

# Spektrum

DER WISSENSCHAFT

ANGKOR  
Wiederentdeckung  
einer antiken  
Großstadt



AUGUST 2014

BIG DATA

Wo die NSA versagte

WAHRNEHMUNG

Hilfe für Indiens blinde Kinder

ATTOSEKUNDEN-PHYSIK

Schalten mit Lichtblitzen

## Im Griff der Dunklen Energie

Was ist das Schicksal des Kosmos?



8,20 € (D/A) · 8,50 € (L) · 14,- sFr.  
D6179E

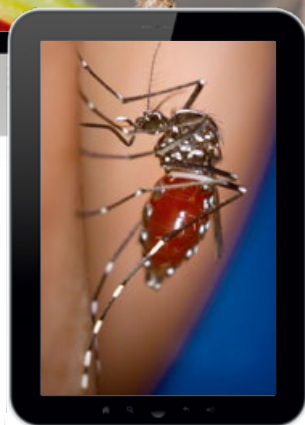


## Deutschlands einziges wöchentliches Wissenschaftsmagazin



### Jeden Donnerstag neu!

- mehr als 40 Seiten News, Hintergründe, Kommentare und Bilder aus der Forschung
- im Abo nur € 0,77 pro Ausgabe
- jederzeit kündbar
- mit exklusivem Artikel aus **nature** in deutscher Übersetzung
- als PDF einfach über E-Mail oder per Link zu beziehen



Lernen Sie **Spektrum – Die Woche** kostenlos kennen:  
[www.spektrum.de/testwoche](http://www.spektrum.de/testwoche)



Hartwig Hanser  
Redaktionsleiter  
hanser@spektrum.com

## Wege zum besseren Umgang mit »Big Data«

Der NSA-Skandal ist bereits mehr als ein Jahr alt; Anfang Juni 2013 erfolgten die ersten Enthüllungen auf Grundlage der von Edward Snowden entwendeten Informationen. Das Thema beschäftigt bis heute die Gemüter und Medien, zumal damit auch andere mit »Big Data« – also riesigen Datensammlungen – arbeitende Organisationen wie Google viel stärker als zuvor in die Schusslinie kamen. Nach der allgemeinen Entrüstung über die Praktiken der NSA erfolgt nun allmählich aber auch deren wissenschaftliche Analyse. Diese fällt jenseits aller moralischen und juristischen Einwände ziemlich vernichtend aus.

So erklärt der renommierte Mathematikprofessor Keith Devlin von der Stanford University in den »Notices of the American Mathematical Society« ([www.ams.org/notices/201406/](http://www.ams.org/notices/201406/)), dass das massenhafte Datensammeln seinen erklärten Zweck gar nicht erfüllen kann. Zwar sei eine googleähnliche Suchmaschine in der Lage, in wenigen Sekunden aus öffentlich verfügbarem Material ein höchst detailliertes und persönliches Bild einer im Visier stehenden Person zu erstellen, also bei sehr engem Blickwinkel erschreckend weit in die Tiefe zu forschen. Die Suche in die Breite dagegen sei praktisch zum Scheitern verurteilt: Selbst wenn das Computersystem unter Milliarden von Menschen eine vergleichsweise kleine Zahl potenzieller Terroristen ausfindig mache, müsste ein Team von Auswertern über die Konsequenzen entscheiden, die bekanntlich bis zur gezielten Tötung reichen. Das ist laut Devlin aber prinzipiell so gut wie unmöglich. Gerade wegen der ungeheuren Datenmasse fehle einem Auswerter jeder Anhaltspunkt, wie solide die Basis für einen vom System ausgespuckten Verdacht sei.

Zu diesen Erkenntnissen gelangte Devlin bei der Mitarbeit an einem Projekt des Verteidigungsministeriums. Dort erforschte er Wege, auf denen ein Auswerter zu belastbaren Schlüssen kommen kann. Resultat: Unter den beschriebenen Bedingungen gibt es keinen!

Auch unser Autor Alex Pentland vom Massachusetts Institute of Technology hat sich mit der Vorgehensweise der NSA beschäftigt. In seinem Artikel ab S. 84 prangert er ihre teils katastrophalen Fehler an – etwa jenen, dass sie ihr gesamtes Wissen in einem einzigen riesigen Haufen sammelt. Dadurch konnte nicht nur ein Überzeugungstäter wie Edward Snowden relativ bequem zugreifen; diese Möglichkeit steht grundsätzlich auch feindlichen Agenten offen. Mit einer Art Dreipunkteprogramm versucht Pentland einen konstruktiven Ausweg aus dem Dilemma zu entwerfen. Es gehe letztlich darum, legitime Interessen sowohl von staatlichen Organen oder Firmen als auch des individuellen Bürgers zu wahren. Eine Möglichkeit dazu sieht Pentland im Zugang zu Informationen über Anfragen der NSA (»Metadaten«).

Immerhin hat die NSA nun erstmals Zahlen über ihre Auslandsüberwachung vorgelegt: Knapp 90 000 Ziele – Menschen oder Organisationen – wurden 2013 ausgespäht. Bis wir jedoch das Gefühl des Ausgeliefertseins verlieren, muss sich bei Big Data noch einiges ändern – das gilt für staatliche Einrichtungen ebenso wie für Internetfirmen.

Herzlich Ihr

### AUTOREN IN DIESEM HEFT



**Pawan Sinha** ist Professor am Massachusetts Institute of Technology. Ab S. 22 berichtet er über sein Projekt, das blinden Kindern in Indien das Augenlicht verleiht und gleichzeitig wissenschaftliche Erkenntnisse über unseren Sehsinn liefert.



Die Dunkle Energie hat binnen kürzester Zeit unser kosmologisches Weltbild verändert. Warum an ihr kaum ein Weg vorbeiführt, erklären die Kosmologen **Elena Sellentin** und **Matthias Bartelmann** von der Universität Heidelberg ab S. 38.



Der Chemiehistoriker **Eric Scerri** von der University of California in Los Angeles beschreibt ab S. 78, wie relativistische Effekte die Eigenschaften superschwerer Elemente beeinflussen.

3 Editorial

6 Leserbrief/Impressum

10 Spektrogramm

Neutrinozerfall • Körpertemperatur bei Dinosauriern • Veränderungen des Erdmagnetfelds • Robuste Korallenriffe • Energiebilanz von Windkraftanlagen • Parkinsontherapie

13 Bild des Monats

Digitale Totenmaske eines Geiers

14 Forschung aktuell

Antioxidanzien mit Janusgesicht

Sie gelten als Schutzschild gegen Krebs, fördern aber auch Tumoren

An der Mündung der Urems

In der Mittleren Steinzeit lagen weite Bereiche der heutigen Nordsee trocken

Genetische Momentaufnahme

Bauanleitungen für Proteine liegen an unerwarteten Orten im Erbgut

SPRINGER'S EINWÜRFE

Wird Fracking den Energiehunger stillen?

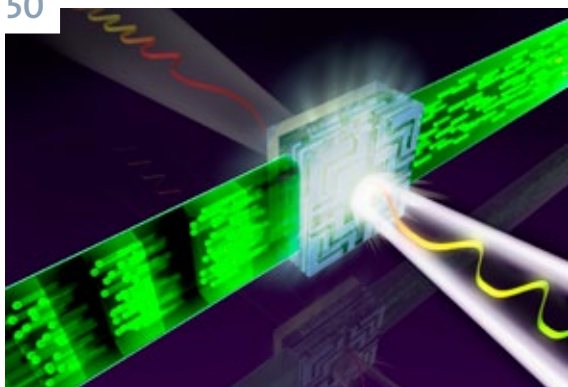
Risiken der neuen Fördermethode für Gas und Öl

22



EILEEN HOHMUTH-LEMONICK

50



CHRISTIAN HACKENBERGER, LMU

58



SHUTTERSTOCK / BULE SKY STUDIO

BIOLOGIE & MEDIZIN

► 22 Es werde Licht!

*Pawan Sinha*

Noch mit über 20 Jahren können von Geburt an Blinde sehen lernen. Das zeigt ein Projekt in Nordindien.

SERIE »IMMUNTHERAPIE GEGEN KREBS« TEIL 2

30 Freie Fahrt fürs Immunsystem

*Karen Weintraub*

Neue Ansätze sollen Abwehrblockaden aufheben.

INTERVIEW

34 »Eine Kettenreaktion, die den Tumor zerstört«

*Emmanuelle Vaniet*

Krebsforscher Thierry Boon über die Immuntherapie.

PHYSIK & ASTRONOMIE

SCHLICHTING!

48 Sonnenbrand im Grünen

*H. Joachim Schlichting*

Kann durch Wassertropfen gebündeltes Sonnenlicht tatsächlich Pflanzenblätter verbrennen?

► 50 Schalten mit Lichtblitzen

*Martin Schultze und Ferenc Krausz*

Mit Laserpulsen statt Spannungen gesteuert könnten neue Transistoren enorme Geschwindigkeiten erreichen.

MENSCH & KULTUR

► 58 Angkor – Wiederentdeckung einer antiken Großstadt

*C. Pottier, P. Bâty, J.-B. Chevance und J. Estève*

Die berühmte Tempelstadt Angkor Wat war wohl nur ein kleiner Teil der weitläufigen Hauptstadt des Khmer-Reichs.



► TITELTHEMA

KOSMOLOGIE

## 38 Was das Universum auseinandertreibt

*Elena Sellentin und Matthias Bartelmann*

Die Entdeckung der Dunklen Energie hat unser Bild vom Universum in kürzester Zeit grundlegend verändert. Obwohl es mittlerweile vielfach bestätigt ist, wissen wir erstaunlicherweise immer noch sehr wenig über dieses Phänomen, was das Schicksal des Kosmos bestimmen könnte.

70



DREAMTIME / TEMISTOCLE LUCARELLI

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

### 66 Die tanzenden Polyeder des Ueli Wittorf

*Christoph Pöppe*

Entfaltung und Paarungsverhalten platonischer Körper.

SERIE »WELT DER SPRACHE« TEIL 4

### 70 Das Rätsel der großen Sprachfamilien

*Paul Heggarty*

Die Klicksprachen der San weichen den Sprachen agrarisch lebender Völker. Ein weltweit gültiges Erklärungsmodell?

ERDE & UMWELT

78



HOLLY UNDEM

### 78 Risse im Periodensystem

*Eric Scerri*

Das Schema der chemischen Elemente ist nun vollständig – und verliert gleichzeitig an Vorhersagekraft.

TECHNIK & COMPUTER

### ► 84 Schützt die NSA vor sich selbst!

*Alex Pentland*

Massendatensammeln ist so gefährlich wie nutzlos.

### 88 Rezensionen

*Wolfgang Kundt, Ole Marggraf:* Physikalische Mythen auf dem Prüfstand • *Karl-Ludwig Kley:* Deutschland braucht Chemie • *Steven Strogatz:* The Joy of  $x$  • *Florian Neukirchen, Gunnar Ries:* Die Welt der Rohstoffe • *Axel Bojanowski:* Die Erde hat ein Leck u. a.

### 95 Wissenschaft im Rückblick

Von der hochkerzigen Glühlampe zum selbstheilenden Draht

### 96 Futur III

*Alter S. Reiss:* Wofür hat man Freunde?

### 98 Vorschau

Titelmotiv: Spektrum der Wissenschaft; Hintergrund: fotolia / Stefan Kuhn  
Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ► gekennzeichnet.



## Die Bedeutung der Mathematik

Laut der Quantenfeldtheorie besteht die Welt aus Strukturen oder Bündeln von Eigenschaften, schrieb der Bielefelder Physiker und Philosoph Meinard Kuhlmann zum Titelthema der letzten Ausgabe. (»Was ist real?«, Juli 2014, S. 46)

**Michael Lang, Zorneding:** Ein ausgezeichnete und auch für fachfremde

Naturwissenschaftler beziehungsweise an Physik Interessierte und vorgebildete Leser verständlicher Beitrag, der eine hoch spannende, aktuelle Grundsatzdiskussion aufgreift.

Mir als lediglich naturwissenschaftlich interessiertem Journalisten (also Fastlaien) brachte der Beitrag die ungewein befriedigende Erkenntnis, dass mein aus der philosophischen Ecke kommendes Gefühl, statt Materie könnten die Strukturen der eigentliche Stoff sein, aus dem die Welt besteht, offensichtlich von – zumindest einigen – seriösen Physikern geteilt und überprüft wird.

Das könnte dann auch den Streit darüber, ob Mathematik lediglich eine menschliche Erfindung ist, die zufällig die Welt gut beschreibt, oder ob sie eine Grundeigenschaft der Welt darstellt, befrieden. Denn wenn Strukturen die Basis bilden, ist Mathematik mit sehr viel größerer Wahrscheinlichkeit eine inhärente Eigenschaft der Welt und keine davon getrennte Erfindung. Weiterhin scheint mir die Stringtheorie weitaus harmonischer in ein strukturelles Weltbild zu passen als in ein materielles.

**Wolfgang Klein, Wehrheim:** Grundsätzlich ein sehr guter Artikel. Leider stammt er von einem Philosophen, und Physiker lassen sich von Philosophen eher selten in ihrem Trott beirren. Auch ist es verwunderlich, dass diese Erkenntnisse erst jetzt langsam Gegenstand der wissenschaftlichen Diskussion werden. Für Mathematiker ist die Erkenntnis spätestens seit den 1920er Jahren selbstverständlich, dass es nicht auf ein inneres Wesen der Dinge ankommt, sondern auf die Beziehungen der Dinge untereinander. David Hilbert soll einmal gesagt haben, man könne statt »Punkte, Geraden und Ebenen« jederzeit auch »Tische, Stühle und Bierseidel« sagen; es komme nur darauf an, dass die Axiome erfüllt sind.

Das Thema »Symmetriegruppen« kommt etwas zu kurz. Außerdem sind Symmetriegruppen nicht nur in der Relativitätstheorie und der Quantenmechanik von Bedeutung, sondern grundsätzlich auch in der klassischen, nicht relativistischen Physik. Der von theoretischen Physiker viel zitierte, aber fast nie im Detail diskutierte Satz von Emmy Noether wurde meiner Erinnerung nach im Artikel nicht angespro-

## Spektrum DER WISSENSCHAFT

**Chefredakteur:** Prof. Dr. phil. Dipl.-Phys. Carsten Könneker M.A. (v.i.S.d.P.)  
**Redaktionsleiter:** Dr. Hartwig Hanser (Monatshefte), Dr. Gerhard Trageser (Sonderhefte)  
**Redaktion:** Mike Beckers, Thilo Körkel, Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online-Koordinator), Dr. Frank Schubert, Dr. Adelheid Stahnke, E-Mail: redaktion@spektrum.com  
**Ständiger Mitarbeiter:** Dr. Michael Springer  
**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  
**Redaktionsassistenz:** Barbara Kuhn  
**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  
**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: Michaela Butler, Dr. Markus Fischer, Dr. Werner Gans, Christine Kemmet, Luise Loges, Dr. Michael Springer.

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

**Vertrieb und Abonnementverwaltung:** Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de, Vertretungsberechtigter: Ulwe Bronn

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

**Bezugspreise:** Einzelheft € 8,20 (D/A) / € 8,50 (L) / sFr. 14,-; im Abonnement € 89,- für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 69,90. Abonnement Ausland: € 97,40, ermäßigt € 78,30. E-Paper € 60,- im Jahresabonnement (Vollpreis); € 48,- ermäßigter Preis auf Nachweis. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart, IBAN: DE52600100700022706708, BIC: PBNKDEFF

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: Patrick Priesmann, Tel. 0211 887-2315, Fax 0211 887-97-2315; verantwortlich für Anzeigen: Annette Freistühler, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887 1322

**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. 35 vom 1.1.2014.  
**Gesamtherstellung:** L.N. Schaffrath Druckmedien GmbH & Co. KG, Marktweg 42–50, 47608 Geldern

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2014 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.

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

ISSN 0170-2971

### SCIENTIFIC AMERICAN

75 Varick Street, New York, NY 10013-1917  
 Editor in Chief: Mariette DiChristina, President: Steven Inchoombe, Executive Vice President: Michael Florek, Vice President and Associate Publisher, Marketing and Business Development: Michael Voss



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



chen. Und in diesem Zusammenhang wären die Arbeiten von Felix Klein und Bernhard Riemann eine Erwähnung wert gewesen.

Vermisst habe ich auch eine Einordnung der Superstringtheorie/M-Theorie, insbesondere in Bezug auf Occam's Razor. Meinem Geschmack nach ist beispielsweise die Annahme, dass die Realität sich gerade durch eine Calabi-Yau-Mannigfaltigkeit beschreiben lässt, auf Grund der vielen Voraussetzungen zu deren Struktur schon eine massive Ad-hoc-Voraussetzung, und man muss sich fragen, ob die willkürliche Annahme der Werte einer Reihe von Naturkonstanten oder willkürliche Annahmen zur Geometrie der Realität Occam's Razor stärker verletzen.

Physiker arbeiten nach dem Prinzip von Versuch und Irrtum. Angesichts von Theoretikern wie der Superstringtheorie, die in der Praxis kaum überprüfbare Vorhersagen machen, stellt sich zunehmend die Frage, inwieweit die mathematischen Axiome, die in der Theorie implizit verwendet werden, von der beobachteten Realität überhaupt erfüllt werden, beispielsweise das sehr wichtige, aber wenig bekannte Auswahlaxiom.

## Verlust von wertvollem Stickstoff

*Die Mikrobiologin Maren Emmerich stellte die zweifach positive Wirkung von verkohlten Pflanzenabfällen für unser Klima vor. (»Biokohle macht Landwirtschaft klimafreundlicher«, Forschung aktuell, Juni 2014, S. 14)*

**Ernst Schwemmer, Heidelberg:** Von großer praktischer Bedeutung sind Stickstoffverluste der Böden durch Denitrifikation und Ausgasung. Sie treten bei Sauerstoffmangel in dicht gelagerten und nassen Böden auf. Zahlreiche Mikroorganismen reduzieren Nitrat zu molekularem Stickstoff, aber auch zum großen Teil in Lachgas, das dem Boden entweicht. Die Verluste werden mit 10 bis 40 Prozent, in überfluteten Reisfeldern sogar mit 60 Prozent des zugeführten Düngers angegeben. Die Denit-

rifikationsbecken der Kläranlagen, die den Stickstoffeintrag in die Vorfluter verringern, geben ebenfalls ständig Lachgas an die Atmosphäre ab. Dieses Problem wird in der Öffentlichkeit wenig diskutiert. Die positive Wirkung der Biokohle sehe ich vor allem in der besseren Sauerstoffversorgung der Mikroorganismen, die eine Denitrifikation nicht in Gang kommen lässt.

## Der Filter der Einstellung

*Kolumnist Michael Springer berichtete über eine Erhebung, der zufolge angehende Ingenieure im Lauf ihres Studiums weniger interessiert an sozialen Aspekten ihrer künftigen Arbeit werden. (»Ist die Naturwissenschaft unmoralisch?«, März 2014, S. 20)*

**Wolfgang Huß, Hamburg:** Zunächst bin ich Michael Springer sehr dankbar, dass er das Thema der sozialen Verantwortung mit auf die Tagesordnung gesetzt hat. Ob die von ihm erwähnte Unterstellung der Forscherin Cech, dass »externe Ursachen im ideologischen Bereich« für die festgestellte fortschreitende Abnahme der »Sensibilität für die Verantwortung des Forschers« tatsächlich ursächlich sind oder nicht, lasse ich dahingestellt.

Michael Springer meint hingegen, »dass ein naturwissenschaftliches Studium ganz von selbst eine objektivwertfreie, nicht moralische Einstellung fördert«. Da bin ich anderer Ansicht. Meiner Meinung nach unterliegt jede Interpretation einer Untersuchung oder Messung dem Bild, welches der Naturwissenschaftler von seinem Forschungsgegenstand oder, allgemeiner gesagt, von der Welt hat.

