hamburg 2012. 400 S., € 28,-

Kein Künstler könnte genug Fantasie aufbringen, um sich die bizarren Lebewesen auszudenken, die einst unseren Planeten bevölkerten – darunter haushohe »Schultüten« mit Augen und Fangarmen, menschengroße »Tausendfüßer« mit Flossen statt Beinen und meterlange Einzeller, die wie Bettdecken gesteppt waren. Die Wissenschaftsjournalistin Dagmar Röhrlich beschreibt die Geschichte des Lebens von seiner Entstehung, die sich mutmaßlich im Wasser vollzog, durch die Erdzeitalter bis zur Gegenwart, komplett mit Flora, Fauna, geologischer Entwicklung und Klima. Heraus kommt ein aufschlussreiches und unterhaltsames Buch, auch wenn das Fehlen einer zentralen Zeittafel bisweilen den Überblick erschwert. Gute Illustrationen und viele Zusatzkästen sorgen für abwechslungsreiche Lektüre.

FRANK SCHUBERT



George L. Legendre

**Pasta und Design. Formen und Formeln zum Genießen**

Aus dem Englischen von Anna Schleitzer. Springer Spektrum, Heidelberg 2012. 208 S., € 24,95

Gekrümmte Flächen durch Formeln zu beschreiben, ist das tägliche Brot des jungen Londoner Stararchitekten George L. Legendre und seiner Firma IJP. Diese Kunst kann man nicht nur auf Brücken oder avantgardistische Gebäude anwenden, sondern auch auf die gemeine Nudel; schließlich hat sie eine nicht nur gekrümmte, sondern häufig (Fusilli, Spirelli, ...) auch periodisch strukturierte Oberfläche. Da finden Sinus und Cosinus reichlich Verwendung. Legendre hat 93 italienische Nudelsorten mit ambitioniertem Foto, Klassifizierung im Stammbaum, Angaben zur bevorzugten Soße und eben Parametrisierung in Formeln und Grafik in einem Buch verewigt. Ein netter Überblick für den Liebhaber italienischer Küche – aber wozu die Formeln? Davon schmeckt die Pasta nicht besser, und nicht einmal der Nudelmacher hat etwas davon: Der stellt seine Ware doch nicht im CAD-Verfahren her. Mathematiker fahren ja auf so etwas ab; aber der Rest der Welt?

CHRISTOPH PÖPPE



Egon Balas 1985

Botschaft in London. Dort hätte er sicher noch Jahre mit der Beobachtung des Klassenfeinds zubringen können, wenn ihn die britische Regierung nicht sehr bald ausgewiesen hätte – nichts Persönliches, nur ein diplomatischer Vergeltungsakt für eine Ausweisungsjahr der Rumänen.

Egon Balas – inzwischen hat er seinen Namen der rumänischen Sprache angepasst – kehrt im März 1949 nach Bukarest zurück. Er arbeitet in verschiedenen Positionen der Regierung, immer noch überzeugter Kommunist und bestrebt, seine Fähigkeiten für den Aufbau der Planwirtschaft einzusetzen, obgleich auffällig viele seiner Parteifreunde von der Bildfläche verschwinden und etliche von ihnen auf einmal die unglaublichsten Verbrechen gestehen und daraufhin hingegerichtet werden. 1952 findet er sich in einem parteiinternen Machtkampf auf der Verliererseite wieder und wird verhaftet, diesmal von der Securitate, dem berüchtigten rumänischen Geheimdienst.

Nun ist auf einmal die Tatsache verdächtig, dass er den Statthaltern der Nazis entronnen ist. Mehr als zwei Jahre nehmen ihn seine Vernehmer in die Mangel, ohne greifbaren Erfolg. Aber

wenn in der Zwischenzeit nicht Stalin gestorben wäre, dann wäre Balas wohl kaum lebend aus diesem Gefängnis herausgekommen.

Nach seiner Entlassung nimmt er seine Tochter in den Arm – und muss erst darüber aufgeklärt werden, dass diese Zweijährige nicht die Zweijährige ist, die er vor seiner Verhaftung zum letzten Mal gesehen hat, sondern deren kleine Schwester, von deren Existenz er bisher nichts wusste.

Balas arbeitet weiter über Wirtschaftstheorie und gerät dabei an die Mathematik in Gestalt der damals neuen linearen Optimierung. Sein Vertrauen in den Kommunismus bröckelt zunehmend; aber erst 1964 bemüht er sich ernsthaft um Ausreise. Knapp zwei Jahre und ungefähr 2000 Telefonate später lässt der Staat ihn und seine Familie laufen, und sein neues Leben beginnt, zunächst in Neapel. Nach einigen Zwischenstationen geht Egon Balas (der seinen Namen abermals der neuen Umgebung angepasst hat) schließlich 1967 an die Carnegie Mellon University in Pittsburgh (Pennsylvania), der er bis zu seiner Emeritierung die Treue hält.

Es ist eine überaus lebendige und detailreiche Geschichte. Selbst wenn man in Betracht zieht, dass jeder Held sein eigenes Leben etwas heldenhafter zu sehen pflegt als seine Zeitgenossen, steht der Autor nicht nur als ein genialer Wissenschaftler da, sondern auch als Mensch von geradezu unglaublicher Charakterstärke. Zwei Folterkeller verschiedener Diktaturen mit intaktem Rückgrat zu verlassen, ist wahrlich nicht einfach.

Allerdings hat man, von den individuellen Einzelheiten abgesehen, doch gewisse Déjà-vu-Erlebnisse. So anrührend und schrecklich jeder Einzelfall ist: Dass die Nazis den größten Teil der Familie umgebracht haben, dass die Stalinisten einer ganzen Generation begeisterter Anhänger wenn nicht physisch, so doch seelisch das Rückgrat gebrochen haben und dass es den Übergebliebenen so unglaublich schwerfiel, das als Terror zu erkennen – das hat man schon so oft gelesen, dass das

# Start Me Up!

The Rolling Stones, 1981

## Manche Rennen werden schon beim Start entschieden!

All die Erfolge und Fähigkeiten, die Sie bis jetzt in Wissenschaft und Studium erworben haben, können Sie bei d-fine direkt für Ihren Start in die Wirtschaft einsetzen. Oder Sie haben den Sprung in die Wirtschaft bereits gewagt, erste Berufserfahrung gesammelt und möchten nun gerne in die Beratung? Auch dann sollten wir uns kennenlernen.

Sie besitzen einen exzellenten Universitätsabschluss, sprechen fließend Englisch und Deutsch und haben weit überdurchschnittliche **mathematische Fähigkeiten**. Sie haben darüber hinaus sehr gute **IT-Kenntnisse** und sind idealerweise bereits mit Statistik, Numerik und Finanzmathematik vertraut.

d-fine ist mit über 350 Beratern und Büros in **Frankfurt, München, London, Zürich, Wien und Hong Kong** eines der führenden europäischen Beratungsunternehmen mit den Beratungsschwerpunkten **Risiko und Finanzen**. Wir fokussieren höchste wissenschaftlich-technische Kompetenz auf die anspruchsvollen Herausforderungen unserer Kunden. Wir beraten Banken, Versicherungen, Asset-Manager, Industrieunternehmen und die öffentliche Hand zu allen Themen im Bereich **Handel und Risikomanagement** – von der **Strategie-Entwicklung** über die fachliche **Konzeption** der zugehörigen **Methoden und Prozesse** bis zur professionellen **Implementierung**, vom finanzmathematischen Modell bis zur real-time Schnittstelle, vom einfachen Kredit bis zum exotischen Derivat, vom Ratingsystem bis zur Portfoliosteuerung, von IFRS bis Solvency II.

Unbedingt erwarten wir von Ihnen **analytisches Denken**, ergebnisorientiertes Vorgehen und exzellente Kommunikationsfähigkeiten. Sie sind teamfähig, erfassen auch sehr komplexe Aufgaben schnell und können sich rasch in neue Umgebungen einarbeiten. Sie haben Beratungstalent, hohe Einsatzfreude, sind flexibel und belastbar und freuen sich auf **wechselnde Einsatzorte** – in Deutschland und weltweit.