Wie anders ist es sonst zu erklären, dass profilierte Wissenschaftler die Relativitätstheorie Einsteins als jüdische Physik ablehnten? Dass sie Schwarze für dumm und Juden für minderwertig hielten? Dass sie jahrzehntelang kein homosexuelles Verhalten im nicht menschlichen Tierreich beobachten konnten, obwohl es ständig vor ihrer Nase stattfand?

Alles, was der Mensch tut, wird durch den Filter seiner Einstellung und seiner Meinung beeinflusst, denke ich. Und so fördert das Studium der Naturwissenschaften nach meiner Meinung nicht automatisch die »objektivwertfreie, nicht moralische Einstellung«.

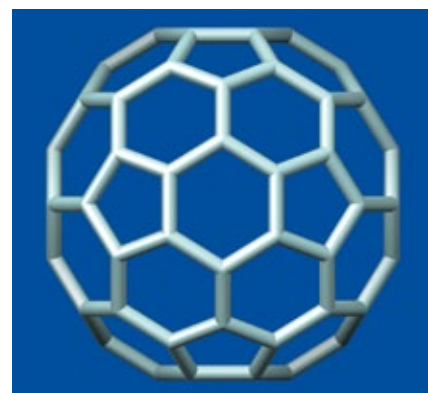
Die Wissenschaften sind voll von Wertungen, von moralischen und von nicht moralischen Einstellungen und Verhaltensweisen. Daher sollten sich Studenten dessen bewusst sein. Es sollte natürlich im Unterricht auch zusammen mit sozialer Verantwortung thematisiert werden.

Wir alle tun gut daran, dies nicht zu leugnen, sondern es offen auszusprechen. Zu meinen, man wäre Teil einer objektivwertfreien und nicht moralischen Wissenschaft, was auch immer dies sein sollte, oder würde sich dem zumindest annähern – das wäre eine fatale, gefährliche Selbsteinschätzung, die einem gesunden Selbstzweifel im Weg stünde.

## Erratum

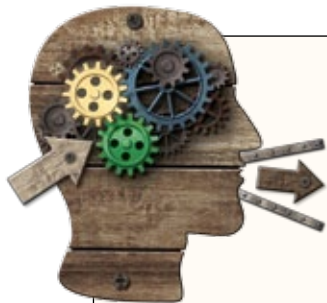
*»Eine neue Klasse halbregelmäßiger Körper«, Mai 2014, S. 72*

Das zweite Bild in der untersten Reihe auf S. 75 (siehe unten) zeigt nicht, wie in der Bildunterschrift angegeben, einen Ikosaederstumpf (Fußball). In dem Körper grenzen, im Gegensatz zum Fußball, an mehreren Stellen drei Sechsecke aneinander (die schon deswegen nicht gleichwinklig sein können, weil sie sonst in einer Ebene liegen müssten). Malte von Arnim hat uns auf den Fehler aufmerksam gemacht.



SCHEIN, S. GAVED, I.M.: FOURTH CLASS OF CONVEX EQUILATERAL POLYHEDRON WITH POLYHEDRAL SYMMETRY RELATED TO FULLERENES AND VIRUSES. IN: PNAS 111, S. 29 20–29 23, 2014. TEILE VON FIG. 2 (FARBVERÄNDERT); ABRUCK MIT FOL. GEN. VON PNAS PERMISSIONS

FOTO: ANDREY KUZMIN / WÄ  
BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT



## Einzigartige menschliche Sprache?

*Die Linguisten Ina Bornkessel-Schlesewsky und Matthias Schlesewsky gehen davon aus, dass nichtmenschliche Primaten hirnorganisch die Anlagen zur Sprache haben; der Mensch lernte zu sprechen über das Hören. (»Ende der Exklusivität«, Mai 2014, S. 60)*

**Karl-Heinz Lewin, Haar:** »Blockorientierte« Programmiersprachen wie `Algo`, `C` oder `Java` erlauben auf der Quellcodeebene eine Verschachtelung von prinzipiell beliebiger Tiefe. Eine Verschachtelung über mehr als fünf oder sechs Stufen zeugt allerdings von einem schlechten Programmierstil. Die größte Verschachtelungstiefe, die ich je gesehen habe, fand ich im Quellcode eines `Unix-SystemV-Dienstprogrammes`, für das ich eine Anpassung an unser Betriebssystem vornehmen wollte, und zwar bis zu elf Stufen. Einen solchen Quellcode noch zu verstehen und korrekt anzupassen, erforderte eine aufwändige Quellcodeanalyse, trotz Unterstützung durch eine gute Analysesoftware, die die Verschachtelungsebenen auf dem Bildschirm oder Drucker sichtbar machte.

In meiner Schulzeit lasen wir im Deutschunterricht die Novelle »Das Erdbeben in Chili« von Heinrich von Kleist. Kleist schrieb sehr verschachtelte Sätze mit einer Schachtelungstiefe von häufig bis zu vier oder fünf und seltener bis zu sechs Stufen – schon beim Lesen schwer verständlich, beim Hören des vorgelesenen Textes teilweise nicht mehr zu verstehen. Christian Morgenstern zeigt in seiner Vorrede zu seinen Galgenliedern, dass durch einen längeren Satz mit einer Schachtelungstiefe von sechs und danach mehrfach fünf Stufen der Leser bereits so verwirrt ist, dass ihn die falschen – weil unpassenden – Wiederaufstiege am Ende des Satzes kaum noch als Fehler erscheinen.

In der mündlichen Rede verwenden wir selten mehr als zwei Schachtelungsstufen – was darüber hinausgeht, wird einfach unverständlich und fehlerträchtig. Wenn ich mit Kleinkindern spreche, mit altersdementen Men-

schen oder mit Menschen, die eine andere Muttersprache sprechen und nur wenig Deutsch verstehen, vermeide ich Verschachtelungen vollständig. Fast alle Menschen werden es ebenso halten. Daher halte ich es für denkbar, dass die Sprecher des Pirahã dem Forscher Dan Everett gegenüber, der ja für sie ein Fremder war, ebenfalls Verschachtelungen vermieden, und er die Verschachtelungsfreiheit nur irrtümlich für eine Eigenschaft der Sprache Pirahã hielt, und nicht bemerkte, dass dies nur eine Eigenschaft der für ihn bestimmten Rede war.

**Antwort der Autoren:** Die Analogie zu Programmiersprachen ist sehr treffend, da sie wunderbar illustriert, wozu wir Menschen in der Lage sind, wenn wir am Schreibtisch »sprachliche« Probleme lösen: Wir können dort unendliche Tiefe erzeugen. Trotzdem gibt es einen zentralen Unterschied. In der Programmierung gilt offenkundig eine Verschachtelung ab einer bestimmten Tiefe als schlechter Stil. In der menschlichen Sprache ist es hingegen nicht die bewusste Reduktion der Verschachtelung in der Produktion, die den Erfolg der Kommunikation bestimmt, sondern die Beschränkungen, die auf der Seite des Hörers bestehen.

Die Diskussion, ob das Pirahã rekursive Strukturen hat, wird auf der Basis des gegenwärtig vorhandenen Sprachmaterials geführt. Während Dan Everett als derjenige, der als ausgewiesener Experte für diese Sprache gilt, annimmt, dass es keine Evidenz gibt, sehen andere Linguisten Ansätze für Rekursion. Die Debatte dreht sich also primär darum, wie man die Daten sprachwissenschaftlich analysiert.

**Anna Schmitz, Tübingen:** Ist wirklich der Eurozentrismus im Speziellen der Grund für eine bisher eher eingeeengte Sichtweise auf die Sprachfähigkeit oder eher die generelle Unwilligkeit des Menschen, einen eingetretenen Denkpfad wieder zu verlassen, eine lieb gewonnene Hypothese aufzugeben und eine andere Perspektive einzunehmen? Der Unterschied zwischen dem Deutschen und der Neuguineasprache `Fore` scheint mir nicht wirklich so frappant, wie es in dem Wildschwein-töten-Beispiel dargelegt wird. Auch im Deutschen kommt es vor, dass die Semantik als Teil der Grammatik wirkt. Man muss in dem Beispielsatz »Der Roman liebt den Archivar« nur die beiden maskulinen Substantive durch andere ersetzen, etwa »Das Buch liebt die Frau«. In diesem Fall würden wir den Satz nicht als inhaltlich unsinnig erkennen, sondern automatisch »die Frau« als Subjekt ansehen, weil »lieben« nicht von einem unbelebten Ding ausgehen kann. Die Grammatik liefert hier keine Hilfe. Vielleicht bedeutet das `Fore`-Wort, das in dem Wildschwein-Beispiel mit »töten« übersetzt ist, eben nicht »töten im Allgemeinen«, sondern speziell »töten durch einen Menschen«.

Wie würde denn ein Papua es ausdrücken, wenn ein Wildschwein etwas tötet? Und wie würde er im Satz »Der Lehrer tötet den Schüler« unterscheiden, wer Subjekt ist? Dies wäre analog zum Beispiel zu »Das Kind liebt die Frau«. Auch hier liefert die Grammatik im Deutschen keine Hilfe bei der Deutung des Satzes.

Auf jeden Fall halte ich es für eine begrüßenswerte Entwicklung, wenn auf Grund der dargestellten neuen Ansätze ein weiteres »Alleinstellungsmerkmal« des Menschen in Frage gestellt und die Entwicklung unserer Eigenschaften und Fähigkeiten aus Vorstufen im Tierreich einmal mehr untermauert wird.

**Antwort der Autoren:** Es ist seit etwa 25 Jahren bekannt und experimentell



belegt, dass Sätze wie »Das Buch liebt die Frau«, in denen ein Objekt einem Subjekt vorangeht, zu erhöhtem messbaren Verarbeitungsaufwand führen. Ob man diesen bewusst wahrnimmt, hängt von der jeweiligen syntaktischen Konstruktion ab und der Einfachheit der Korrektur

Den Satz »Das Kind liebt die Mutter« verstehen über 80 Prozent der deutschen Muttersprachler als einen Satz, in dem das Subjekt dem Objekt vorangeht. Oftmals wird die alternative Interpretation (Die Mutter als Liebende) nicht wahrgenommen. Im Fore ist nun aber beim Auftreten von zwei belebten Nomen immer das erste Subjekt und Handlungsträger. Die Struktur, die vorher hinsichtlich der Abfolge frei war, friert nun quasi ein. So löst das Fore den Konflikt zwischen freier Stellung der Satzglieder und der Belebtheit.

**Jürgen Volkheimer, Brauweiler:** Ein wesentlicher Unterschied zwischen Mensch und Tier ist, dass jeder geistig gesunde Mensch – also auch die Einwohner von Papua-Neuguinea – in der Lage ist, eine Grammatik wie die deutsche zu verstehen und zu erlernen. Dem Schimpansen wird das nie gelingen, und dieser Unterschied muss ja irgendwo im Gehirn repräsentiert sein. Demnach gibt es sehr wohl eine Notwendigkeit, von einem biologisch basierten Alleinstellungsmerkmal der menschlichen Sprachfähigkeit auszugehen, denn mit einer unterschiedlichen »Gedächtniskapazität« allein lässt sich das nicht erklären.

**Antwort der Autoren:** Es gibt mittlerweile genug Evidenz und innerhalb der wissenschaftlichen Gemeinschaft Konsens, dass auch jenseits der Menschen Grammatiken existieren. Viele Untersuchungen zu Vogelmelodien bestätigen etwa: Diese Tiere besitzen Fähigkeiten, die der menschlichen Grammatik gleichen. Wenn man also die Grammatik als eine Art Regelsystem definiert, welches die Arten der

Verknüpfung und die Art der Abhängigkeiten definiert, dann muss man tatsächlich feststellen, dass die tierische Kommunikation über Grammatiken verfügt. Natürlich sind diese oftmals nicht so reichhaltig, wie wir es von natürlichsprachlichen Grammatiken des Menschen kennen. Aber das ist dann wieder ein quantitativer und nicht ein qualitativer Unterschied.

**Paul Kalbhen, Gummersbach:** Beginnt nunmehr auch bei den Sprachwissenschaftlern die partikuläre Erbsenzählerei, indem sie nur die »Hardware« des Sprachgeschehens betrachten, wie man es bei den Neurowissenschaftlern bezüglich der Gehirnvorgänge gewohnt ist? Zitat: »Menschen verarbeiten nicht qualitativ anders, sondern nur quantitativ« (im Vergleich zum Affen); fehlt nur noch die »Erkenntnis«, dass kein essenzieller Unterschied zwischen Mensch und Tier besteht, sondern nur ein graduelles (siehe auch SdW 4/2011). Erfreulich für mich ist der konträre Artikel zur Linguistik »Sprachenvielfalt als natürliches Experiment« (S. 68), der ganzheitlich auch die »Software« der Sprachgrundlagen erfasst, nämlich den geistigen Hintergrund. Immerhin kristallisiert sich die menschliche Sprache nicht nur in der Literatur, sondern in der Kultur allgemein.

**Antwort der Autoren:** Aus unserer Perspektive sind die beiden Beiträge nicht konträr, sondern reflektieren unterschiedliche Aspekte zur Erfassung der Komplexität von Sprache. In diesem Sinne sollte man auch nicht die gegenwärtig stattfindenden Versuche, Sprache aus seiner Quelle (dem Gehirn) zu erklären, als Erbsenzählerei abtun und einer ganzheitlichen Betrachtung den Vorzug geben. Niemand würde doch ernsthaft einem theoretischen Chemiker, der sich mit dreiatomigen Molekülen beschäftigt und die dort stattfindenden Bindungskräfte und Regeln untersucht und berechnet, vorwerfen, dass er Erbsen

## FOLGEN SIE UNS IM INTERNET

facebook

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

YouTube

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

Google+

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

twitter

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

zählte, und ihm empfehlen, dass er sich lieber dem Ab- und Umbau organischer Substanzen in komplexen Systemen widmen sollte (etwa dem Abbau von Pestiziden im Weinanbau).

Darüber hinaus sollte man sich auch immer vor Augen halten, dass die menschliche Sprache ein Kommunikationsmittel ist, bei dem das erste Ziel sein muss, dass Sprache zwischen Sprechern im Sinne eines Sender-Empfänger-Modells erfolgreich übertragen wird. Menschliche Sprache kristallisiert sich weder in Literatur noch in der Kultur. Beide Bereiche sind Spielfelder, die sich der menschlichen Sprache bedienen. Sie sind aber nicht ihre notwendige Grundlage.

## BRIEFE AN DIE REDAKTION

... sind willkommen! Schreiben Sie uns auf [www.spektrum.de/leserbriefe](http://www.spektrum.de/leserbriefe) oder schreiben Sie mit Ihrer kompletten Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft  
Leserbriefe  
Sigrid Spies  
Postfach 10 48 40  
69038 Heidelberg

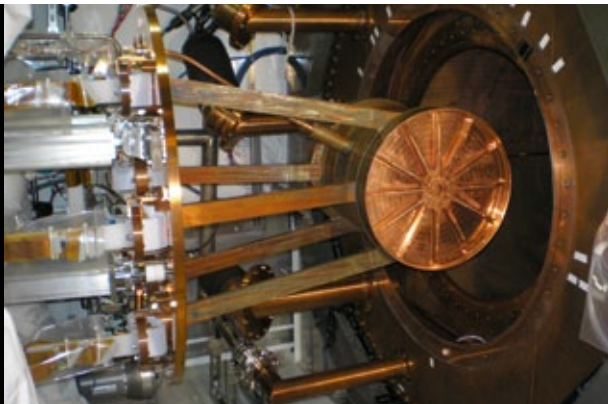
oder per E-Mail: [leserbriefe@spektrum.com](mailto:leserbriefe@spektrum.com)

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

PHYSIK

# Keine Spur vom neutrinolosen Doppel-Betazerfall

Das Herzstück des Experiments Exo-200 ist ein Gefäß mit 200 Kilogramm flüssigem Xenon (Bild). Teilchen aus bestimmten Zerfallsprozessen ionisieren die Xenonatome, was messbare Signale erzeugt.



EXO-200/SLAC, STANFORD UNIVERSITY

ersten Betazerfall freierwerdende Antineutrino im zweiten Betazerfall als Neutrino absorbiert werden und mit dem dort entstehenden Antineutrino zerstrahlen.

Gelänge es, ein solches Ereignis nachzuweisen, wäre das ein Hinweis auf eine Physik jenseits des derzeit gültigen Standardmodells. Immerhin können die Forscher mit dem jetzt vorgelegten Ergebnis die Halbwertszeit dieses Zerfallsprozesses eingrenzen, falls er denn stattfindet. Sie müsste den Daten zufolge mindestens  $10^{25}$  Jahre betragen, rund eine Million Milliarde Mal so viel wie das Alter des Universums. Das Ergebnis bestätigt Arbeiten einer anderen Forschergruppe, die im Rahmen des Experiments Gerda (Germanium Detector Array) ebenfalls keine bedeutsamen Hinweise auf den neutrinolosen Doppel-Betazerfall gefunden hat.

*Nature 510, S. 229–234, 2014*

Nach zwei Jahren Laufzeit haben die Physiker des internationalen Experiments Exo-200 (Enriched Xenon Observatory-200) eine erste Bilanz vorgelegt. Demnach haben sie keine statistisch bedeutsamen Hinweise darauf gefunden, dass es den so genannten neutrinolosen Doppel-Betazerfall gibt. Bei diesem hypothetischen Ereignis zerfallen in einem Atomkern

zwei Neutronen in zwei Protonen, wobei Elektronen, aber keine (Anti-) Neutrinos freigesetzt werden.

Möglich wäre das nur, falls das Neutrino sein eigenes Antiteilchen darstellt. Denn normalerweise wird beim Betazerfall eines Neutrons sowohl ein Elektron als auch ein Antineutrino frei. Wäre das Neutrino aber sein eigenes Antiteilchen, dann könnte das beim

**Spektrum** DER WISSENSCHAFT **DIE WOCHE**



**Deutschlands erstes wöchentliches Wissenschaftsmagazin**

Jeden Donnerstag neu! 52-mal im Jahr mehr als 40 Seiten News, Kommentare, Analysen und Bilder aus der Forschung

[www.spektrum.de/die-woche](http://www.spektrum.de/die-woche)

PALÄONTOLOGIE

# Die innere Heizung der Dinos

Dinosaurier waren weder wechsel- noch gleichwarm, sondern etwas dazwischen. Zu diesem Schluss kommen der Paläobiologe John Grady von der University of New Mexico (USA) und sein Team. Normalerweise unterscheiden Forscher ektotherme Tiere wie Reptilien, deren Körpertemperatur von der Umgebung abhängt und nicht vom Stoffwechsel, von endothermen wie heutigen Vögeln und Säugetieren, die ihre Körpertemperatur durch innere Wärmeproduktion konstant halten. Dinosaurier verfolgten offenbar einen Mittelweg: Sie trieben ihre Körpertemperatur durch Stoffwechsel nach oben, hielten sie aber nicht konstant, sondern nur höher als die Außentemperatur.

Grady und sein Team hatten die Knochen von 381 Tierspezies unterschiedlicher systematischer Gruppen

untersucht, darunter Fossilien von 21 Dinosaurierarten. Anhand der »Jahresringe«, die im Knochenquerschnitt erkennbar sind, und der Knochengröße bestimmten sie Alter und Masse der Tiere. Daraus errechneten sie die jeweiligen Wachstums- und Stoffwechselraten, um sie mit bekannten Daten heutiger Tiere zu vergleichen.