Unsere Kunden schätzen unseren kompromisslos hohen Qualitätsanspruch und vor allem, dass wir diesen Anspruch auch realisieren. Das beginnt schon bei der Auswahl unserer Mitarbeiter. Wir suchen Sie als **Physiker (m/w)**, **Mathematiker (m/w)**, **(Wirtschafts-) Informatiker (m/w)** oder **Wirtschaftswissenschaftler (m/w)** mit **entsprechend quantitativ ausgerichteten Vertiefungsrichtungen**.

Selbstverständlich erhalten Sie eine **intensive Einführung** in Ihr zukünftiges Aufgabenfeld. Wir sind berühmt für unser **anspruchsvolles Training** auf höchstem Niveau, das wir in Zusammenarbeit mit führenden internationalen Universitäten wie z.B. der **University of Oxford**, der **Frankfurt School of Finance & Management** und der **European Business School** durchführen.

Wenn Sie in einem Team hoch begabter und hoch motivierter Kollegen mitarbeiten wollen, große individuelle Freiräume, viel Eigenverantwortung sowie hervorragende Entwicklungsperspektiven suchen, freuen wir uns auf Ihre Bewerbung.

Und durch unser **flexibles Wohnortkonzept** können Sie sogar Ihren jetzigen Wohnort beibehalten.

Willkommen bei d-fine!

d-fine GmbH · Opernplatz 2 · 60313 Frankfurt am Main  
Telefon +49-69-90737-555 · careers@d-fine.de · www.d-fine.de

nächste Schicksal der gleichen Art keinen echten Neuigkeitswert mehr hat.

Eine Anekdote war mir dagegen neu: In seiner Londoner Zeit lässt sich Balas einen Maßanzug fertigen. Der Schneider nimmt 40 oder 50 Maße und verwirrt dann seinen Kunden mit der völlig unpolitischen Frage: »Tragen Sie rechts oder links?« Ich kannte diese Geschichte nur als Witz.

Den damals angefertigten dunklen Anzug hat Balas immer noch. Er trug ihn 1992, als die breiten Aufschläge gerade wieder in Mode kamen, »zum Rektorenball meiner Universität und erntete damit einen großen Erfolg«.

**Christoph Pöppe**

Der Rezensent ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.



Felix zu Löwenstein

**Food Crash**

Wir werden uns ökologisch ernähren oder gar nicht mehr

Pattloch, München 2011. 320 S., € 19,99

WELTERNÄHRUNG

## Die dritte »grüne Revolution«?

Der Agrarexperte Felix zu Löwenstein liefert eine radikal ökologische Antwort auf das Welternährungsproblem und zugleich eine überzeugende Absage an die konventionelle Landwirtschaft.

Das Buch mit dem apokalyptischen Untertitel beginnt mit einer bizarren Geschichte: Bei einem Fernseh-Fresswettbewerb im Frühling 2008 gelang es Sonya aus Bottrop, 167 Hähnchenflügel auf einen Sitz zu vertilgen. Bei Felix Prinz zu Löwenstein, Ökologielandwirt und Vorstand des Bundes für Ökologische Lebensmittelwirtschaft (BÖLW), und seiner Familie löst das zunächst großes Gelächter aus – und plötzlich schlägt die Diskussion in die ernsthafte Frage um: Liegt denn der Hunger auf der Welt tatsächlich an einer unzureichenden Menge an Nahrungsmitteln?

Löwenstein ist zwar Agrarwissenschaftler und ehemaliger Entwicklungshelfer, kann aber die Frage auch nicht aus der hohlen Hand beantworten. Also recherchiert er, vergleicht Zahlen und befragt Experten. Ergebnis ist das vorliegende Werk, das sich stark an den von der Weltbank initiierten, 2008 veröffentlichten und heftig um-

strittenen »Weltagrарbericht« anlehnt (»Agriculture at a Crossroads«, siehe [www.agassessment.org](http://www.agassessment.org)). Seine Schlussfolgerung: Der Versuch, immer höhere Erträge zu erzielen, wird das Problem der Welternährung grundsätzlich nicht lösen. Noch schlimmer: »Gehen wir den Weg der intensiven industriellen Landwirtschaft weiter, dann verheizen wir in einem letzten großen Strohfeuer all das, was künftigen Generationen als Lebensgrundlage dienen muss.«

Im letzten Jahrhundert haben sich die Erträge der konventionellen Landwirtschaft verdreifacht. Durch hochrationalisierte Produktionssysteme sowie den Einsatz von chemischen Hilfsmitteln und genmodifizierten Pflanzen wird mit minimalem Aufwand so viel Grundnahrungsmittel pro Hektar Ackerboden produziert wie nie zuvor. Doch der gewaltige Fortschritt ging mit einer massiven Beeinträchtigung der Umwelt einher.

So ist heute der Boden derart mit Stickstoff gesättigt, dass die Pflanzen

nur noch 17 Prozent des neu ausgebrachten Düngers aufnehmen. Der Überschuss gelangt ins Grundwasser oder über die Flüsse bis ins Meer, wo er großen Schaden anrichtet. Ein Fünftel des Meeresbodens in der Kern-Ostsee zwischen Dänemark und den Åland-Inseln ist schon ohne Sauerstoff, weil die Überdüngung zusammen mit der intensiven Viehzüchtung aus Norddeutschland zu einem massiven Wachstum von Algen geführt hat. In diesen »Todeszonen« können sich die Fische nicht mehr vermehren, die Bestände sinken drastisch. Und die konventionelle Landwirtschaft tut der Umwelt noch weitere Schäden an: Sie stößt enorme Mengen an Treibhausgasen aus, Pestizide sammeln sich in der Nahrungskette an, Genmais vergiftet vermutlich nicht nur wie vorgesehen die Schädlinge, sondern auch Nutzinsekten ...

Darüber hinaus wirft Löwenstein der konventionellen Agrarwirtschaft vor, sie verschärfe den Hunger, indem sie Abhängigkeiten erzeuge. Die Stickstoffdüngung zum Beispiel lässt nicht nur die Pflanzen schneller wachsen, sie macht auch deren Zellwände weicher. Die Stängel neigen zum Brechen, was den Einsatz hormonaler Wachstumsbremmer erzwingt. Durch die rationell zu bewirtschaftenden Monokulturen verarmt der Boden, die Pflanzen werden dadurch weniger widerstandsfähig – und Pestizide unvermeidbar.

Dass ein Hilfsmittel das andere nach sich zieht, mag in unseren Breiten nicht sehr stören. Doch in Entwicklungsländern, wo die Bauern sich oft verschulden, um Saatgut, Dünger und so weiter zu finanzieren, entstehen schnell Teufelskreise des Elends. Am stärksten kritisiert wird dabei, dass die Bauern für genmodifizierte Pflanzen nicht nur Patentgebühren an die einschlägige Firma Monsanto zahlen müssen, sondern die selbst erzeugten Samen nicht zum Nachbau verwenden dürfen. Stattdessen müssen sie immer wieder neues Saatgut kaufen.

Zwei Drittel der Hungernden leben auf dem Land, 70 Prozent der Lebensmittel weltweit werden von Kleinbau-

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

ern produziert. Will man also dem Hunger auf der Welt ein Ende setzen, kommt man um die Kleinbauern nicht herum, sagt Löwenstein. Diese müssten zuallererst souverän bezüglich der eigenen Versorgung werden und zweitens unabhängig von teuren Betriebsmitteln ausreichende Erträge erzielen, ohne ihre Lebensgrundlage zu zerstören. Wie? Durch ökologische Landwirtschaft, denn diese setze auf geschlossene Kreisläufe: möglichst viel aus dem Hof verwenden, möglichst wenig von außen kaufen. Zwar fallen dadurch etliche chemische Hilfsmittel aus, doch die Ökobauern entkommen den meisten Problemen, indem sie diese gar nicht erst entstehen lassen.