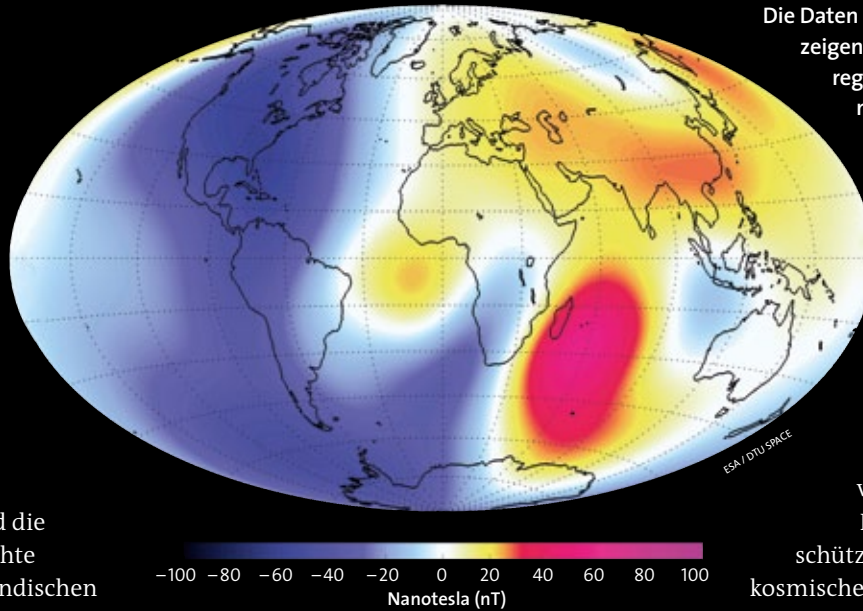
Laut den Analysen setzen Säuger ihre Nahrung etwa zehnmal schneller in Energie um als Reptilien und wachsen auch entsprechend schneller. Die Dinosaurier landeten mit ihrer Stoffwechselrate zwischen diesen beiden Gruppen. Sie hätten demnach schon in Ansätzen von einer geregelten Körpertemperatur profitiert, indem sie sich etwa rascher fortbewegten als Reptilien – allerdings ohne die Leistungen heutiger Säuger zu erreichen.

*Science 344, S. 1268–1272, 2014*

## Erdmagnetfeld wird nicht überall schwächer

Das Magnetfeld der Erde schwächt sich insgesamt ab – aber nicht überall gleichmäßig. Der stärkste Rückgang ist über der westlichen Hemisphäre zu verzeichnen, während die magnetische Flussdichte über dem südlichen Indischen Ozean sogar zunimmt. Zugleich verlagert sich der im Norden liegende Pol des Erdmagnetfelds in Richtung Sibirien.

Forscher leiten diese Ergebnisse aus Messdaten der europäischen Satellitenmission »Swarm« ab. Die drei baugleichen Satelliten starteten im November des vergangenen Jahres ins All und umkreisen die Erde seither in mehreren hundert



Die Daten der Swarm-Satelliten zeigen: Über manchen Erdregionen nimmt das Magnetfeld ab (blau), über anderen zu (rot).

Kilometer Höhe. Dort erfassen sie Stärke, Ausrichtung und zeitliche Veränderungen des Erdmagnetfelds. Die Mission ist auf eine Dauer von vier Jahren ausgelegt.

Das Erdmagnetfeld schützt unseren Planeten vor kosmischer Strahlung und geladenen Teilchen. Es hat in der Vergangenheit wiederholt seine Richtung umgekehrt.

Die letzte derartige Umpolung ereignete sich vor etwa 800 000 Jahren und die nächste steht möglicherweise kurz bevor – in geologischen Zeiträumen gemessen. Das beobachtete Schwinden des Erdmagnetfelds könnte damit zusammenhängen.

Pressemitteilung der Esa, 19. 6. 2014

## Korallenriffe: Anpassungsfähiger als gedacht

Das Great Barrier Reef vor der Nordostküste Australiens, das größte Korallenriff der Erde, ist in der Vergangenheit mit überraschend großen Temperaturschwankungen zurechtgekommen. Neuesten Berechnungen zufolge lagen die Wassertemperaturen dort vor 20 000 bis vor 13 000 Jahren deutlich niedriger als bisher angenommen.

Forscher um Thomas Felis vom Zentrum für Marine Umweltwissenschaften der Universität Bremen haben untersucht, welchen klimatischen Bedingungen das Riff nach Ende der letzten Kaltzeit ausgesetzt war. Hierfür entnahmen sie im nördlichen und südlichen Teil des Great Barrier

Reef mehrere Bohrkerne und analysierten darin fossile Nesseltiere der Steinkorallen-Untergattung *Isopora*. Das Alter der Fossilien bestimmten sie durch Uran-Thorium-Datierung, und anhand des Strontium-Kalzium-Verhältnisses in den Korallenresten ermittelten sie die jeweils vorherrschende Wassertemperatur.

Den Daten zufolge ist das Meer im Bereich des Great Barrier Reef nach Ende der letzten Kaltzeit erheblich kühler gewesen als heute. Im Norden lagen die Wassertemperaturen um etwa sieben Grad, im Süden um etwa neun Grad niedriger. Schuld daran sei unter anderem die Abschwächung des Ostaustralstroms gewesen, der

warmes Wasser nach Australien transportiert, schreiben die Autoren.

Die Wassertemperaturen rund um das Riff wiesen früher also ein steileres Nord-Süd-Gefälle auf und sind in den zurückliegenden Jahrtausenden auch stärker gestiegen als bisher angenommen. Wie die Fossilien zeigen, scheint das die Korallen jedoch in ihrem Wachstum kaum beeinträchtigt zu haben. Offenbar sind die Nesseltiere sehr anpassungsfähig. Allerdings könne man daraus nicht ableiten, dass das Riff auch weiter ansteigende Temperaturen vertragen werde, betonen die Forscher.

Nature Communications 5:4102, 10.1038/ncomms5102, 2014

ENERGIETECHNIK

## Windräder lohnen sich schon nach kurzer Zeit

**W**indkraftanlagen haben bereits wenige Monate, nachdem sie in Betrieb genommen werden, ihren »ökologischen Fußabdruck« kompensiert. Zu diesem Ergebnis kommen Karl R. Haapala und Preedanood Prempreeda von der Oregon State University (USA).

Die Forscher prüften die Energiebilanz von Windkraftanlagen mit einer elektrischen Leistung von zwei Megawatt. Dazu betrachteten sie, wie viele Ressourcen es kostet, die erforderlichen Baumaterialien zu gewinnen, daraus die Anlagen herzustellen, zum Einsatzort zu transportieren, aufzubauen, zu warten und schließlich wieder zu demontieren.

Die erforderliche Energie stammt größtenteils aus fossilen Brennstoffen, was klimawirksame Gase freisetzt. Dem stellte das Team die elektrische Energie gegenüber, die das Windkraftwerk in 20-jährigem Betrieb bereitstellt.

Wie die Analyse ergab, haben Windkraftanlagen nach fünf bis sieben Monaten Einsatz die Energie »zurückgezahlt«, die für ihre Herstellung und Wartung insgesamt nötig ist. Die restliche Betriebszeit, also mehr als 19 Jahre, liefern sie unterm Strich emissionsfreien Strom.

*International Journal of Sustainable Manufacturing 3, S. 170–185, 2014*

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / SIBILLE FRANZ



**Windkraftanlagen sind nicht zum Nulltarif zu haben – es kostet viele Ressourcen, sie herzustellen, aufzubauen und zu warten. Der Energieaufwand hierfür hat sich aber schon nach wenigen Monaten Betrieb amortisiert, ergeben Berechnungen.**

MEDIZIN

## Spenderneurone in Parkinsonpatienten bleiben dauerhaft intakt

**S**eit einigen Jahren behandeln Mediziner die Parkinsonkrankheit, indem sie den Patienten fötale Nervenzellen ins Gehirn einpflanzen, die abgestorbene Neurone ersetzen sollen. Diese Therapie hat offenbar einen langfristigen Nutzen: Noch 14 Jahre nach der Transplantation scheinen die fremden Zellen ihren Dienst zu verrichten und zeigen keine Degenerationserscheinungen, wie Ole Isacson von der Harvard University und seine Kollegen berichten.

Die Forscher untersuchten Hirngewebe von fünf Parkinsonpatienten,

die 4 bis 14 Jahre nach der Transplantation verstorben waren. Während die körpereigenen Zellen die parkinson-typischen Krankheitszeichen aufwiesen, wirkten die Fremdneurone gesund und funktionell intakt.

Parkinson entsteht, wenn im Mittelhirn Nervenzellen absterben, die den Neurotransmitter Dopamin ausschütten, so dass es zu einem Mangel an diesem Botenstoff kommt. Die eingebrachten fremden Neurone sollen neues Dopamin produzieren und dadurch den Verlust wettmachen. In vielen Fällen führt die Zelltransplan-

tation zu einem deutlichen Rückgang der Krankheitssymptome – mitunter so stark, dass die Patienten auf Medikamente verzichten können.

Den Königsweg zur Parkinsonbehandlung bietet die Therapie allerdings bislang nicht. Bei allen fünf untersuchten Patienten wurden die eingepflanzten Zellen aus den Hirnen von Föten gewonnen. Das ist erstens sehr aufwändig und zweitens ethisch hoch umstritten. Mediziner hoffen, in absehbarer Zeit auf künstlich erzeugte Stammzellen umsteigen können.

*Cell Reports 7, S. 1755–1761, 2014*

## DIGITALE TOTENMASKE EINES GEIERS

Auf einen bemerkenswert gut erhaltenen fossilen Geierkopf stießen Forscher in den Albaner Bergen südöstlich von Rom, den Überresten einer Kette heute inaktiver Vulkane. Offenbar schloss ihn vor etwa 30 000 Jahren ein pyroklastischer Strom ein, ähnlich wie die Funde aus der Eruption des Vesuvs im Jahr 79. Jedoch ist in keinem bekannten Fossil die Struktur des weichen organischen Gewebes so detailreich abgezeichnet wie bei diesem Exemplar. Mit Hilfe eines Computertomografen erstellten die Wissenschaftler ein 3-D-Modell, das sogar die dünne Nickhaut zeigt, das »dritte Augenlid« vieler Wirbeltiere.

*Quaternary Science Reviews 10.1016/j.quascirev.2014.04.024, 2014*



# Antioxidanzien mit Janusgesicht

Lange galten sie als Schutzschild gegen Krebs. Doch bei bereits vorhandenen Tumoren fördern Antioxidanzien deren Wachstum: Sie verhindern die Beseitigung schadhafter Zellen.

VON MAREN EMMERICH

Die Geschichte der Antioxidanzien klingt wie Aufstieg und Fall eines Gesundheitsmythos. In den 1960er Jahren als Heilsbringer und Garant für ein langes Leben gepriesen, erlitten die Radikalfänger in den letzten Jahren einen erheblichen Imageverlust. Zweifellos leisten Vitamin C und Co dem Organismus gute Dienste, und zu Recht empfehlen Ärzte, viel frisches Obst und Gemüse zu essen. Der Nutzen von Extragaben solcher Stoffe ist jedoch inzwischen umstritten – mindestens seit herauskam, dass Vitamin C das Leben von Fadenwürmern eher verkürzt als verlängert. Nachdenklich machten dann aber vor allem Studien an Menschen: Zum Beispiel erkrankten Männer, die jahrelang Vitamin E eingenommen hatten, eher an Prostatakrebs (siehe auch »Entzauberte Antioxidanzien«, SdW10/2013, S. 26–31).

Ein weiterer Paukenschlag kommt nun aus Schweden: Forscher von der Universität Göteborg entdeckten, dass zumindest zwei solche Substanzen das Wachstum von Tumoren fördern können, indem sie die natürlichen Kontrollmechanismen der Zellen aushebeln (*Science Translational Medicine* 6, 221ra15, 2014).

Antioxidanzien werden über ihre Wirkung definiert. Es handelt sich um chemisch teils recht unterschiedliche Substanzen, die extrem reaktive sauerstoffhaltige Moleküle – so genannte freie Radikale – einfangen und dadurch inaktivieren. Nach gängiger Meinung gehört zu ihren wichtigen Funktionen im Körper, zu verhindern, dass solche gefährlichen Verbindungen die Zellen schädigen. Einige Antioxidanzien, wie die Vitamine C und E, nehmen wir über die Nahrung auf. Andere kann der Or-

ganismus selbst herstellen, etwa das Hormon Melatonin.

Mittlerweile verdichten sich allerdings die Hinweise, dass Wissenschaftler in der Vergangenheit die Wirkung von Antioxidanzien fälschlich zu einseitig interpretiert haben, als sie diese Stoffe für uneingeschränkt gesund erklärten. Denn immer mehr Studien lassen annehmen, dass jene Substanzen nicht nur potenzielle Schadensbringer entfernen, sondern gleichzeitig auch Abwehrmechanismen der Zellen untergraben, die sich mit eben solchen angerichteten Schäden befassen. Hierdurch können Antioxidanzien fatalerweise sowohl altersbedingte Zellschäden als auch das Wachstum von Tumoren fördern.

## Ein Virus zum Inhalieren

Den letztgenannten Effekt vermuteten manche Wissenschaftler schon in den 1990er Jahren. Aber erst jetzt hat eine Forschergruppe um Martin Bergö vom Sahlgrenska-Krebszentrum der Universität Göteborg systematisch untersucht, wie sich die Zugabe verschiedener Antioxidanzien auf die Entwicklung von Lungentumoren bei Mäusen auswirkt. Die Forscher arbeiteten mit genetisch veränderten Mäusestämmen, die besonders leicht Krebs bekommen, wenn ein bestimmtes Adenovirus die entsprechenden Gene aktiviert. Damit es seine tumorfördernde Wirkung in den Atemwegen entfaltet, ließ man die Mäuse das Virus inhalieren. Ein Teil von ihnen erhielt dann mit der Nahrung entweder Vitamin E oder N-Acetylcystein, ein weiteres Antioxidanz. Dieses wirkt im Bronchialtrakt schleimlösend und wird darum bei entsprechenden Beschwerden als Medikament und Nahrungsergänzungsmittel

eingesetzt. Die verabreichte Menge an Vitamin E entspräche auf den Menschen übertragen etwa der Dosis in einer Multivitamin-tablette.

Nach zehn Wochen maßen die Forscher den Anteil von Tumorgewebe in den Lungen der Tiere. Bei den Mäusen, die Antioxidanzien erhalten hatten, war er im Schnitt ungefähr dreimal so hoch wie bei der Kontrollgruppe – bei der sich immerhin knapp zehn Prozent des Gewebes verändert hatten. Außerdem überlebten Erstere die Erkrankung im Mittel nur halb so lange.

Dieser deutliche Effekt trat nicht nur bei dem Mausmodell auf. Parallel hatten die Forscher in Kulturen von menschlichen Lungentumorzellen die gleichen tumorauslösenden Gene aktiviert und anschließend einigen davon jeweils eines der beiden Antioxidanzien zugesetzt. Die Zellkulturen reagierten hierauf ähnlich stark mit Tumorzellwachstum wie die Mäuselungen.

Chemisch unterscheiden sich Vitamin E und N-Acetylcystein erheblich. Wie können sie dann auf Zellen eine solch ähnliche Wirkung ausüben? Die schwedischen Forscher vermuteten einen vergleichbaren Einfluss beider Substanzen auf die Aktivität von Genen, die bei Tumoren oder deren Unterdrückung eine Rolle spielen. Als Nächstes untersuchten sie daher, welche Gene in den Tumorzellen der einzelnen Tiergruppen und Zellkulturen jeweils abgelesen wurden. Sie erhielten ein klares Bild: Sowohl bei Vitamin-E- als auch bei N-Acetylcystein-Gaben war ausgerechnet die Aktivität von Genen unterdrückt, die essenzielle Komponenten für Schutzmaßnahmen gegen oxidative Schäden liefern.

Wie die Forscher feststellten, produzierten die den Antioxidanzien ausge-

setzen Zellen wegen der dadurch reduzierten Konzentration an freien Radikalen vor allem geringere Mengen des schon recht lange gut bekannten Proteins p53, das die vielleicht wichtigste Tumorbremse des Körpers darstellt. p53 greift normalerweise ein, wenn das Erbgut einer Zelle geschädigt ist, und setzt Reparaturmechanismen in Gang. Erweisen sich die Maßnahmen als wirkungslos, treibt p53 die Zelle in den kontrollierten Selbstmord, Apoptose genannt.

In geschädigten Zellen ist das Protein p53 ein zentrales Glied eines univer-

sellen molekularen Kommunikationswegs. Deswegen dürfte sich die tumorfördernde Wirkung von Antioxidanzien keineswegs nur auf Lungentumoren beschränken. Welche anderen Krebsarten ähnlich reagieren, testen Bergö und Kollegen jetzt in einer Folgestudie.

Allerdings sollte man aus den neuen Ergebnissen nun nicht wiederum einseitige Schlüsse ziehen. Es wäre vor schnell, Antioxidanzien generell als gefährlich abzustempeln und Vitamingaben möglichst aus unserer Ernährung zu verbannen. Denn die Studie belegt zwar, dass solche Substanzen das

Wachstum von Tumoren stimulieren können. Die Wissenschaftler haben aber nicht untersucht, ob oder inwieweit Tumoren unter dem Einfluss von Antioxidanzien überhaupt erst entstehen. Möglicherweise vermitteln sie gesunden Zellen ja tatsächlich einen Schutz gegen freie Radikale. »Es ist durchaus möglich, dass Antioxidanzien die Wahrscheinlichkeit erhöhen, dass gesunde Personen gar keinen Krebs entwickeln«, sagt Martin Bergö. »Sobald allerdings ein kleiner Tumor vorhanden ist, tragen Antioxidanzien zu dessen Wachstum bei, indem sie freie Radikale einfangen und die Tumorzellen vom kontrollierten Selbstmord abhalten.«

**Viele Früchte und Gemüse sind besonders reich an Antioxidanzien, zu denen auch manche Vitamine zählen. Ob deswegen aber Vitamintabletten und andere Präparate der Gesundheit grundsätzlich nützen oder unter Umständen sogar schaden, ist schon seit Langem strittig.**

**Maren Emmerich** ist promovierte Biologin und Wissenschaftsautorin in Stuttgart.



FOTUA / WOLFRAM ZUMMACH

MEERESARCHÄOLOGIE

# An der Mündung der Urems

In der Mittleren Steinzeit lagen weite Bereiche zwischen Deutschland, England und Dänemark trocken. Archäologen und Geowissenschaftler rekonstruieren das heute in der Nordsee versunkene »Doggerland«.

VON URSULA WARNKE, DANIEL A. HEPP UND TOBIAS MÖRZ

Wer heute auf der Nordsee mit dem Schiff unterwegs ist, ahnt wohl nicht, dass er uraltes Kulturland überquert. Denn zehntausende Quadratkilometer, die heute bis zu 50 Meter unter dem Meeresspiegel liegen, waren einst ein Lebensraum für Jäger und Sammler. Diese heute als »Doggerland« bezeichnete Landschaft zu rekonstruieren und die versunkenen Spuren einer fernen Vergangenheit zugänglich zu machen, haben sich Archäologen, Geologen und Geophysiker

aus 24 europäischen Ländern auf die Fahne geschrieben.