So bringen sie den Stickstoff durch organischen Dünger in den Boden sowie durch den Einsatz von Leguminosen, die das Element aus der Luft aufnehmen. Dadurch steigt auch der Humusgehalt des Bodens an, die Pflanzen sind widerstandsfähiger. Im ostafrikanischen Tigray stiegen durch Düngung mit Kompost die Erträge um 35 Prozent im Vergleich zu konventionellen Methoden. Der erhöhte Humusgehalt hält die Feuchtigkeit fest, was der extrem trockenen Region sehr zugutekommt. Auf den Philippinen ist aus einer Kooperation zwischen Bauern und Agrarwissenschaftlern ein nationales Programm geworden. 35 000 Familien erzielten mit 2000 selbst gezüchteten Reissorten und natürlichen Regelungsmechanismen genauso hohe Erträge wie ihre konventionell arbeitenden Nachbarn und konnten im Gegensatz zu jenen noch Eigenkapital bilden.

Diese Erfolgsgeschichten bieten eine erholsame Abwechslung zu der wenig erfreulichen Zustandsbeschreibung der ersten Buchhälfte. Allerdings bleibt fraglich, ob die lobenswerten Ansätze überall ähnlich erfolgreich aufgegriffen würden, vor allem in je-

nen Regionen, die seit Jahrzehnten auf Subventionen und Entwicklungsgelder angewiesen sind (ein Problem, das der Autor durchaus erwähnt). Das erfordert eine Veränderung der Mentalitäten und vor allem Wissenstransfer; denn hier geht es nicht um die Wiedereinführung der althergebrachten Landwirtschaft (»öko aus Mangel«), sondern um ausgeklügelte Produktionssysteme, deren praktische Umsetzung wesentlich heikler ist als die »der Gebrauchsanleitung auf dem Düngersack oder dem Spritzmittelkanister«.

Doch die von Löwenstein empfohlene »ökologische Intensivierung« stößt auf noch weit ernstere Hindernisse, nämlich korrupte Politik, Konflikte und fehlende Rechtssicherheit: »Warum soll ich erst aussäen, wenn das Stück Acker mir morgen nicht mehr gehört?« Das verhindert schlichtweg jede Art von Landwirtschaft, ob konventionell oder ökologisch.

Leider stopft der Autor die Sachverhalte im ersten Teil des Buchs mit einer Fülle politischer und wirtschaftlicher Fakten zusammen und überfordert damit den Leser. Die wenigen Landkarten, die einiges veranschaulichen könnten, sind – grau in grau und mit unscharfen Legenden – kaum zu entziffern, und innerhalb der Hauptkapitel verliert man mangels klarer Gliederung und aussagefähiger Überschriften leicht den roten Faden.

Aber die formalen Mängelchen hat man spätestens im zweiten Hauptteil verdrängt, wenn Löwenstein, der selbst sechs Jahre lang konventionell gewirtschaftet hat, uns in sein Unbehagen beim Umgang mit Pestiziden hineinzieht.

Das Buch ist spannend und veranschaulicht wesentliche Zusammenhänge in intelligenter und unterhaltbarer Weise. In der Debatte zur Weltenernährung der Zukunft verdient das Plädoyer für ein nachhaltigeres und gerechteres Landwirtschaftssystem auf jeden Fall, gehört zu werden.

**Emmanuelle Vaniet**

Die Rezensentin ist promovierte Biologin und freie Wissenschaftsjournalistin in Darmstadt.

## LESERSHOP



### KALENDER

#### »Himmel und Erde 2013«

Astronomen präsentieren im Bildkalender »Himmel und Erde 2013« ihre schönsten Aufnahmen und lassen Sie an den fantastischen Möglichkeiten der modernen Naturbeobachtung teilhaben. Zusätzlich bietet er wichtige Hinweise auf die herausragenden Himmelsereignisse 2013 und erläutert auf einer Extraseite alle auf den Monatsblättern des Kalenders abgebildeten Objekte knapp und anschaulich. 14 Seiten; 13 farbige Großfotos; Spiralbindung; Format: 55 x 45,5 cm; € 29,95 zzgl. Porto; als Standing Order € 27,- inkl. Inlandsversand

[spektrum.com/kalender2013](http://spektrum.com/kalender2013)

**Spektrum**  
DER WISSENSCHAFT



## Die Mikroben in uns

Die Bakterien, die uns bevölkern, sind zehnmal so zahlreich wie unsere Körperzellen. Insgesamt wiegen sie gut und gern zwei Kilogramm. Die meisten nützen uns, und viele brauchen wir sogar für unsere Gesundheit. Genetische Untersuchungen offenbarten nun ein höchst komplexes Beziehungsgeflecht zwischen diesem unsichtbaren Ökosystem und dem Menschen.

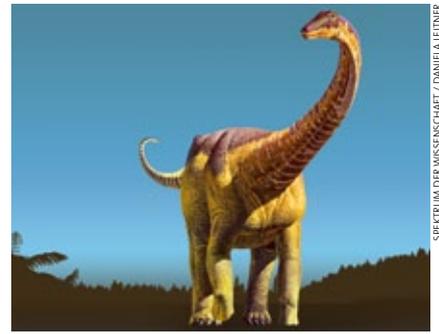
BRYAN CHRISTIE

## Der steinige Weg zum Fusionsreaktor

Der Bau des »International Thermonuclear Experimental Reactor« (ITER) ist ein weiterer Meilenstein auf dem Weg zur technischen Nutzung der Kernfusion. Doch bis das Sonnenfeuer auf der Erde kontrolliert brennt und uns mit unerschöpflicher Energie versorgt, sind noch viele Probleme zu lösen.

## Heikle Preisfindung für Finanzprodukte

Seit der Lehman-Pleite weiß der Markt, dass auch große Banken zusammenbrechen können, was zuvor als ausgeschlossen galt. Deshalb müssen alle Beteiligten das Risiko eines Kredits unter Banken neu einschätzen und einen Preis dafür finden – mit überraschenden Ergebnissen.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / DANIELA LEITNER

## Riesensaurier erfolgreich bis zuletzt

Die gigantischen Sauropoden galten bis vor Kurzem als ein archaisches Fehlexperiment von kurzer Dauer. In Wahrheit blieben sie bis zum Schluss den anderen Sauriergruppen überlegen und brachten sogar ganz am Ende des Erdmittelalters noch neue Arten hervor.



MARIA STENZEL

## Eis am Südpol schwindet

Immer mehr Schelfeisflächen rund um den antarktischen Kontinent zerbrechen und schmelzen. Dadurch beschleunigt sich der Abfluss der Gletscher vom Festland, was den Meeresspiegel steigen lässt. Forscher versuchen, das Ausmaß der Bedrohung zu ermitteln.

## 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 Oktober



Stirlingauto

- 6** Zusätzlich für Ihre Abobestellung erhalten Sie ein Präsent Ihrer Wahl!

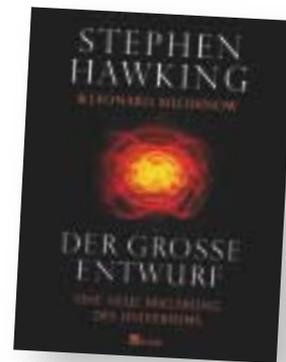
Weitere Präsente finden Sie im Internet ...



Acht verschieden gestaltete Bausteine, die jeder für sich aus mehreren Einzelwürfeln bestehen, werden auf einer Grundplatte zu den unterschiedlichsten Formen zusammengebaut. Das **Baumeisterspiel** fördert Kombinatorik, Denk- und räumliches Vorstellungsvermögen.



Das fadengeheftete **Din-A4-Spektrum-Artbook** bietet Ihnen auf 160 Seiten Platz für Ihre Notizen. Mit Verschluss- und Lesezeichenband sowie einer Stiftschlaufe.



Um das Universum auf fundamentalster Ebene zu verstehen, müssen wir nicht nur wissen, wie sich das Universum verhält, sondern auch: Warum gibt es etwas und nicht einfach nichts? Warum existieren wir? Das Buch »Der große Entwurf« versucht die Antworten zu geben.