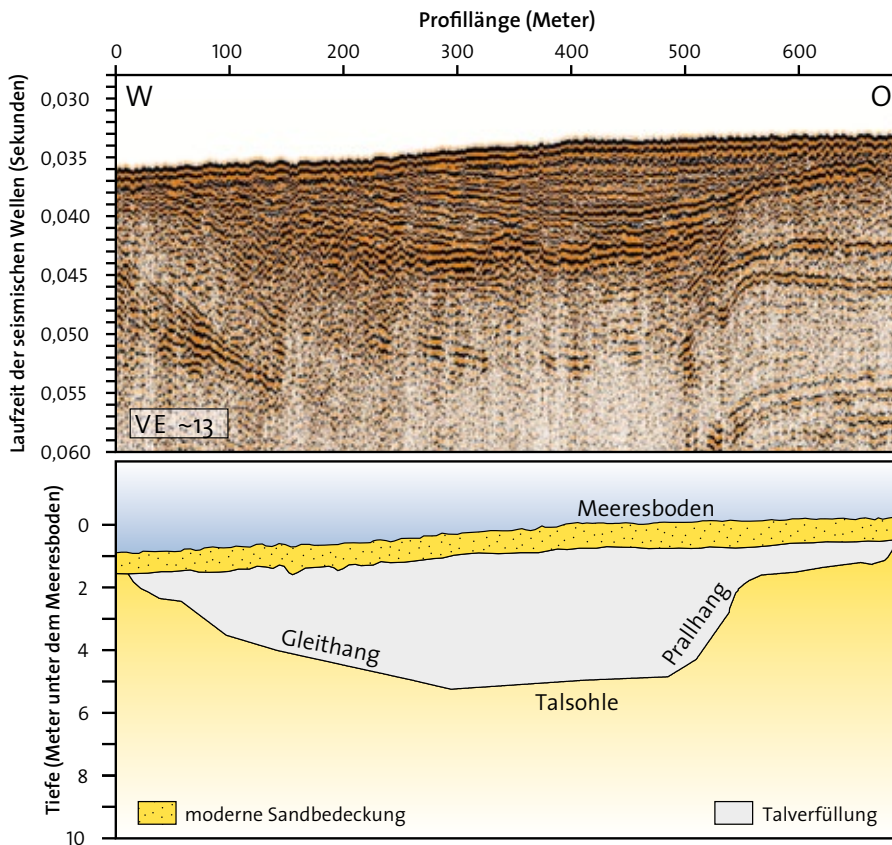
Benannt wurde das Gebiet nach der Doggerbank, heute eine lang gestreckte Untiefe, damals aber eine Hügelkette. Auch Helgoland bot sicher einen imposanten Anblick als weithin sichtbarer, rot leuchtender Sandsteinfelsen, ähnlich dem heutigen Ayers Rock in Australien. Faustkeile und Feuersteinklingen belegen die Besiedlung Doggerlands ab etwa 42.000 Jahren vor heute. Besonders spannend sind Funde aus organischem

Material – Wasser und Schlick haben den mikrobiellen Zerfall verlangsamt und beispielsweise Geschosspitzen aus Geweih und Knochen »konserviert«. Der älteste Fund dieser Art ist ein als Werkzeug hergerichteter Knochen, der auf etwa 6050 vor Chr. datiert wird.

Spätestens nachdem die so genannte Weichselkaltzeit vor etwa 25.000 Jahren ihren Höhepunkt überschritten hatte, wandelte sich mit dem Klima auch das Gebiet, das die heutige deutsche Nordsee sowie Norddeutschland







Die so genannte Reflexionsseismik lieferte die Daten (oben), um die Struktur eines unter dem Meeresboden verborgenen Flusstals aufzuklären (unten).

Wie das Elbe-Urstromtal mit seinen vier bekannten Zuflüssen Ems, Weser, Elbe und Eider am Übergang von der Weichseleiszeit zum Holozän verlief, erforschen deutsche Wissenschaftler. Land und Meer bildeten damals die nach der Untiefe »Doggerbank« als »Doggerland« bezeichnete Landschaft. Gestrichelte Linien deuten hypothetische, durchgezogene Linien die schon bekannten sowie anhand neuer geoarchäologischer Daten rekonstruierten Flussverläufe an.

umfasst, allmählich von einer eiszeitlichen Kaltwüste zu einem Lebensraum für Mensch und Tier. Die Gletscher zogen sich zurück und die Vegetation wandelte sich langsam von einer Tundra zu einer feuchten Graslandschaft mit Birkenhainen und Kiefernwäldern, die von einem Netz flacher Seen, Bächen und Flüssen durchzogen wurde, wie Schwemmlagerungen aus Sanden, Kiesen und Geröllen verraten. Auch die Küstenlinie verschob sich mit dem Anstieg des Meeresspiegels. Vor etwa 10 500 Jahren verlief sie etwa auf Höhe der Doggerbank.

Gegen Ende der Weichseleiszeit ließ der ansteigende Meeresspiegel auch das Grundwasser steigen, wodurch im Gezeitenbereich ein Moorstreifen entstand, der mit der Küstenlinie immer weiter ins Landesinnere wanderte. Bei Sondagen bergen die Forscher daher immer wieder so genannte Basalttorfe.

Küsten und Flussufer waren in der Prähistorie ein begehrter Siedlungsraum, denn dort boten die Jagd und der Fischfang ein gutes Auskommen. Gleichzeitig stellten die Fließgewässer ein natürliches Wegenetz durch Mar-

schen-, Moor- und Sumpfgebiete dar. Ihre Verläufe zu rekonstruieren, ist daher vordringliches Ziel eines Gemeinschaftsprojekts des Deutschen Schiffahrtsmuseums (DSM) in Bremerhaven und des Zentrums für Marine Umweltwissenschaften (MARUM) in Bremen. Im Unterschied zu den Mitarbeitern der relevanten Landesdenkmalämter dürfen Archäologen des DSM, das als forschendes Museum zur Leibniz-Gemeinschaft gehört, auch außerhalb der Zwölf-Meilen-Zone arbeiten. Als Ausgangspunkt bietet sich das Elbe-Urstromtal an, da hier mehrere Flüsse mündeten. Das gut 300 Kilometer lange und an ihrem schmalen südlichen Ende 25 Kilometer breite Tal weitete sich nach Norden hin auf 45 Kilometer trichterförmig aus. Gespeist wurde es südlich von Helgoland durch Zuflüsse der Elbe und Weser. Ein Zufluss nördlich von Helgoland gehörte vermutlich zur Eider.

### Die Mäander des steinzeitlichen Stroms

Eher zufällig entdeckten Geowissenschaftler des MARUM 2009 auf der Westseite des Elbe-Urstromtals eine flache Rinnenstruktur, die ungefähr 40 Kilometer nördlich der Nordseeinsel Juist auf das Elbe-Urstromtal zuläuft. Sie hatten dabei hochauflösende Reflexionsseismik eingesetzt. Dieses Verfahren erzeugt energiereiche Schallwellen, die von Grenzflächen zurückgeworfen werden. Deren Laufzeiten ermöglichen es – vergleichbar der Ultraschalldiagnostik in der Medizin – die geologischen Strukturen im Untergrund darzustellen. In mehreren Kampagnen ließ sich so der mäandrierende Verlauf eines Flusses verfolgen: Im Innern von Kurven lagerte sich auf Grund der geringeren Strömung Sediment ab, und es entstand meist ein flacher Gleithang, während am Ufer der Kurvenaußenseite die dort stärkere Strömung Material abtrug und häufig einen steileren Prallhang entstehen ließ. In dem schließlich berechneten Profil zeichnet sich so ein 500 und 1000 Meter breites Flusstal ab, das sich auf einer Strecke von 24 Kilometern mit

DEUTSCHES SCHIFFAHRTSMUSEUM (DSM)



An Bord der LEV Taifun untersuchen Forscher den Meeresboden mit geophysikalischen Methoden. Hier lassen sie das Sedimentsonar in die Tiefe, um dessen Struktur zu vermessen.

geringem Gefälle, etwa fünf bis sieben Meter tief eingegraben hatte. In seinem Mündungsbereich fächerte sich dieser Fluss schließlich zu einem Schwemmland in kleinere Arme auf.

Sechs Sedimentkerne liefern Auskunft über den geologischen Aufbau der Talverfüllung. Diese zeigen eine für das deutsche Nordseegebiet typische Abfolge von eiszeitlichen Sandablagerungen, in die auch die jüngere Mäanderstruktur eingeschnitten ist, gefolgt von basalen Torflagen, die mit Hilfe der Radiokohlenstoffmethode auf etwa 10 500 Jahren vor heute datiert werden konnten. Sie sind also bis zu 2000 Jahre älter als die schon bekannten Küsten-

torfe aus dem Gebiet. Offenbar war der Fluss bereits zu diesem Zeitpunkt über das Elbe-Urstromtal eng an den Meeresspiegel angebunden.

Im August 2013 startete eine fünftägige Expedition, um auch jenen Flussabschnitt zu finden, der die heutige Emsmündung mit dem Elbe-Urstromtal verband; zudem waren Archäologen des Deutschen Schiffahrtsmuseum in Bremerhaven an Bord, die bisher unbekannte Wracks ausmachen wollten. Zunächst wurden Suchprofile abgefahren, also erste Routen zur groben Orientierung, vergleichbar einem Suchgraben in der Archäologie zu Lande; dann anhand der Befundlage in den Erfolg ver-

sprechenden Zonen ein engeres Raster. Trotz günstiger Wetterbedingungen war das Unternehmen eine Herausforderung, denn der betreffende Bereich liegt im so genannten Verkehrstrennungsgebiet der Deutschen Bucht – einer Art Autobahn für Handelsschiffe. Der Flussverlauf konnte um weitere 24 Kilometer nach Süden bis an den Rand des Wattenmeers und bis kurz vor die Insel Juist kartiert werden.

Diese Daten können helfen, mögliche Siedlungsplätze für eingehendere Forschung auszumachen. Das enorme Potenzial des Bodenarchivs Nordsee demonstriert ein Schädelfragment, das niederländische Kollegen 15 Kilometer vor der heutigen Küste der Halbinsel Zeelands gefunden haben: Es stammt von einem Neandertaler, der dort vor mindestens 40 000 Jahren in der Altsteinzeit lebte. Doch was Jahrtausende überdauert hat, wird nun durch den Menschen bedroht. Wir benötigen Kabel für die Telekommunikation und Rohrleitungen zur Förderung von Gas und Öl, wir gründen Offshorewindparks und Aquakulturen, bauen Kies ab, machen Fahrrinnen frei und fischen mit Schleppnetzen. Bei all diesen Aktivitäten wird Meeresboden aufgerissen, abgetragen, verlagert oder Gebiete sind für die Forschung auf Jahrzehnte hin gesperrt. Seine Erforschung als Siedlungsraum ist eine vordringliche Aufgabe und sollte auf dieselben gesetzlichen Grundlagen gestellt werden, wie sie an Land auch herrschen: Vor jeder größeren Baumaßnahme sollten Archäologen das Gelände begutachten und gegebenenfalls die Möglichkeit erhalten, die Zeugnisse der Vergangenheit zu sichten und zu dokumentieren.

---

Die Ur- und Frühgeschichtlerin **Ursula Warnke** ist Direktorin am Deutschen Schiffahrtsmuseum in Bremerhaven und leitet das Projekt »Bedrohtes Bodenarchiv Nordsee«. Der Geowissenschaftler **Daniel A. Hepp** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am MARUM, **Tobias Mörz** lehrt an der Universität Bremen Marine Ingenieurgeologie. Beide erforschen am MARUM die eiszeitliche und nacheiszeitliche Entwicklung des Nordseeschelfs.

# Genetische Momentaufnahme

Große Teile der DNA scheinen keine Informationen für die Herstellung von Proteinen zu beinhalten. Aber jetzt stellte sich heraus, dass in solchen Bereichen Bauanleitungen möglicherweise wichtiger Peptide liegen.

VON SOPHIA GUTTENBERGER

Zellen stellen Proteine nach den im Erbgut vorliegenden Bauplänen her. Die in der DNA gespeicherten Erbinformationen (Gene) werden dabei während der Transkription zunächst in RNA-Stränge übersetzt. Nach verschiedenen Bearbeitungsschritten wandern diese als messenger-RNA (mRNA) zu den Ribosomen genannten Proteinfabriken, wo sie als Vorlage für die Produktion der verschiedenen Eiweißstoffe dienen – die Translation.

Wie man aber heute weiß, wird der größte Teil des menschlichen Genoms

in RNA transkribiert, ebenso wie bei anderen eukaryotischen Organismen. Dadurch entstehen zusätzlich zu den mRNAs »lange nichtkodierende RNAs« (lncRNAs, für englisch: long non-coding RNAs). Wie der Name schon sagt, gingen Wissenschaftler davon aus, dass solche RNAs keine Baupläne für Proteine enthalten. Doch dann entdeckten sie auch in ihnen so genannte offene Leseraster. So heißen Bereiche im Erbgut, die theoretisch eine Bauanleitung für ein Protein oder Peptid (kurzes Protein) liefern können. Bei Weitem nicht

alle davon werden jedoch tatsächlich in Proteine umgesetzt.

Offene Leseraster mit weniger als 300 RNA-»Buchstaben« (Nukleotide), bezeichnen Forscher als smORFs (für englisch: small open reading frames). Diese hielten sie bislang für solche nichtkodierende Sequenzen. Einige neuere Veröffentlichungen machen aber deutlich, dass smORFs durchaus in Proteine translatiert werden können. Zum Beispiel enthält die lncRNA pncr003:2L zwei smORFs, welche die Informationen für zwei Peptide von



JETZT IM  
**ABO**  
BESTELLEN  
UND 15%  
SPAREN

## DAS GANZE SPEKTRUM: Unsere Spezialreihen

Jede der drei **Spektrum Spezial**-Reihen erscheint viermal pro Jahr und kostet im Abonnement nur € 29,60 inkl. Inlandspporto (ermäßigt auf Nachweis € 25,60). Sie erhalten die Hefte noch vor Erscheinen im Handel und sparen dabei über 15 % gegenüber dem Einzelkauf!

So können Sie bestellen:

**Telefon: 06221 9126-743**  
**[www.spektrum.de/spezialabo](http://www.spektrum.de/spezialabo)**

Fax: 06221 9126-751 | E-Mail: [service@spektrum.com](mailto:service@spektrum.com)

Oder QR-Code  
per Smartphone  
scannen und  
Angebot sichern!



## Wird Fracking den Energiehunger stillen?

### Große Risiken der neuen Fördermethode für Gas und Öl

Je moderner die Welt wird, desto mehr Energie braucht sie – aber so modern, dass sie komplett auf erneuerbare umstellen kann, wird sie auf absehbare Zeit nicht werden. Also bleiben wir weiterhin auf fossile Quellen angewiesen. Die aber lagern leider nicht immer dort, wo sich der Bedarf ballt. Öltanker und Pipelines transportieren den Stoff über tausende Kilometer, auf denen vielerlei Gefahren drohen: Piraten entern die Tanker; Öl- und Gashähne werden zugedreht, weil Transitländer mit Lieferländern in Streit geraten; zwischen den Förderstaaten brechen bewaffnete Konflikte aus. Und last not least: In einigen Jahrzehnten werden die Ölquellen des Nahen Ostens, die scheinbar so unerschöpflich sprudeln, allmählich zur Neige gehen.

Darum haben die Vereinigten Staaten begonnen, das so genannte Fracking zu praktizieren, um auch bisher nicht wirtschaftlich ausbeutbare Lagerstätten in heimischem Schiefergestein zu erschließen: Man bohrt tiefe Löcher, presst große Mengen mit Chemikalien versetzten Wassers hinein und treibt dadurch Öl und Gas an die Oberfläche (Spektrum der Wissenschaft 8/2012, S. 72). Das ist zweifellos aufwändiger und umweltschädlicher als die herkömmliche Förderung fossiler Energieträger dort, wo sie ganz von selbst an die Oberfläche drängen. Dafür hat Fracking den Vorteil, dass man nicht auf politisch unsichere Lieferanten angewiesen bleibt.

Immerhin haben die USA damit die heimische Gasförderung in einem Jahrzehnt von fast null auf 40 Prozent ihres Gesamtverbrauchs erhöht. Deshalb mehren sich auch in Europa die Stimmen derer, die es ihnen nachmachen möchten. Zugleich jedoch beginnen angelsächsische Forscher Kosten und Nutzen des Fracking gegeneinander abzuwägen (*Science* 344, S. 1464–1475, 2014).

**Die Lektüre dürfte die Begeisterung europäischer Frackingfans einigermaßen dämpfen.** Ein Problem ist die Kontamination durch Methan, das aus Lecks in Bohrungen austritt, teils ins Trinkwasser gelangt und dort so hohe Konzentrationen erreichen kann, dass ein Streichholz ausreicht, um im Waschbecken ein Feuer zu entfachen. Trotz solch drastischer Effekte fällt es der US-Umweltbehörde schwer, die Verursacher zu überführen, da die Frackingfirmen ihre Daten nur ungern herausrücken.

Obwohl die Technologie vorerst als lokale Fördermethode genutzt wird, mahnen der australische Umweltforscher Thomas G. Measham und sein Kollege David A. Fleming, man möge rechtzeitig über Kosten und Nutzen eines global betriebenen Fracking nachdenken. Die Forscher schätzen, dass weltweit 300 Millionen Menschen in Gebieten leben, unter denen erschließbare Öl- und Gasvorräte schlummern. Entsprechend groß wären die wirtschaftlichen, demografischen und ökologischen Veränderungen, wenn man daran ginge, diese Quellen anzuzapfen (*Nature* 510, S. 473, 2014).

Bei künftig global praktiziertem Fracking entsteht zudem erneut das Problem der Transportwege. Kanadische Umweltforscher analysieren die Auseinandersetzungen um die geplante Keystone-XL-Pipeline, mit der kanadisches Frackingöl quer durch die USA bis nach Texas gelangen soll. Sie fordern ein Moratorium, bis offene Fragen umfassend geklärt sind (*Nature* 510, S. 465–467, 2014).

In mancher Hinsicht erinnert die allmählich heiß laufende Frackingdebatte an den Streit um die Atomenergie. Von ihr hieß es, sie werde als Brückentechnologie gebraucht, bis erneuerbare Energien die Versorgung komplett übernehmen. Doch nach der Katastrophe von Fukushima ließ sich der Öffentlichkeit nicht mehr erklären, warum man für eine befristete Technologie unbefristete Umweltfolgen in Kauf nehmen soll. Die gleiche Frage könnte sich erheben, wenn Fracking in großem Stil als fossiler Lückenbüßer eingeführt würde.



Michael Springer

jeweils weniger als 30 Aminosäuren Länge tragen. Beide sind an der Regulierung des Kalziumtransports im Herzen von *Drosophila* und damit an der Herzkontraktion beteiligt (*Science* 341, S. 1116–1120, 2013).