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)



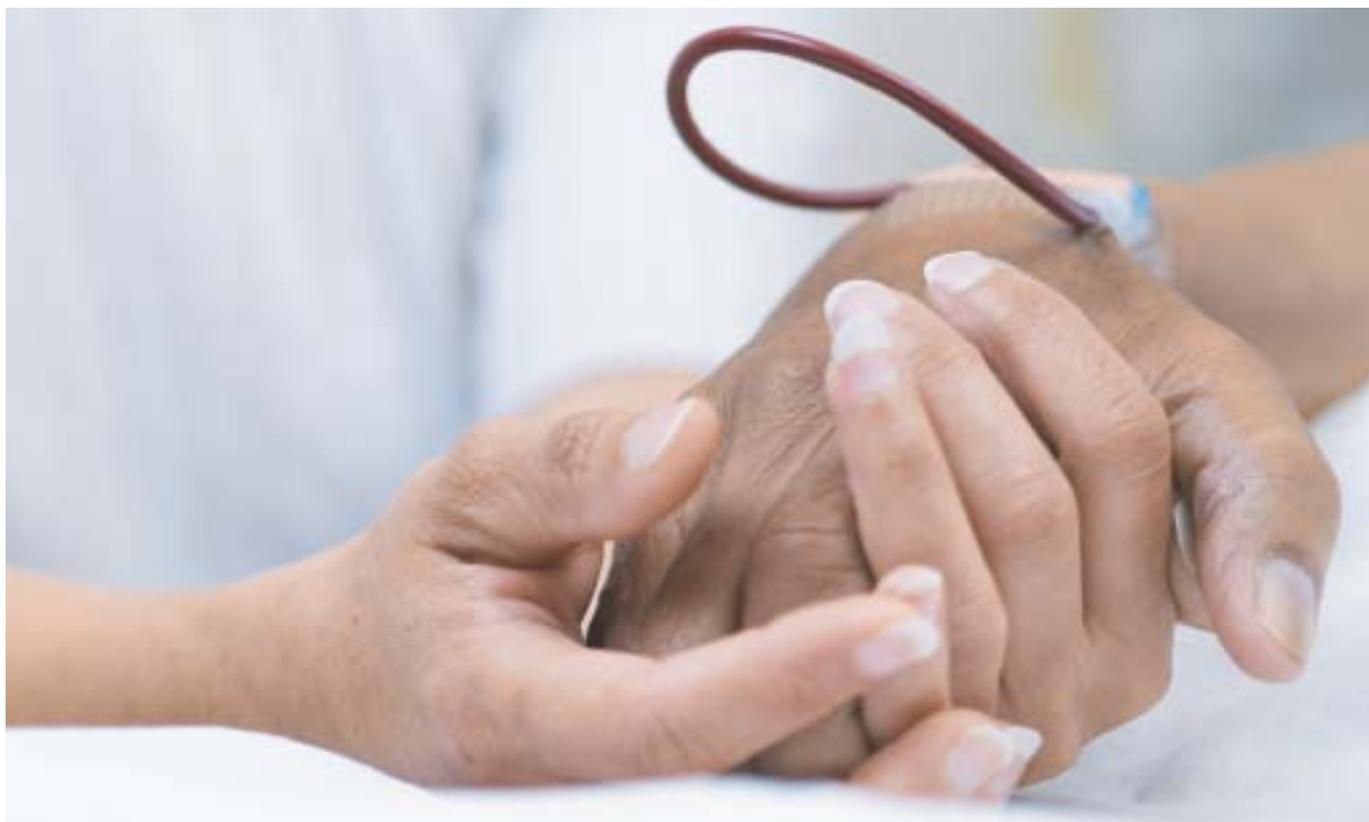
E-Mail: [service@spektrum.com](mailto:service@spektrum.com)



Tel.: +49 6221 9126-743



Fax: +49 6221 9126-751



# Weniger Neben. Mehr Wirkung.

## **Mehr Lebensqualität durch Personalisierte Medizin von Roche.**

Jeder Mensch ist anders – auch genetisch. Deshalb setzen wir auf Personalisierte Medizin: Unsere Bereiche Pharma und Diagnostics arbeiten gemeinsam an Tests und Wirkstoffen, um Therapien besser auf die Bedürfnisse von Patienten abzustimmen.

Unsere Innovationen helfen Millionen Menschen, indem sie Leid lindern und Lebensqualität verbessern. Wir geben Hoffnung.

*[www.roche.de](http://www.roche.de)*



*Innovation für die Gesundheit*