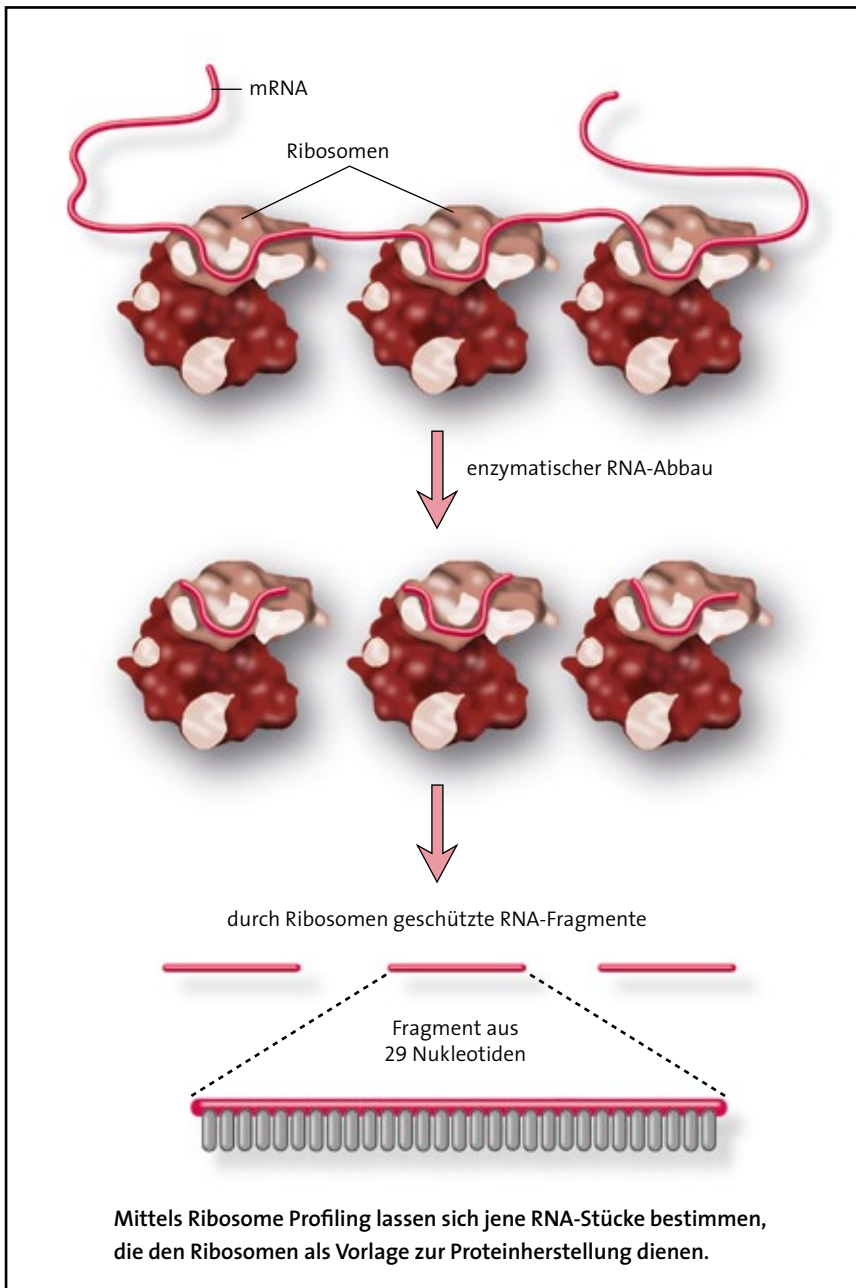
Warum kommen Wissenschaftler erst jetzt darauf, dass die lncRNAs Vorlagen für funktionelle Peptide liefern? Vorherige Studien dazu sind zumeist an der geringen Größe der Peptide, ihrer chemischen Zusammensetzung sowie ihrer Seltenheit gescheitert. Zudem betrachten die bisher üblichen Methoden ausschließlich die im Moment der Untersuchung vorliegenden Transkripte. Unklar bleibt dabei, welche davon tatsächlich in Proteine übersetzt und welche Regionen innerhalb der RNAs dazu abgelesen werden.

### Das Ribosom schützt die entscheidenden RNA-Abschnitte

Eine Lösung dieser analytischen Probleme bietet das so genannte Ribosome Profiling. Die Methode ermöglicht es, jene mRNA-Sequenzen zu identifizieren, die zum Ablesen an das Ribosom gebunden sind. Für eine solche molekulare Momentaufnahme werden die Proteinfabriken mit Cycloheximid behandelt. Dieses Antibiotikum unterbindet die Proteinsynthese an den Ribosomen und stoppt damit die Translation.

Die Ribosomen umschließen natürlicherweise während der Translation eine Region von rund 30 RNA-Nukleotiden und schützen damit diesen Teil beim nächsten Schritt des Ribosome Profiling: dem enzymatischen Abbau der RNA. Die erhalten gebliebenen RNA-Stücke werden danach sequenziert und lassen sich durch einen Abgleich mit Datenbanken ihrem exakten Ort im Genom zuordnen.

Jüngst nutzte ein deutsch-amerikanisches Forscherteam um Ariel Bazzini von der Yale University School of Medicine das Ribosome Profiling, um verschiedene Entwicklungsstadien von Zebrafischlarven mit bereits publizierten Datenbanken menschlicher lncRNAs zu vergleichen. Die Wissenschaftler identifizierten dadurch Hunderte



von lncRNAs, die kleine offene Leseraster (smORFs) besitzen und wohl die Vorlage für kurze Peptide liefern (*The EMBO Journal*, 2014, 10.1002/embj.201488411).

Des Weiteren verglich Bazzinis Team die smORFs von Mensch und Zebrafisch mit denen verschiedener anderer Spezies. Die Hälfte der in dieser Studie entdeckten translatierten Sequenzen stellte sich als sehr ähnlich zwischen den Arten und damit evolutionär hoch konserviert heraus. Die Forscher schlossen daraus, dass sie höchstwahrschein-

lich für wichtige Peptide kodieren. Derartige Peptide mit zentralen Funktionen sind bereits seit Jahrzehnten bekannt – etwa Neuropeptide und Hormone, wie zum Beispiel Insulin. Die meisten davon entstehen allerdings aus großen Vorläuferproteinen. Funktionen und biologische Bedeutung der von lncRNAs kodierten Peptide im lebenden Organismus sind hingegen noch offen.

**Sophia Guttenberger** ist Biologin und freie Wissenschaftsjournalistin in Nabburg.



In diesem Buch steht alles, was keiner weiß.

So wird Philosophie zum Vergnügen: Jim Holt sucht Antworten auf die wichtigste Frage unseres Universums.

# Es werde Licht!

Noch mit über 20 Jahren können von Geburt an blinde Menschen sehen lernen. Die bleibenden Einschränkungen sind geringer als erwartet, wie ein Projekt in Nordindien zeigt.

Von Pawan Sinha

## AUF EINEN BLICK

### AUGENLICHT FÜR INDIENS BLINDE KINDER

**1** In Indien leben **schätzungsweise 400 000 blinde Kinder**. Viele von ihnen erhalten keinerlei Ausbildung; besonders die Mädchen sind häufig Opfer von Übergriffen.

**2** Ein Teil dieser Kinder leidet seit Geburt am **grauen Star**, der im Prinzip operierbar ist. Obwohl die jahrelange Deprivation laut Lehrmeinung später kein Sehenlernen mehr zulässt, setzte der Autor als Neurowissenschaftler das Hilfsprojekt **Prakash** (»Licht«) durch.

**3** In vielen Fällen, sogar für einige über 20-Jährige, brachte eine Behandlung Erfolg. Der Verlauf des späten Seherwerbs – und dessen Grenzen – gibt Einblick in die **Funktionsweise des visuellen Systems**.

Unter anderem in Blindenschulen suchen Ärzte nach Kindern, denen ein chirurgischer Eingriff zum Sehen verhelfen kann.



Bei meiner Mutter stand an der Haustür eine kleine blaue Glasschale mit Kleingeld. Immer wenn sie ausging, nahm sie ein paar Münzen mit – für Arme auf den Straßen von Neu-Delhi. Diese Geste hat mich stets beeindruckt, denn die meisten wohlhabenderen Inder sind gegen den Anblick von Armut abgestumpft. Ein Jahr nach ihrem Tod, als ich meinen Vater wieder besuchte, stand die Schale immer noch da – eine der wenigen Dinge seiner Frau, die er behalten hatte. Ich ahnte nicht, dass dieser Besuch von 2002 mein Leben verändern würde.

An einem ausgesprochen kalten, ungemütlichen Winternachmittag wollte ich damals einen Freund besuchen und steckte einige Münzen aus der blauen Schale ein. Bei einem Halt des Taxis an einer Ampel bemerkte ich am Straßenrand eine zusammengekauerte kleine Familie. Ich kurbelte das Fenster herunter und winkte sie zu mir.

Langsam kam das Grüppchen heran. Die beiden ausgezehrt ungenährten ungefähr sechs- oder siebenjährigen Kinder, barfuß und in dünnen Baumwolllumpen, klammerten sich an den Sari der Mutter. Sie waren blind: Als sie zitternd am Auto



EILEEN HOHAUTH-LEMONICK

standen, sah ich deutlich die Katarakte in ihren Augen. Das verblüffte mich, kannte ich doch den grauen Star bisher nur bei alten Menschen. Ich gab der Frau die Münzen, und wir fuhren weiter. Doch die unglücklichen Gesichter konnte ich nicht vergessen.

Was ich dann über blinde Kinder in diesem Land herausfand, war entsetzlich. Geschätzte 400 000 Betroffene gibt es in Indien. Kommt extreme Armut hinzu, führen diese jungen Menschen ein höchst elendes Leben. Nach Schätzungen der Weltgesundheitsorganisation sterben bis zu 60 Prozent aller erblindeten Kinder innerhalb eines Jahres. Nicht einmal jedes zehnte erhält zumindest ansatzweise eine Schul- oder Ausbildung, am wenigsten die Mädchen. Sie sind oft komplett ans Haus gefesselt, werden vernachlässigt, misshandelt und nicht selten sexuell missbraucht.

### **Blindes Elend aus purer Armut**

Noch mehr schockierte mich zu lesen, dass dieses Elend in vielen Fällen nicht sein müsste, denn fast 40 Prozent der Erblindungen ließen sich verhindern oder medizinisch behandeln. Viele der Kinder zumal aus armen Familien erhalten jedoch keinerlei Behandlung – schon allein deswegen, weil sich die therapeutischen Einrichtungen weit gehend auf die Großstädte beschränken und zwei Drittel der Bevölkerung auf dem Land lebt.

Ich mochte diese Zahlen kaum glauben, denn ich war in Indien aufgewachsen und hatte das alles nicht geahnt. Für Leute wie mich galt das Land als aufsteigende Wirtschaftsmacht. Um mich der Wahrheit zu vergewissern, reiste ich bald wieder in die Heimat. Diesmal besuchte ich Dörfer rund um Delhi sowie im Bundesstaat Andra Pradesh im Südosten des Subkontinents und im Gangesdelta von Westbengalen. So viele blinde Kinder, wie ich dort überall sah, musste ich den Statistiken wohl Glauben schenken. Angesichts der verzweifelten Armut in diesen Dörfern begriff ich, wieso dermaßen viele von ihnen nie ärztliche Hilfe erhalten.

Somit brachte mich das Erlebnis in Neu-Delhi auf einen neuen Weg, der noch lange nicht zu Ende ist: Ich beschloss, solchen Kindern zum Sehen zu verhelfen. Außerdem wurde mir bald klar, dass ein derartiges Vorhaben zugleich wichtige wissenschaftliche Aspekte erhellen kann, die mich als Forscher interessierten. Denn wie das Gehirn Sehen lernt, zählt zu den schwierigsten Fragen der Sinnes- und Hirnforschung.

Dieses Gebiet beschäftigt mich, seit ich als Doktorand in die USA nach Cambridge an das Massachusetts Institute of Technology (MIT) kam. Immer noch wissen die Forscher wenig Genaues darüber, wie aus dem Sammelsurium an Eindrücken – Farben, Helligkeiten, Strukturen –, die auf die Netzhaut treffen, zusammenhängende Objekte und bedeutungsvolle Bilder werden. Wie organisieren sich zum Beispiel aus dem bunten Wirrwarr einer Tanzszene die Umrisse von Ar-

men und Körpern der tanzenden Mädchen und die Muster ihrer Schottenröcke (siehe Kasten rechts)?

Um diese Prozesse zu durchschauen, arbeiten manche Forscher mit Säuglingen und Kleinkindern. Nur verstehen die kleinen Probanden natürlich nicht so leicht, was man von ihnen will, können nur bedingt antworten und bleiben nicht lange wachsam. Erschwerend kommt hinzu, dass in diesem Alter die Hirnsysteme für Motivationen, Aufmerksamkeit und selbst die Kontrolle von Augenbewegungen noch reifen. Mit älteren Kindern müssten solche Tests leichter sein.

Ich weiß noch genau, wie aufgeregt ich war, als mir klar wurde, dass die Realisationen der beiden Zielsetzungen – blinden Kindern Hilfe zu leisten und wissenschaftliche Erkenntnisse zu gewinnen – voneinander abhingen. An jungen Menschen, die erst spät sehen lernten, ließe sich der Prozess des Seherwerbs erforschen, und das Forschungsprojekt würde zugleich die Behandlung der indischen blinden Kinder finanzieren. Zurück in Amerika erläuterte ich meinen Kollegen, wie beides zu vereinbaren sei. Die meisten von ihnen waren begeistert, einige warnten mich allerdings, mich auf ein derart ambitioniertes Projekt einzulassen, solange dafür keine Gelder bewilligt waren.

Doch ich wagte es, beim National Eye Institute der USA einen Forschungsantrag einzureichen. Die Einrichtung gehört zu den amerikanischen National Institutes of Health, NIH, in Bethesda (Maryland). Etwas unsicher war ich schon, ob die Regierungsorganisation Geld für ein Projekt ausgerechnet in Indien aufbrächte. Außerdem würde die Durchführung eine ausgefeilte Logistik erfordern, und es gab keinerlei Erfahrung, ob das Ganze überhaupt machbar wäre. Aber die Zuständigen erkannten das Potenzial des Vorhabens und bewilligten zu meiner

großen Freude für den Anfang ein Stipendium, um erst einmal die Möglichkeiten der Umsetzung näher zu erkunden.

Als Erstes suchten wir als Partner in Indien eine Klinik für Augenchirurgie, wo die Kinder nach internationalen Standards versorgt würden. Die Wahl fiel auf das Dr. Shroff's Charity Eye Hospital (SCEH) in Neu-Delhi. Seine pädiatrischen Abteilungen sind hervorragend ausgestattet, und die Ärzte der Klinik waren sehr angetan von der Idee, blinden Kindern zu helfen und damit gleichzeitig zur Forschung beizutragen.

Schließlich brauchten wir noch einen klangvollen Namen, der zu beiden Missionen passte. Auf Sanskrit, jener alten indoeuropäischen Sprache, heißt Licht »prakash«. So gründeten wir das Projekt Prakash, zugleich eine einprägsame Alliteration. Es sollte sowohl ins Leben von Blinden als auch in die Wissenschaft mehr Licht bringen.

Nun konnten wir darangehen, Kinder und Jugendliche ausfindig zu machen, die für das Projekt in Frage kamen. Dazu richtete ein Team von Augenoptikern, Augenärzten und anderen Mitarbeitern des Gesundheitswesens in ländlichen Gebieten Stationen ein, in denen es stark sehbehinder-

### **Ein Forschungsprojekt würde zugleich die Behandlung von blinden Kindern finanzieren**



## Die visuelle Welt gewinnt Gestalt

Wenn ein älteres Kind die Welt zum ersten Mal sieht, vermag es sie nicht zusammenzusetzen. Das Foto der tanzenden Mädchen bestünde einfach aus vielen Feldern (angedeutet im mittleren Bild) unterschiedlicher Farben, Helligkeiten und Muster.

Aber wenn Bewegung stattfindet, lernt das Gehirn nach einiger Zeit, Zusammengehöriges als Einheit zu erkennen, wie die Umrisse der Tänzerinnen (rechts). Nach Monaten gelingt es schließlich, auch unbewegte Bilder zu verstehen.



te und blinde Kinder – sowie vereinzelt junge Erwachsene – einem ersten Check unterzog. Die Experten ermittelten die Art des Defekts und dessen Therapierbarkeit – ob durch Brechungsfehler des Auges bedingt, durch eine Infektion oder zum Beispiel durch Eintrübung der Linse (grauer Star) oder Vernarbungen in der Hornhaut nach einer Verletzung. Im nächsten Schritt wurden für das Projekt geeignete Personen ausgewählt und in besagter Klinik in Neu-Delhi nochmals gründlich untersucht, einschließlich Spiegelung des Augenhintergrunds, Ultraschallaufnahmen von den Augen und Feststellung des allgemeinen Gesundheitszustands sowie Eignung für eine Operation. In Rücksprache mit den Erziehungsberechtigten wurde dann ein Termin für den Eingriff festgelegt.

### Die große Frage: Wie gut lernt das Gehirn spät noch Sehen?

In den meisten Fällen handelte es sich um eine Staroperation. Bei Kindern ist diese wesentlich aufwändiger als bei Erwachsenen, denn die kleinen Patienten benötigen eine Vollnarkose und anschließend intensive Betreuung. Der Eingriff selbst ist ansonsten gleich: Die alte Linse wird zertrümmert, die Stücke werden durch eine winzige, oben oder seitlich in die Hornhaut geschnittene Öffnung herausgeholt, und eine Kunststofflinse wird an Stelle der alten eingesetzt. Die rund 300 Dollar für die Behandlung trägt unser Projekt. Auch kommen die Kinder später regelmäßig zu Nachuntersuchungen.

Bis endlich die ersten Staroperationen stattfinden konnten, plagte mich die Sorge, ob die Hilfe für diese Kinder nicht zu spät kam. Fachleute glaubten damals, dass sich Sehenlernen auf eine so genannte kritische Phase beschränkt, auf

eine begrenzte Zeitspanne in sehr früher Jugend. Wenn Augen und Schaltkreise des visuellen Systems in dieser Zeit nicht intensiv genutzt würden, so dachte man, könne sich das Sehen nicht mehr richtig entwickeln. Für diese Auffassung gab es gute Gründe. Bereits 1728 beschrieb der englische Chirurg William Cheselden (1688–1752) einen Jungen mit grauem Star auf beiden Augen seit der Geburt. Dem 13-jährigen wurde der Star gestochen, also die getrübbte Linse mit einer Nadel aus dem Lichtweg geschoben, sein Sehvermögen erschien danach jedoch höchst mangelhaft.

Viel später zeichneten Tierexperimente ein ähnlich hoffnungsloses Bild. In den 1960er Jahren entdeckten der schwedisch-amerikanische Neurophysiologe Torsten Wiesel und sein kanadischer Kollege David Hubel, dass bei Katzen eine frühe visuelle Deprivation bleibende Entwicklungsdefekte in der Sehrinde des Gehirns bedingt. Diese Arbeiten wurden 1981 mit dem Medizinnobelpreis ausgezeichnet.

Trotzdem war ich dafür, den Versuch zu unternehmen und die Kinder zu operieren. Vielleicht war ja die Methode der Starbehandlung zu Cheseldens Zeit einfach zu grob gewesen und man hatte dabei anderes Augengewebe verletzt. Und was die Tierexperimente betrifft, so hatten die Forscher dafür meist eines der Augen für einige Zeit zugenäht; das andere blieb offen. Die Prakash-Kinder waren aber auf beiden Augen blind. Und erstaunlicherweise treten bei Tieren auf dem verschlossenen Auge stärkere Sehschäden auf, wenn das andere sehen konnte, als wenn beide Augen nicht funktionierten.

Der amerikanische Psychologe und Philosoph William James (1842–1910), der in Amerika die Wissenschaft der Psychologie begründete, nahm an, dass ein neugeborenes Baby

die Welt zunächst als buntes, schwirrendes Durcheinander sieht – ein Zustand, dem das Heranreifen des Sehsystems dann ein Ende setzt. Würden die Prakash-Kinder Erfahrungen machen ähnlich diesem postulierten frühen Zustand? Würden sie sich anfangs von Farben, Formen und wahrgenommener Bewegung geradezu bombardiert fühlen, ohne Zusammenhänge zu erkennen? Und wie würden die schon erwachsenen Patienten die Situation erleben? Konnte ein so lange depriviertes visuelles System mit dem anfänglichen Chaos fertig werden und den einströmenden Bilderwust mit der Zeit zu etwas Sinnvollem organisieren?

Hierbei geht es sogar um Organisation auf zweierlei Art. Zum einen muss all das, was man sieht, einander zugeordnet werden: Es kommt darauf an, die unterschiedlichen bildlichen Komponenten eines Objekts zu etwas in sich Geschlossenem zusammenzuführen – also seine Farben, Umrisse, Flächen und so weiter als zu einer Einheit gehörend zu erkennen und es damit gegen den Hintergrund sowie andere Objekte abzugrenzen. Dieser Vorgang heißt intramodale Organisation; er meint das Herstellen von Beziehungen innerhalb derselben Sinnesmodalität, in dem Fall des Sehens. Zweitens gibt es noch die intermodale Organisation, nämlich den Austausch des Sehens mit anderen Sinnen, gewissermaßen eine Übertragung zwischen verschiedenen Wahrnehmungsarten. Wir erkennen einen Würfel, den wir sehen, als solchen wieder, wenn wir ihn mit den Händen fühlen, und umgekehrt.

### Wie Collagen ohne erkennbaren Sinn

Menschen mit normalem Sehvermögen unterscheiden in der Umwelt und auf Bildern mühelos einzelne Objekte. Wir brauchen nur die Augen zu öffnen, und die Welt gestaltet sich. Doch bei frisch operierten Kindern des Prakash-Projekts ist das zunächst keineswegs so. All die Farb- und Helligkeitsfelder, die sie nun plötzlich erstmals wahrnehmen, vermögen sie nicht zu sortieren, in größere Zusammenhänge zu bringen und zu organisieren. Verschiedene Merkmale desselben Objekts sind für sie getrennte Sachen. Zeigt man ihnen gar zwei gezeichnete, sich überlappende Quadrate, glauben sie, es handele sich um mehrere bizarr geformte Strukturen (Kasten rechts). Ein Ball mit verschiedenen Farbfeldern bildet für sie keine Einheit. Schatten bedeuten jeweils etwas Eigenes. Die sichtbare Welt muss den Kindern wie eine Collage aus unzusammenhängenden Einzelteilen vorkommen, etwa wie ein abstraktes Gemälde. Wenn sich alles derart stark zergliedert, ist es natürlich schwer möglich, Objekte auszumachen.

Seit fast 100 Jahren fragen sich Forscher, welche Merkmale oder Hinweisreize wir normalerweise verwenden, wenn wir die Teile eines komplexen Bildes oder einer vielgestaltigen Szenerie korrekt auseinanderhalten. Nach Ansicht der Gestaltpsychologie verfügt das Gehirn anscheinend über Prinzipien oder Heuristiken, nach denen es die Gruppierungen

vornimmt. Zum Beispiel folgt das visuelle System der Regel, dass getrennte Linien, die gerade hintereinander liegen, offenbar eine zusammengehörige Linie bilden, in der Annahme, es handele sich um eine Kontur vom selben Objekt.

Keine dieser Gestaltheuristiken scheinen die Prakash-Kinder gleich nach der Operation zu nutzen. Das ändert sich aber nach einiger Zeit. An den ersten Patienten, bei dem wir dies erkannten, einen bereits 29 Jahre alten Mann, erinnere mich noch gut. Nennen wir ihn SK. Er lebte am Rand Neu-Delhis in einem überfüllten Heim für blinde Jugendliche. SK war ohne Augenlinsen zur Welt gekommen. Die sehr seltene Fehlbildung heißt fachlich angeborene Aphakie (nach griechisch phakos für Linse). Sein Sehvermögen war wesentlich schlechter als jener Grenzwert, ab dem in den USA Menschen als blind gelten. SK benutzte einen weißen Blindenstock und las in Brailleschrift. Eigentlich hätte er nur eine Brille benötigt, die die fehlenden Augenlinsen ersetzt, doch die 20 Dollar dafür hatten ihm nie zur Verfügung gestanden.

Wir verschafften ihm die Brille und prüften dann seine neue Sehfähigkeit. Zu unserer – und auch seiner – Enttäuschung war der junge Mann vom Ergebnis nicht besonders angetan. Seine visuelle Welt, so ergaben unsere Tests, bestand nun aus einem Durcheinander von unterschiedlich farbigen und hellen Flecken. Fast nichts davon ließ sich zu Einheiten zusammenkitten. Sogar einfachste geometrische Strichzeichnungen machten ihm große Mühe. Überlappten sich gar ein Kreis und ein Viereck, erkannte er beides nicht, sondern hielt das für mindestens drei merkwürdige, ineinander verkeilte Strukturen – obwohl er aus seiner haptischen Erfahrung die Konzepte für Kreis und Viereck kannte. Auf Fotos Objekte auszumachen, war noch schwieriger. Mit Farbnuancen und Schatten, Überlappungen und Verdeckungen kam er überhaupt nicht zurecht. Jede abweichende Tönung oder Helligkeit erschien ihm als separates Objekt.

Was ihm dann aber half, Struktur in dieses Chaos zu bringen, war Bewegung. Videoaufnahmen zeigen, wie er Gesehenes plötzlich besser verstand, wenn sich Objekte als Ganzes vor einem Hintergrund verschoben oder drehten.

Wir begleiteten den Mann monatelang intensiv. In dieser Zeit lernte er nicht wirklich, statische Abbildungen oder Objekte richtig zu interpretieren. Wir und er wollten bereits die Hoffnung aufgeben, dass sich so lange nach einer blinden Kindheit noch ein befriedigendes Sehvermögen einstellen kann, als sich das Blatt anderthalb Jahre nachdem er ein Brillen bekommen hatte, wendete. Schon länger hatte SK kein spezielles Sehtraining mehr erhalten. Nur die normale Alltagswelt wirkte auf ihn ein. Doch nun begann er zu seiner Freude auch starre Bilder zu verstehen.

Ähnliche Verläufe verzeichnen wir bei den behandelten Kindern und Jugendlichen immer wieder. Erst viele Monate nach dem Eingriff gelingt es ihnen schließlich doch, das Ge-

## Gleich nach der Operation scheinen die Kinder Gestaltheuristiken noch nicht zu nutzen

sehene zu sinnvollen Objekten zu organisieren. Wie rasch sie das schaffen, hängt offenbar von ihrem Alter ab: Je jünger sie sind, um so eher lernen sie dies.

Was mag dem zu Grunde liegen? Wir vermuten, dass Bewegung als »Lehrer« wirkt. Zunächst erfasst das visuelle System dadurch nur, dass zusammengehört, was sich zusammen bewegt, also dass sich bestimmte Elemente als Einheit verhalten und von anderem trennen lassen. Nach einiger Zeit lernt das Sehsystem hieraus, still stehende Attribute – wie Farben oder Orientierungen von Flächen, Linien und Schatten – zusammenzubringen, sie somit zu Objekten zu gruppieren und unbewegte Dinge als solche zu erkennen.

### Übertragung zwischen den Sinnen

Eine völlig andere Leistung ist die »intermodale« Übertragung zwischen den verschiedenen Sinnen. Im Normalfall steht das Sehsystem mit dem Hör-, Tast-, Riech- und Geschmackssinn in Verbindung. Seit Jahrhunderten erörtern Wissenschaftler diese Wechselwirkungen. Berühmt wurde in dem Zusammenhang eine Frage, mit der sich 1688 der irische Naturphilosoph William Molyneux (1656–1698) an den englischen Philosophen John Locke (1632–1704) wandte. Er stellte sich vor, ein blind geborener Mann hätte gelernt, mit den Händen eine Kugel und einen Würfel zu unterscheiden, beide aus demselben Material. Wenn er nun das Augenlicht erhielte und die beiden Gegenstände lägen vor ihm, ohne dass er sie berühren dürfte – würde er sie als solche erkennen, also wissen, welcher die Kugel und welcher der Würfel ist?

Locke übernahm die Problemstellung Anfang der 1690er Jahre in eine Ausgabe seines Werks »An Essay Concerning Humane Understanding« (Versuch über den menschlichen Verstand). Letztlich geht es um grundlegende Zusammenhänge: Wie verbinden wir die verschiedenen Sinne zu einer einheitlichen Wahrnehmung von Realität? Können wir schon von Geburt an die Welt in dieser Weise mental abbilden, oder müssen wir das erst durch Erfahrung lernen? Und falls ja, muss dies in der Kindheit geschehen, oder ist es unter Umständen noch in einem späteren Alter möglich? Weitere empirische Philosophen griffen diese Aspekte auf, darunter George Berkeley (1685–1753) und David Hume (1711–1776). Viele Themen der modernen Neurowissenschaft fußen letztlich auf ihren Abhandlungen.

Die Prakash-Kinder geben uns Gelegenheit, uns mit Molyneux' Frage direkt zu befassen. Zum Beispiel lassen wir sie in den ersten Tagen nach der Staroperation ein einfaches Objekt vor einem leeren Hintergrund entweder sehen oder fühlen. Anschließend sollen sie es allein mit dem anderen Sinn unter zwei verschiedenen Objekten wiedererkennen.

Der typische Ablauf sei an dem achtjährigen YS vorgestellt. Der aufgeweckte Junge hatte von Geburt an beidseits schwer eingetrübte Linsen. Wie die meisten unserer jungen Patienten fühlte er sich am zweiten Tag nach der Operation wieder wohl und war bereit, mit den Wissenschaftlern zu arbeiten.

In dem Test verhinderte ein Sichtschirm, dass er seine Hände sah. Er durfte einen Gegenstand befühlen, der ihm

dann wieder weggenommen wurde. Anschließend gab man ihm zwei Objekte in die Hände – und er wusste immer, welchen er zuvor gehabt hatte und welchen nicht. Gleiches schaffte er fehlerfrei auch allein mit den Augen. Doch die Sinnesübertragung gelang ihm nicht: Visuell konnte er nicht zuordnen, welchen Gegenstand er vorher gefühlt hatte. Vier weitere Kinder, die den gleichen Test machten, scheiterten ebenfalls an dieser Aufgabe.

Demnach ist zu vermuten, dass zunächst kein Informationsfluss vom Tast- zum Sehsinn stattfindet, wenn Sehen möglich wird. Molyneux' Frage wäre demnach zu verneinen. Aber dabei bleibt es glücklicherweise nicht. Denn als wir YS nur eine Woche später nochmals die gleiche Aufgabe vorlegten, gelang ihm die Sinnesübertragung zu unserer Verblüffung fast fehlerfrei. Genauso schnell entwickelten sich zwei andere getestete Kinder. Weil es in der Regel höchstens ein paar Wochen dauert, bis ein Kind anfängt, einen zuvor gefühlten Gegenstand mit den Augen wiederzuerkennen,

### Puzzleteile statt ganzer Objekte

Hier zeichnete ein frisch operierter Junge nach, was er auf den Bildern sah (rote und grüne Linien). Bei den beiden sich überlappenden Quadraten empfand er jeden der drei Bereiche als eigene Struktur. Die gefleckte Kuh nahm er nicht als etwas Zusammengehöriges wahr, sondern als getrennte helle und dunkle Felder, genauso die Schatten. Ebenso wenig konnte er den Ball erkennen.



MIT FÖHL GEN DES PROJEKT PRAKASH



In Teststationen auf dem Land werden sehbehinderte und blinde Kinder auf mögliche Eignung für die Behandlung ausgewählt.



Eine gründliche Augenuntersuchung in der Klinik entscheidet über das weitere ärztliche Vorgehen.

scheint es, als ob lediglich eine latente Bereitschaft geweckt werden muss, Sinnesverknüpfungen rasch zu lernen.

Blindsein von Geburt an über viele Jahre verschließt nach diesen Befunden also nicht grundsätzlich spätere visuelle Entwicklungen, darunter solche von recht anspruchsvollen Leistungen. Für die Wissenschaft ist das eine wertvolle Erkenntnis, weil demnach die erforderliche neuronale Plastizität noch in der späten Kindheit, ja sogar bei jungen Erwachsenen vorhanden zu sein scheint. Höchst erfreulich ist dies besonders aus medizinischer Perspektive. Lange hieß es, gerade auch in Indien, dass ein älteres blindes Kind von einer Staroperation oder anderen möglichen Behandlung – etwa einer Hornhauttransplantation – ohnehin nicht mehr profitiert.

Auf Grundlage der Anfangserfolge erarbeiteten wir im Rahmen des Prakash-Projekts ein Forschungsprogramm zur visuellen Entwicklung in später Kindheit und Jugend, das noch läuft. Die Teilnehmer sind zwischen 6 und 20 Jahre alt. Den vorläufigen Testergebnissen zufolge gibt es tatsächlich elementare Dimensionen des Sehens, in denen die Kinder wohl nicht mehr das Normalniveau erreichen. Das betrifft wichtige Aspekte wie die Sehschärfe, also die Güte der Auflösung, oder die Bewertung räumlicher Kontraste, nämlich Schärfewechsel bei verändertem Bildkontrast, und die optische Stabilität. Zumindest lassen sie ein Jahr nach der Operation noch zu wünschen übrig.

Dagegen verbessern sich höhere visuelle Funktionen nach den ersten Erkenntnissen markant. Besonders eindrucksvoll

ist, wie gut die Kinder lernen, Objekte zu erkennen, sie auf Bildern auseinanderzuhalten und Wahrgenommenes zwischen den unterschiedlichen Sinnen zu kommunizieren. Selbst das Gesichtererkennen bessert sich. Desgleichen steigert sich das Vermögen, die räumliche Anordnung und Ausrichtung von gesehenen Gegenständen zu beurteilen.

Allmählich gewinnen wir genauere Vorstellungen davon, was den behandelten Kindern möglich ist und was nicht. Die erfreuliche Seite: Visuelle Funktionen verlieren sich nicht grundsätzlich, wenn Augen und zuständige Hirnregionen in den ersten Lebensjahren – in der postulierten »kritischen Phase« – nicht intensiv benutzt wurden. Doch auf der anderen Seite brauchen manche Kompetenzen wohl unbedingt frühe visuelle Erfahrung, um sich voll auszubilden. Dazu gehört hochauflösendes Sehen.

Die bisherigen Forschungsergebnisse regen zu weiteren Studien an, sogar zu einigen, die auf den ersten Blick mit Blindsein nichts zu tun haben. Zu Beispiel entwickeln wir Software, die auf Videos Kategorien von Objekten erkennt, etwa Gesichter. Des Weiteren erinnern die Schwierigkeiten, die unsere jungen Patienten anfangs damit haben, visuelle Informationen zu integrieren, an gewisse für autistische Kinder typische Fehlfunktionen. Deren Hintergründe untersuchen wir nun in meinem Labor genauer.

Das Prakash-Projekt selbst bleibt wissenschaftlich spannend. Mit Hilfe von funktioneller Magnetresonanztomografie betrachten wir jetzt das Verhalten von Hirnstrukturen,

## Einige elementare Dimensionen des Sehens erreichen wohl nicht mehr das Normalniveau



Nach der Staroperation – unter Vollnarkose – wird das Kind erstmals in seinem Leben klar sehen können.



Der Eingriff ist überstanden – jetzt werden die passenden Brillen-  
gläser ausgemessen.

denn wir möchten herausfinden, bis zu welchem Alter sich die Hirnrinde noch umzuorganisieren vermag. Vielleicht werden wir zudem bei manchen spät Operierten feststellen können, ob andere Sinne, beispielsweise der Hör- oder der Tastsinn, Hirngebiete vereinnahmt haben, die normalerweise der visuellen Verarbeitung vorbehalten sind.

Zu den größten und schwierigsten Aufgaben des indischen Projekts gehört es nun, seine Reichweite zu vergrößern und die Therapien zu erweitern. Außerdem ist es unser Ziel, diesen Kindern eine weit gehend normale Eingliederung in die Gesellschaft zu ermöglichen. Als Erstes möchten wir ein Prakash-Zentrum für Kinder einrichten. Dazu sollen eine Kinderklinik, eine Rehabilitationseinheit, Gelegenheiten für Schul- und Ausbildung und eine Forschungsstation gehören.

Bis zum letzten Jahr konnten wir rund 40 000 Kinder aus einigen der ärmsten, völlig vernachlässigten Dörfer Nordindiens augenärztlich untersuchen lassen. Etwa 450 von ihnen wurden operiert – in der Regel am grauen Star, aber einige zum Beispiel an der Hornhaut – und anschließend weiter betreut. Mehr als 1400 weitere erhielten andere Behandlungen, wie Brillen oder Medikamente gegen Augeninfektionen. In Anbetracht der Ausmaße des Problems ist dies allerdings eine geringe Anzahl.

Die Geschichte jedes einzelnen blinden Kindes, das wir bei dieser Arbeit näher kennen lernen, geht uns nahe, ebenso die Vielfalt der Schicksale. Jedes musste Härten wie Ausgestoßensein ertragen. Ebenfalls völlig unterschiedlich verläuft ihr Leben jetzt. SK, der junge Mann ohne Augenlinsen, kehrte nach Hause zurück. Sein größter Wunsch ist es, Lehrer zu werden. JA, ein Junge, der vor sechs Jahren als 14-Jähriger operiert wurde, kann heute selbstständig das Verkehrschaos

von Delhi meistern. Eine Mutter von drei ehemals blinden Jungen halten die Nachbarn nach den Staroperationen ihrer Kinder nicht mehr für verflucht. Zwei von Geburt an blinde Brüder, die vor Kurzem mit über acht Jahren das Augenlicht erhielten, können es gar nicht abwarten, auf eine Schule für normalsichtige Kinder zu wechseln.

Ohne eine Vielzahl von Mitarbeitern aus der Medizin, der Pädagogik und der Wissenschaft und ohne unsere Geldgeber wäre das Prakash-Projekt nicht zu Stande gekommen. Doch mein ganz persönlicher Dank gilt der Besitzerin der blauen Glasschale. ~

#### DER AUTOR



**Pawan Sinha** ist Professor für Neurowissenschaft, besonders des visuellen Systems, am Massachusetts Institute of Technology (MIT) in Cambridge. Seine Schwerpunkte sind Mechanismen und Grundregeln des Sehens und Erkennens von Objekten und Szenen sowie Computermodelle für solche Prozesse.

#### QUELLE

**Held, R. et al.:** The Newly Sighted Fail to Match Seen with Felt. In: Nature Neuroscience 14, S. 551–553, Mai 2011

#### WEBLINKS

Diesen Artikel, Weblinks zum Prakash-Projekt, darunter Videoszenen von den Kindern und ein englischer Vortrag des Autors mit kurzen Filmen unter: [www.spektrum.de/artikel/1298012](http://www.spektrum.de/artikel/1298012)

# Freie Fahrt fürs Immunsystem

Tumoren sind in der Lage, die gegen sie gerichtete Immunreaktion zu blockieren. Neue Therapieverfahren sollen diese Bremsen lösen.

Von Karen Weintraub

Zuerst war es nur eine Patientin, die wider Erwarten am Leben blieb. Sharon war ihr Name; sie litt an einem malignen Melanom, also an bösartigem Hautkrebs. Die Ärzte erwarteten ihren baldigen Tod – doch der trat nicht ein. Weitere Melanompatienten kamen hinzu, die deutlich länger lebten, als auf Grund ihrer Diagnose erwartet, und nicht nur das: Ihre Tumoren verkleinerten sich dramatisch oder verschwanden sogar ganz.

Als sich die Erfolgsmeldungen häuften und in klinischen Studien niederschlugen, begann der Onkologe Antoni Ribas allmählich zu akzeptieren, dass seine Immuntherapie tatsächlich wirkte. Anfänglich hatte nur etwa jeder zehnte Krebspatient von dem Verfahren profitiert, doch als der Mediziner und seine Kollegen es kontinuierlich weiterentwickelten, erhöhte sich die Erfolgsrate. Ribas forscht an der University of California, Los Angeles, über Tumorimmunologie.

Er behandelt dutzende Melanompatienten; viele von ihnen müssten laut früherer Prognose eigentlich schon seit Jahren tot sein.

Die Arzneistoffe, die der Onkologe einsetzt, werden als Immuncheckpoint-Inhibitoren bezeichnet. Sie richten sich gegen eine tückische Strategie von Tumoren, nämlich das Außerkraftsetzen der Immunabwehr. Das Immunsystem verfügt über eine Reihe von Mechanismen (so genannte Checkpoints), die verhindern, dass seine Zellen außer Kontrolle geraten und gesundes Körpergewebe angreifen. Sie funktionieren etwa wie Bremsen eines Autos: Versucht die Körperabwehr, bestimmte Immunzellen, die T-Lymphozyten, in Aktion zu versetzen, unterdrücken die Checkpoints das. Tumoren können diese Mechanismen für ihre Zwecke einsetzen, um Angriffe der T-Lymphozyten zu verhindern. Immuncheckpoint-Inhibitoren wiederum blockieren die Checkpoints, lösen also gewissermaßen die Bremsen der T-Zellen und ermöglichen es ihnen, den Tumor anzugreifen.

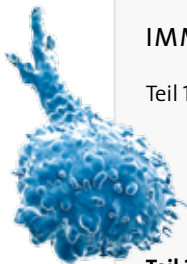
Die Erfolge, die Ribas verzeichnet, indem er bösartigen Hautkrebs mit Immuncheckpoint-Inhibitoren behandelt, machten seine Fachkollegen aufmerksam. Doch ob sich die Arzneistoffe auch gegen andere Krebsarten einsetzen lassen würden, erschien zweifelhaft. Das maligne Melanom sei ein Sonderfall, argumentierten die Mediziner, und es sei bekannt, dass das Immunsystem bei dieser Krebsart eine wichtige Rolle spiele. Vor zwei Jahren setzte allerdings ein Umdenken ein. In einer Studie hatte sich ein Immuncheckpoint-Inhibitor als wirksam gegen das Nierenkarzinom erwiesen: Bei 31 Prozent der behandelten Patienten trat eine deutliche Besserung der Symptome ein. Des Weiteren profitierten 18 Prozent der behandelten Lungenkrebspatienten von dem Arzneistoff. Forscher und Pharmaunternehmen erkannten, dass Immuncheckpoint-Inhibitoren gegen mehrere Tumorarten wirken.

Jedd D. Wolchok, Onkologe am Memorial Sloan-Kettering Cancer Center in New York City, knüpft große Hoffnungen an

## DIE SERIE IM ÜBERBLICK

### IMMUNOTHERAPIE GEGEN KREBS

- |        |  |                |
|--------|--|----------------|
| Teil 1 | ▶ Auftragskiller der Körperabwehr<br><i>Courtney Humphries</i><br>Zelluläre Mobilmachung<br>Bakterien gegen Tumoren<br><i>Sarah DeWeerd</i>    | Juli 2014      |
| Teil 2 | ▶ <b>Freie Fahrt fürs Immunsystem</b><br><b>Karen Weintraub</b><br><b>Interview mit Krebsforscher Thierry Boon</b><br><b>Emmanuelle Vaniet</b> | August 2014    |
| Teil 3 | ▶ Krebszellen unter der Lupe<br><i>Katherine Bourzac</i><br>Impfimplantate gegen Krebs<br><i>Elie Dolgin</i>                                   | September 2014 |





FOTOLIA / MARIA PAZ BOBÓ, BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

diese Medikamentenklasse. Im zurückliegenden Jahr hätten umfangreiche Studien bestätigt, dass Immuncheckpoint-Inhibitoren Lungenkrebs eindämmen können. Und auch gegen Tumoren der Prostata, Brustdrüse, Niere, des Darms und anderer Organe schienen sie zu wirken.

Diese viel versprechenden Befunde warfen Fragen auf: Wenn bereits die Gabe eines einzigen Checkpoint-Inhibitors solche Effekte zeitigen kann, lässt sich dann der Behandlungserfolg durch Verabreichen mehrerer solcher Substanzen verbessern? Was geschieht, wenn man zusätzlich Chemotherapien, genetische Eingriffe oder andere Immuntherapien einsetzt? »Die Krebsimmuntherapie wird ihr Potenzial wohl kaum ausschöpfen, wenn sie sich auf die Gabe einzelner Arzneistoffe beschränkt«, meint Lawrence Fong, Tumorummunologe an der University of California, San Francisco. »Vielmehr wird sie auf die Kombination verschiedener Behandlungsformen setzen müssen.«

Seit mehr als 100 Jahren versuchen Forscher die Fähigkeiten des Immunsystems für die Krebsmedizin zu nutzen (sie-

Mediziner versuchen, dem Immunsystem freie Fahrt zu verschaffen, damit es gegen Krebs vorgehen kann. Hierfür lösen sie die Bremsen der Immunabwehr mit Hilfe bestimmter Arzneistoffe, so genannter Immuncheckpoint-Inhibitoren.

#### AUF EINEN BLICK

##### DIE HEMMUNG DER HEMMUNG

**1** Das Immunsystem verfügt über Mechanismen, um überschießende Abwehrreaktionen zu verhindern – so genannte **Checkpoints**. Tumoren »missbrauchen« diese Mechanismen, um die gegen sie gerichtete Immunreaktion zu stoppen.

**2** Spezielle Arzneistoffe, die **Immuncheckpoint-Inhibitoren**, setzen die hemmenden Mechanismen außer Kraft und versetzen die Körperabwehr so wieder in die Lage, den Tumor anzugreifen.

**3** Immuncheckpoint-Inhibitoren haben sich in klinischen Studien als **wirksam gegen verschiedene Krebsarten** erwiesen. Forscher arbeiten jetzt daran, darauf basierende Therapieverfahren zu entwickeln und zu optimieren.

he auch SdW 7/2014, S. 30). Doch zahlreiche therapeutische Fehlschläge haben gezeigt, dass Tumoren die gegen sie gerichtete Immunreaktion unterbinden können. Die meisten heutigen Immuntherapien sollen die Körperabwehr dazu befähigen, Krebszellen zu erkennen und anzugreifen (siehe etwa SdW 7/2014, S. 22). Auch der therapeutische Impfstoff Sipuleucel-T, Handelsname »Provenge«, zielt darauf ab. Er wurde im Jahr 2010 von der US-Arzneimittelbehörde FDA für die Behandlung von Prostatakrebs zugelassen, was damals große Hoffnungen weckte. Doch die klinischen Erfolge damit erwiesen sich als insgesamt enttäuschend, denn nur ein kleiner Teil der Patienten profitierte von der Impfung mit Sipuleucel-T.

Fehlschläge wie dieser führten zu einer Erkenntnis: Es nützt wenig, auf das Gas-

pedal des Immunsystems zu treten, wenn man nicht gleichzeitig die Bremsen löst. Und hier kommen die Immuncheckpoint-Inhibitoren ins Spiel. Schon vor 18 Jahren beobachtete James Allison, damals an der University of California in Berkeley, dass ein Checkpoint-Protein namens CTLA-4 (cytotoxic T-lymphocyte antigen 4) T-Lymphozyten offenbar davon abhält, Tumoren anzugreifen. Also blockierte Allison die Aktivität von CTLA-4 bei Labormäusen mit verschiedenen Tumorerkrankungen, darunter Hautkrebs. Zu seiner Überraschung bildeten sich die Tumoren bei einigen Tieren vollständig zurück.

### Ein unerwartet wirksamer Antikörper gegen Melanome

Im Jahr 2011 erteilte die FDA die Zulassung für einen Arzneistoff, der CTLA4 hemmt – den Antikörper Ipilimumab (Handelsname Yervoy). Er war auf der Grundlage von Allisons Forschungsergebnissen entwickelt worden und stellte seinen klinischen Nutzen schon bald unter Beweis. Es war dieser Antikörper, der etlichen von Antoni Ribas' Patienten das Leben rettete. Das sorgte für Überraschungen, denn vorangegangene Tierexperimente hatten vermuten lassen, dass Ipilimumab nur zusammen mit anderen Arzneistoffen deutliche Behandlungseffekte erzielen würde. Doch bei menschlichen Krebspatienten erwies sich die Substanz als wirksamer als bei Mäusen.

Eine Langzeitstudie aus dem vergangenen Jahr untersuchte den Nutzen von Ipilimumab bei der Behandlung des fortgeschrittenen Melanoms. Gut 400 von den 1861 Patienten, die den Antikörper verabreicht bekamen, lebten nach der Diagnose noch mindestens drei Jahre lang. Mehr als 300 Patienten waren sogar sieben Jahre später noch am Leben. Das ist beachtlich, da die mittlere Überlebenszeit bei herkömmlichen Therapieformen sechs bis neun Monate beträgt. Wird der Antikörper mit anderen Arzneistoffen kombiniert, lässt sich die Wirkung sogar noch verbessern.

So scheint sich Ipilimumab sehr gut mit einem weiteren Antikörper namens Nivolumab zu ergänzen, der das Check-

point-Protein PD-1 hemmt. Anfang des vergangenen Jahres erschien eine Studie, in der bei 53 Prozent jener Melanompatienten, die die höchste noch tolerierbare Dosis beider Substanzen erhielten, der Tumor um 80 Prozent oder mehr schrumpfte. Allerdings erlitten etwa 20 Prozent der Studienteilnehmer schwere, wenngleich behandelbare Nebenwirkungen. Dazu gehörten funktionelle Beeinträchtigungen der Bauchspeicheldrüse und Leber, juckende Hautausschläge sowie Lungen- und Augenentzündungen.

Pharmaunternehmen halten solche Nebenwirkungen für beherrschbar und entwickeln mit großem Engagement weitere Immuncheckpoint-Inhibitoren. So testet die Firma Merck einen PD-1-Inhibitor namens Lambrolizumab (MK-3475) in sieben klinischen Studien an insgesamt

## Es nützt wenig, aufs Gaspedal des Immunsystems zu treten, löst man nicht gleichzeitig die Bremsen

3000 Patienten mit Blasen- und Darmkrebs, Kopf-Hals-Tumoren, Melanomen, Lungen- und Brustkrebs. In den meisten dieser Studien kommt MK-3475 allein zum Einsatz. »Dennoch sind wir besonders an Kombinationen mit anderen immunmodulatorischen Substanzen interessiert«, sagt Eric Rubin, leitender Krebsforscher bei Merck. Das Unternehmen prüft daher auch die gemeinsame Verabreichung mit verschiedenen Chemotherapeutika, darunter Carboplatin, Cisplatin und Pemetrexed.

Auch das Pharmaunternehmen Bristol-Myers Squibb untersucht, wie sich Immuncheckpoint-Inhibitoren mit anderen Wirkstoffen ergänzen lassen. Unter anderem verabreichen die Forscher den Antikörper Ipilimumab zusammen mit dem Krebsimpfstoff Sipuleucel-T. Experimente mit Mäusen deuten darauf hin, dass sich diese Kombination bewähren könnte. Und die gemeinsame Gabe von Ipilimumab und dem Antikörper Nivolumab, die bereits viel versprechende Ergebnisse erbracht hat, prüft das Unternehmen derzeit in klinischen Phase-II- und Phase-III-Studien mit Melanompatienten. Doch die Forscher hegen keine übertriebenen Erwartungen. »Wir müssen darauf gefasst sein, dass sich dies möglicherweise nicht als optimale Kombination erweist«, sagt Nils Lonberg, leitender Wissenschaftler bei Bristol-Myers Squibb.

Lonberg zufolge prüft das Pharmaunternehmen die gemeinsame Verabreichung von Ipilimumab, Nivolumab und Lirilumab, einem menschlichen Antikörper, der die Antitumoraktivität natürlicher Killerzellen fördert. Hierzu laufen Phase-I-Studien mit Patienten, die an verschiedenen Krebsarten leiden. Das Ziel lautet, sowohl die angeborene Immunabwehr (in Form der unspezifisch wirkenden natürlichen Killerzellen) als auch die adaptive Immunabwehr (in Form spezifisch wirkender T-Zellen) auf den Tumor zu hetzen. »Möglicherweise kommt es dabei zu einer gegenseitigen Verstärkung dieser beiden Arme des Immunsystems«, sagt Lonberg.

Es ist aber jetzt schon erkennbar, dass die optimale Arzneistoffkombination von vielen Faktoren abhängt: der Art



des behandelten Tumors, aber auch von Alter, Geschlecht, Abstammung und genetischer Ausstattung des Patienten. Jahrelanges Experimentieren wird erforderlich sein, um herauszufinden, welche Kombination bei welcher Patientengruppe am besten wirkt – ein Prozess, der sowohl für die Patienten als auch die Pharmaunternehmen Risiken birgt. So könnte sich herausstellen, dass bestimmte Chemotherapien das Immunsystem unterdrücken und so die Immuntherapie konterkarieren, warnt Keith Flaherty, Onkologe an der Harvard University, der auf die Behandlung von Melanomen spezialisiert ist.

### **Versuch und Irrtum? Riskant!**

Großes Potenzial sieht Flaherty jedoch in der gemeinsamen Anwendung von Immuncheckpoint-Inhibitoren und Therapieverfahren, die gegen spezifische Krebsmutationen wirken – etwa gegen die BRAF-Mutation, die bei Melanompatienten häufig vorkommt. »Hier besteht die Möglichkeit, gezielt jene Mechanismen zu überwinden, mit denen der Tumor der Immunüberwachung entgeht.«

Flaherty kritisiert, dass die Forscher auf dem Gebiet der Krebsimmuntherapie teilweise planlos vorgehen. Einige Pharmaunternehmen, sagt er, testeten Arzneistoffkombinationen, ohne die beteiligten Wirkmechanismen verstanden zu haben. »Das ist eine ziemlich unwissenschaftliche Heran-

gehensweise.« Ein solches Versuch-und-Irrtum-Verfahren gefährde die Patienten, berge ein hohes Risiko des Scheiterns und könne die gesamte Krebsimmuntherapie unnötig in Misskredit bringen.

Da derzeit kaum Biomarker zur Verfügung stünden, anhand derer sich voraussagen lasse, welche Patienten am ehesten von Immuncheckpoint-Inhibitoren und anderen Immuntherapien profitieren, ließen sich Wirkstoffkombinationen vielleicht noch gar nicht sinnvoll testen, meint Flaherty. »Ich fürchte, dass wir zurzeit über keine wissenschaftlich fundierte Strategie verfügen, um kombinierte Krebsimmuntherapien zu entwickeln«, sagt er. Das bedeute aber nicht, dass solche Entwicklungsarbeiten grundsätzlich unsinnig seien.

Gelänge es, aussagefähige Biomarker zu finden, könnten die Mediziner für jeden Patienten die am besten geeignete Immuntherapie festlegen – sei es ein einzelnes Behandlungsverfahren oder eine Kombination verschiedener. So deuten beispielsweise einige Befunde darauf hin, dass Patienten, de-

**Das maligne Melanom, auch als »schwarzer Hautkrebs« bezeichnet, ist ein Tumor der Pigmentzellen. Er neigt dazu, früh Metastasen abzusetzen, und ist daher sehr gefährlich. Pro Jahr sterben in Deutschland etwa 1500 Männer und 1200 Frauen daran.**



NATIONAL CANCER INSTITUTE / PUBLIC DOMAIN

## »Eine Kettenreaktion, die den Tumor zerstört«

1991 entdeckten Forscher um **Thierry Boon** die erste Struktur an der Oberfläche von Krebszellen, die von Immunzellen erkannt wird – ein Durchbruch, der die molekulare Grundlage für die Krebsimpfung schuf. Die Arbeiten von Boon und seinem Team trugen maßgeblich dazu bei, die Rolle des Immunsystems bei Tumorerkrankungen aufzuklären. Wir fragten ihn, wie es zu dieser Entdeckung kam, was man daraus über Tumorerkrankungen lernen kann und wohin seiner Meinung nach die Krebsimmuntherapie steuern muss.

*Professor Boon, Sie haben das erste Tumorentigen entdeckt – also die erste molekulare Struktur auf Krebszellen, die von der Körperabwehr als »fremd« erkannt und attackiert wird. War das der Durchbruch Ihrer Karriere?*

**BOON:** Die Wende war für mich eigentlich schon 20 Jahre früher gekommen, als ich im Labor von François Jacob am Institut Pasteur in Paris arbeitete. Ich forschte damals über die Embryonalentwicklung von Mäusen, denen wir Zellen aus sehr speziellen Tumoren einsetzten, nämlich aus Teratokarzinomen. Das sind embryonale Tumoren, die pluripotente Stammzellen enthalten und sich daher in die unterschiedlichsten Körpergewebe ausdifferenzieren können. Dabei entstehen zum Beispiel Geschwulste, die Zähne oder Haare enthalten. Ich versuchte, die Tumorzellen so zu verändern, dass sie sich nicht mehr ausdifferenzieren. So wollte ich Gene finden, die maßgeblich an der Embryonalentwicklung mitwirken.

*Wie kam da die Immunologie ins Spiel?*

**BOON:** Durch einen Zufall. Wir hatten ein merkwürdiges Phänomen beobachtet: Wenn wir die Tumorzellen mit einer Substanz behandelten, die viele Mutationen im Erbgut verursacht, bildeten sie zwar nach wie vor Tumoren im Körper der Mäuse. Doch in einigen Fällen wucherten die Geschwulste nach zwei Wochen nicht mehr weiter und fingen stattdessen an, sich zurückzubilden. Das Immunsystem der Tiere war also dazu übergegangen, sie zu bekämpfen. Mich machte das stutzig, und ich setzte den Tieren, die die mutierten Tumorzellen abgestoßen hatten, auch Zellen aus dem originalen tödlichen Tumor ein.

*Mit welchem Ergebnis?*

**BOON:** Einige Wochen, nachdem ich die Tumorzellen in die Mäuse verpflanzt hatte, untersuchte ich die Tiere. Und fand keinen Tumor! Da spürte ich, dass ich auf etwas Wichtiges gestoßen war. Offenbar hatte die erfolgreiche Auseinandersetzung mit den veränderten Tumorzellen dazu geführt, dass die Körperabwehr der Mäuse jetzt auch den originalen Tumor abwehren konnte. Es war, als ob ihr Immunsystem nun etwas sehen konnte, was es vorher ignoriert hatte ...

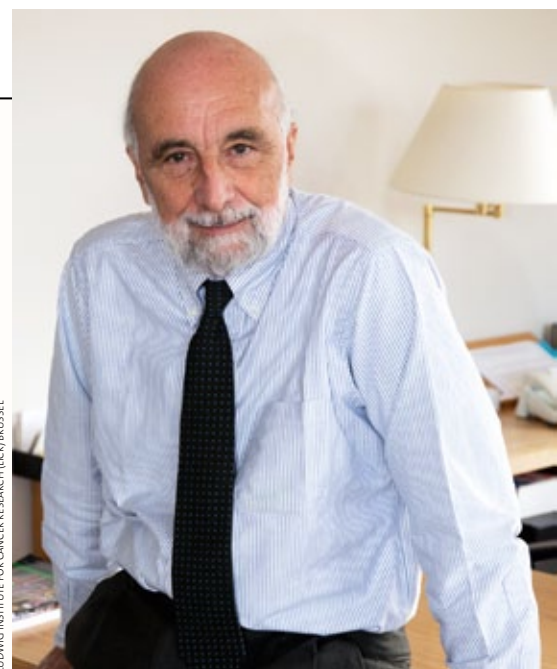
*... nämlich ein Antigen auf den entarteten Zellen.*

**BOON:** Das wussten wir damals nicht. Es sollte noch mehrere Jahre dauern, bis wir es herausfanden. Zusammen mit dem Immunologen und Zellbiologen Jean-Charles Cerottini in Lausanne testeten wir, wie Mauslymphozyten auf Proteinbruchstücke reagieren, die Krebszellen auf ihrer Außenseite tragen. Es stellte sich heraus: Einige mutierte Tumourvarianten, die von den Mäusen abgestoßen worden waren, hatten stark veränderte Proteinbruchstücke auf ihrer Oberfläche. Das war offenbar der Grund gewesen, warum das Immunsystem sie als »fremd« eingestuft und angegriffen hatte. Der originale Tumor dagegen präsentierte Bruchstücke aus normalen Proteinen, allerdings aus solchen, die üblicherweise nur in Keimzellen vorkommen. Die Auseinandersetzung mit den mutierten Tumorzellen hatte die Körperabwehr quasi darauf gestoßen, dass mit den Zellen des Originaltumors etwas nicht stimmte.

*Funktioniert das auch beim Menschen?*

**BOON:** Ende der 1980er Jahre begannen wir, an menschlichen Tumorzellen zu forschen. Alexander Knuth aus Mainz

LUDWIG INSTITUTE FOR CANCER RESEARCH (LICR) BRÜSSEL



Thierry Boon ist Genetiker und war bis 2011 Direktor am Ludwig Institute for Cancer Research in Brüssel. Seit 2009 ist er Mitglied der National Academy of Science (NAS) in den USA.

hatte mich kontaktiert wegen einer Patientin, die unheilbar am metastasierten Melanom erkrankt war. Es war ihm gelungen, ihre Tumorzellen zu kultivieren, und er kam mit ihnen im Gepäck zu uns nach Brüssel. Wir veränderten die Zellen genau so, wie wir es bei der Maus gemacht hatten, und Knuth verabreichte sie der Patientin zurück. Und obwohl die Frau eigentlich nicht mehr auf Besserung hoffen durfte, passierte etwas Erstaunliches: Zunächst wuchsen ihre Metastasen weiter, dann aber begannen sie sich zurückzubilden und verschwanden schließlich, bis die Patientin völlig ausheilte und nach Hause geschickt werden konnte.

**Das Immunsystem der Patientin hatte also den Krebs angegriffen. Konnten Sie herausfinden, wogegen der Angriff gerichtet war?**

**BOON:** 1991 entdeckten wir auf den originalen – also unveränderten – Krebszellen der Patientin das Proteinbruchstück Mage-1. Die Abkürzung steht für »Melanoma Antigen 1«. Wie bei der Maus stammt es aus einem normalen Protein, das aber üblicherweise nur Keimzellen produzieren. Sein Vorhandensein auf den Tumorzellen hatte das Immunsystem der Patientin nach unserem Eingriff offenbar dazu bewogen, die Zellen als fremd einzustufen. Wir hatten die Idee, mit diesem und anderen kleinen Proteinbruchstücken Patienten zu impfen, um ihre Lymphozyten zu einem Angriff auf den Tumor anzustacheln. Vielleicht, so dachten wir, ließe sich damit der Umweg vermeiden, die Tumorzellen zu entnehmen, künstlich zu verändern und wieder in den Körper der Patienten zurückzubringen.

**Hatten Sie Erfolg?**

**BOON:** Die ersten Versuche verliefen erstaunlich gut. Bei drei oder vier geimpften Patienten bildeten sich die Tumoren stark zurück. Allerdings ließ der Erfolg mit der Zeit nach: Je mehr Patienten wir behandelten, desto kleiner wurde der Anteil, der von dem Eingriff profitierte. Heute führt die therapeutische Impfung bei etwa einem von zwölf Patienten zu einer spürbaren Besserung.

**Wie ist diese kleine Zahl zu erklären?**

**BOON:** Anfangs dachten wir, bei den Patienten, die nicht hinreichend auf die Impfung ansprechen, klappe die Immunisierung nicht – die Impfung schalte also gewissermaßen zu wenig Abwehrzellen scharf, um den Tumor zurückzudrängen. Vor einigen Jahren jedoch, als neue Beobachtungsergebnisse vorlagen, haben wir unsere Meinung revidiert; die Sache ist offenbar deutlich komplizierter. Umfassende Immunreaktionen gegen den Tumor sind vielfach schon vor der Impfung nachweisbar – allerdings laufen sie ins Leere, als würde der Körper sie hemmen. Eine erfolgreiche Krebsimpfung führt dazu, dass die Lymphozyten nun nicht mehr ins Leere stoßen, sondern effektiv gegen den Tumor vorgehen. Wie wir jedoch überrascht feststellten, werden die dabei wirksamen Lymphozyten nicht direkt durch die Impfung produziert. Vielmehr richten sie sich gegen andere Antigene als das geimpfte.

**Haben Sie eine Ahnung, warum?**

**BOON:** Wir glauben, dass die meisten Krebspatienten spontan eine Immunreaktion gegen ihren Tumor entwickeln. Doch der Tumor bildet eine Umgebung um sich herum, die die Immunantwort unterdrückt. Wir nennen diesen Effekt Immunsuppression, und er ist je nach Patient mehr oder weniger stark ausgeprägt. Eine erfolgreiche Krebsimpfung führt vermutlich dazu, dass wenigstens ein paar aktivierte Lymphozyten an den Ort des Tumors gelangen und diesen stark genug angreifen, damit bestimmte Signalmoleküle, so genannte Zytokine, ausgeschüttet werden. Diese Moleküle heben die Immunsuppression lokal auf. Das wiederum gibt anderen Lymphozyten, die bis jetzt nicht wirken konnten, freie Bahn, den Tumor anzugreifen. Es setzt eine Kettenreaktion ein, die, wenn sie stark genug wird, bis zur Zerstörung des Tumors führen kann. Die Herausforderung bei einer Krebsimpfung besteht also unserer Meinung nach nicht darin, massenweise aktive Lymphozyten zu produzieren, die ein ganz bestimmtes Antigen erkennen. Vielmehr reicht es, wenn einige wenige Immunzellen die Schutzumgebung des Tumors durchbrechen – und so einen Funken erzeugen, der einen globalen, viel massiveren Angriff in Gang setzt.

**Die Wahl des Impfantigens ist also nicht so wichtig?**

**BOON:** Sie ist wahrscheinlich nicht das K.o.-Kriterium insofern, dass andere Lymphozyten als jene, die durch die Impfung aktiviert werden, den größten Teil der Arbeit leisten. Der entscheidende Punkt scheint zu sein, die suppressive Umgebung des Tumors zumindest punktuell zu durchbrechen, um den initialen Funken überhaupt zu ermöglichen. Deshalb befürworten wir Krebsimpfungen, die nicht nur auf einen einzigen Impfstoff setzen, sondern noch andere Maßnahmen einbeziehen – zum Beispiel eine lokale Verabreichung von Zytokinen, um die Immunhemmung am Ort des Tumors zu reduzieren oder gar auszuschalten.

**Wie sieht Ihrer Meinung nach die Krebsimmuntherapie der Zukunft aus?**

**BOON:** Die Zeit ist gekommen, die Arbeitsweise des Immunsystems nachzuahmen. Bei einer viralen oder bakteriellen Infektion beschränkt sich unsere Körperabwehr keineswegs auf einen einzigen Mechanismus. Um uns vor schädlichen Mikroorganismen zu retten, die uns in wenigen Tagen umbringen können, verfolgt unser Immunsystem Dutzende oder Hunderte von Strategien gleichzeitig. Das Ganze ist eine Art heuristisches Verfahren nach dem Prinzip »Versuch und Irrtum«, wobei unser Körper sich ständig anpasst – und in den meisten Fällen triumphiert. Auch in der Onkologie wird es keinen Königsweg geben, den Krebs zu besiegen. Wir werden unterschiedliche Komponenten des Immunsystems gleichzeitig beeinflussen müssen, um Tumorerkrankungen erfolgreich zurückzudrängen. ~

Das Gespräch führte **Emmanuelle Vaniet**, promovierte Biologin und Wissenschaftsjournalistin in Darmstadt.



Unser Online-Dossier zum Thema »Krebs – der Feind im eigenen Körper« finden Sie unter



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

ren Tumoren das immundämpfende Protein PD-L1 produzieren, gut auf Inhibitoren des Checkpoint-Proteins PD-1 ansprechen. Das berichtet Suzanne Topalian, Onkologin an der Johns Hopkins University in Baltimore, Maryland (USA). Der beobachtete Zusammenhang, sagt sie, sei plausibel – denn die Gegenwart von PD-L1 zeige an, dass der Tumor auf genau jene Bremse des Immunsystems trete, die sich mit PD-1-Inhibitoren lösen lasse.

Trotz insgesamt durchwachsender Behandlungserfolge haben Immuncheckpoint-Inhibitoren in einigen Fällen so gut gewirkt, dass die US-Arzneimittelbehörde FDA im vergangenen Jahr den Antikörper MK-3475 als »bahnbrechenden Therapieansatz« bezeichnete. Sie bescheinigt dem Antikörper, er könne die Krebsbehandlung möglicherweise deutlich verbessern. Die FDA arbeitet mit Forschern und Pharmaunternehmen zusammen, um die Entwicklung von MK-3475-basierten Therapieverfahren zu beschleunigen.

### Nicht nur eine Sache der Erbanlagen

Seit Jahren konzentrieren sich Onkologen verstärkt auf die Genetik von Krebserkrankungen, um Arzneistoffe zu entwickeln, die spezifischen Mutationen entgegenwirken. Nun sei es an der Zeit, das Blickfeld zu erweitern, meint Ira Mellman, Krebsforscherin bei dem Biotechnologieunternehmen Genentech. »Wir wissen heute, dass Krebs nicht nur eine Krankheit der Gene ist, denn wir verfügen über zahlreiche Arzneistoffe, die auf Onkogene abzielen – und dennoch sind viele Krebserkrankungen nach wie vor nicht heilbar.« Die Erfolge mit Immuncheckpoint-Inhibitoren hätten dazu geführt, dass etliche Krebsforscher sich allmählich vom Konzept der rein genetisch bedingten Erkrankung abwendeten. Dieser Perspektivwechsel sei notwendig, sagt Mellman, denn sonst werde sich kein Fortschritt einstellen und ließen sich die Möglichkeiten der Krebsimmuntherapien nicht voll ausschöpfen.

Auch die behandelnden Ärzte müssen ihre klinischen Strategien anpassen, um Immuncheckpoint-Inhibitoren und andere immunologische Behandlungsansätze möglichst effektiv einzusetzen. Denn Patienten sprechen auf Immuntherapien oft ganz anders an als auf konventionelle Behandlungsmethoden, wie die Onkologin Suzanne Topalian betont. Gängige Chemotherapien und gezielte Krebstherapien führen, wenn sie erfolgreich sind, normalerweise zu einem

relativ raschen Schrumpfen des Tumors. Bei Immuntherapien hingegen kann es mehrere Monate dauern, bis die Geschwulst sich merklich zurückzubilden beginnt. Mitunter nimmt die Tumorgöße anfangs sogar zu, wenn nämlich T-Lymphozyten und andere Abwehrzellen massenhaft zum Ort des Geschehens wandern. »Ärzte, die Immuntherapien einsetzen, müssen über dieses Ansprechverhalten sehr gut im Bilde sein«, unterstreicht Topalian. »Es kann eine ganze Weile dauern, bis die Wirkung eintritt – was die Entscheidung erschwert, ob die Behandlung fortgesetzt oder abgebrochen werden soll.«

Derzeit weiß niemand genau, wie lang Immuncheckpoint-Inhibitoren verabreicht werden müssen, bis ein sichtbarer klinischer Erfolg eintreten kann. Ribas behandelt viele seiner Patienten mit MK-3475. Sie erhalten alle zwei bis drei Wochen eine Infusion mit dem Antikörper. Es ist geplant, jeden Patienten zwei Jahre lang zu behandeln und dann eine Therapiepause einzulegen, um den weiteren Krankheitsverlauf zu beobachten.

»Auf Grund der derzeit verfügbaren Daten können wir nicht entscheiden, wann wir die Therapie beenden können – oder ob wir sie immer weiter fortsetzen müssen«, erklärt Ribas. Die Mediziner hoffen, dass das Immunsystem der behandelten Patienten irgendwann dazu übergeht, den Tumor selbstständig zu bekämpfen – und Krebs entweder definitiv besiegt oder zumindest dauerhaft in Schach hält. Topalian wagt sogar die hoffnungsvolle Spekulation, wonach Patienten, die eine erfolgreiche Immuntherapie durchlaufen haben, möglicherweise für den Rest ihres Lebens vor einer Rückkehr des Tumors geschützt sein könnten – ähnlich wie manche Impfungen im Kindesalter lebenslange Immunität verleihen. ~

### DIE AUTORIN



**Karen Weintraub** ist Wissenschaftsjournalistin und lebt in Cambridge, Massachusetts.

### QUELLEN

**Hamid, O. et al.:** Safety and Tumor Responses with Lembroizumab (Anti-PD-1) in Melanoma. In: The New England Journal of Medicine 369, S. 134–144, 2013

**Topalian, S. L. et al.:** Safety, Activity, and Immune Correlates of Anti-PD-1 Antibody in Cancer. In: The New England Journal of Medicine 366, S. 2443–2454, 2012

**Wolchok, J. D. et al.:** Nivolumab plus Ipilimumab in Advanced Melanoma. In: The New England Journal of Medicine 369, S. 122–133, 2013

Dieser Artikel im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1298013](http://www.spektrum.de/artikel/1298013)

© Nature Publishing Group

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

Nature 504, S. 56–58, 19./26. Dezember 2013

JETZT NEU!

# Unsere Digitalreihe Ratgeber

Nur  
€ 2,49\*



Renommierete Pädagogen erklären, wie Eltern ihren Kindern beim Lernen am besten unter die Arme greifen können. Mit vielen praktischen Tipps und Übungen für den Alltag. **Lernhilfen für Kinder** ist die 2. Ausgabe der digitalen Ratgeberreihe von »Gehirn und Geist« (PDF-Format).

## DIGITALRATGEBER

Ausgabe 1: **Kommunikation und Rhetorik**

Ausgabe 2: **Lernhilfen für Kinder**

\* Bezahlmöglichkeit



PayPal™

[www.gehirn-und-geist.de/ratgeber](http://www.gehirn-und-geist.de/ratgeber)

Hier QR-Code per  
Smartphone scannen!



# Was das Universum auseinanderreibt

Die Entdeckung der Dunklen Energie hat unser Bild vom Universum in kürzester Zeit grundlegend verändert. Obwohl mittlerweile vielfach bestätigt, wissen wir erstaunlicherweise immer noch sehr wenig über dieses Phänomen, welches den Kosmos einst in tiefer Nacht versinken lassen könnte.

Von Elena Sellentin und Matthias Bartelmann

**A**m Ende war das Universum wüst und leer, und Dunkelheit herrschte über der Tiefe. So könnte es kommen, falls die Dunkle Energie unser Universum weiterhin so im Griff behält wie in den vergangenen sechs Milliarden Jahren. Dann wird sie es so lange zu einer immer schnelleren Expansion antreiben, bis alle Sterne in ihm verloschen sind. Es sei denn, unserem Universum ist doch eine rosigere Zukunft beschert. Machen wir uns also an die Arbeit und versuchen herauszufinden, was uns wirklich bevorsteht.

Was ist sie überhaupt, diese mysteriöse Energieform? Ihre vielleicht merkwürdigsten Eigenschaften bestehen darin, dass sie gut 70 Prozent des Energieinhalts unseres Kosmos repräsentieren soll und dass Physiker von ihrer Existenz überzeugt sind, obwohl sie noch nicht einmal wissen, worum es sich dabei eigentlich handelt. Doch eine Reihe von Beobachtungen spricht für sie. Das entscheidende Puzzleteil war eine überraschende Entdeckung aus dem Jahr 1998. Forscher konnten mit eindeutigen Daten belegen, dass das Universum nicht nur expandiert, sondern dass sich seine Ausdeh-

nung sogar noch beschleunigt. Diese Beobachtung zwingt uns mit Macht, die Existenz einer bislang unbekanntener Energieform anzunehmen.

Wer die große Überzeugungskraft der Daten verstehen will, die der Dunklen Energie binnen weniger Jahre einen festen Platz in unserem naturwissenschaftlichen Weltbild verschafft haben, muss sich mit der Kosmologie befassen, also derjenigen physikalischen Disziplin, die das Universum als Ganzes erforscht. Sie basiert auf der Beschreibung der Gravitation, wie sie Einstein 1915 in seiner allgemeinen Relativitätstheorie formuliert hat und die als einzige der vier fundamentalen Kräfte auch über riesige kosmische Distanzen hinweg zu wirken vermag. Über die von Isaac Newton formulierte Schwerkraftlehre geht die Erklärungskraft dieser Theorie weit hinaus. Schon Einstein konnte mit ihrer Hilfe zeigen, weshalb die Bahn des Planeten Merkur minimal um die Sonne präzediert. Messungen während einer Sonnenfinsternis im Jahr 1919 bestätigten auch seine quantitative Voraussage, wie stark Licht in der Nähe großer Massen abgelenkt wird. Diese und viele folgende Überprüfungen in den vergangenen rund 100 Jahren machten die Relativitätstheorie zu einem soliden Grundpfeiler der modernen Physik. Sie beschreibt sogar so ungewöhnliche Systeme wie PSR J0737-3039, das aus zwei schnell rotierenden Neutronensternen besteht. Angezogen durch ihre Gravitation umkreisen diese so genannten Pulsare einander auf Bahnen, deren Radien immer weiter schrumpfen – in genau dem Maß, in dem es die Relativitätstheorie vorhersagt.

Einsteins Theorie beschreibt die Gravitation als Wechselspiel zwischen der Geometrie der Raumzeit und den sich in ihr befindenden Massen. Die Schwerkraftwirkung einer Masse äußert sich darin, dass sie die umgebende Raumzeit krümmt. Die Krümmung der Raumzeit diktiert wiederum die Bewegung der Massen; man kann sich zur Veranschaulichung Körper vorstellen, die auf einer gekrümmten Fläche ins Rollen geraten. Da sich Energien gemäß Einsteins berühmter

## AUF EINEN BLICK

### DER BESCHLEUNIGTE KOSMOS

**1** Seit 1998 ist klar, dass sich die seit dem Urknall andauernde **Expansion** des Universums in den letzten sechs Milliarden Jahren noch beschleunigt hat. Wird es in ferner Zukunft von **Dunkler Energie** auseinandergerissen?

**2** Von der Existenz dieser Energieform sind die meisten Kosmologen auf Grund von **Beobachtungsdaten** und **theoretischen Überlegungen** mittlerweile fest überzeugt. Doch was sich physikalisch hinter ihr verbirgt, bleibt unklar.

**3** Die nach Ansicht vieler Kosmologen wahrscheinlichste Erklärung ist eine **gravitativ abstoßende Naturkonstante**, welche das gesamte Universum erfüllt und dessen Expansion bis in alle Ewigkeit konstant beschleunigt.

Die kosmologische Konstante  $\Lambda$  hat eine lange Geschichte. Schon Einstein hatte sie in seinen Gleichungssystemen genutzt, aber bald wieder verworfen. Seit der Entdeckung der beschleunigten Expansion des Universums steht sie wieder im Fokus der Forscher.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT; HINTERGRUND: FOTOLIA / STEFAN KUHN

Formel  $E = mc^2$  ( $E$  = Energie,  $m$  = Masse,  $c$  = Lichtgeschwindigkeit) äquivalent in Massen ausdrücken lassen, trägt auch jegliche in einer Raumzeit enthaltene Energieform zu einer Krümmung bei und wirkt dadurch ebenfalls gravitativ.

Wie kann man nun aus der allgemeinen Relativitätstheorie ein Modell für unseren Kosmos ableiten? Ihre zentralen Elemente sind die zehn vielfältig miteinander verbundenen einsteinschen Feldgleichungen. Newton beschrieb die Schwerkraftwirkung zweier Massen noch als Überlagerung zweier unabhängiger Wirkungen. In Einsteins Theorie sind sie hingegen auf komplexere Weise miteinander verknüpft, so dass es schwierig oder sogar unmöglich sein kann, Lösungen der Feldgleichungen anzugeben. Dieses Problem lässt sich jedoch beheben, zumindest für den – möglicherweise speziellen – Fall unseres eigenen Universums. In einem isotropen und homogenen Universum vereinfachen sich die einsteinschen Feldgleichungen nämlich so weit, dass nur noch zwei Gleichungen übrig bleiben, die zudem exakt lösbar sind.

Ob das Universum tatsächlich homogen ist – ob also an jedem Ort mehr oder weniger dieselbe Massedichte herrscht –, konnten die Kosmologen Anfang des 20. Jahrhunderts noch nicht belegen. Es erschien ihnen aber isotrop, stellte sich also in alle Richtungen gesehen im Wesentlichen gleich dar. Darüber hinaus blieb den Wissenschaftlern nichts übrig, als vom so genannten kopernikanischen Prinzip auszugehen, dem zufolge der Ort unserer Erde im Universum durch keinerlei Besonderheiten ausgezeichnet ist. Wenn irdische As-

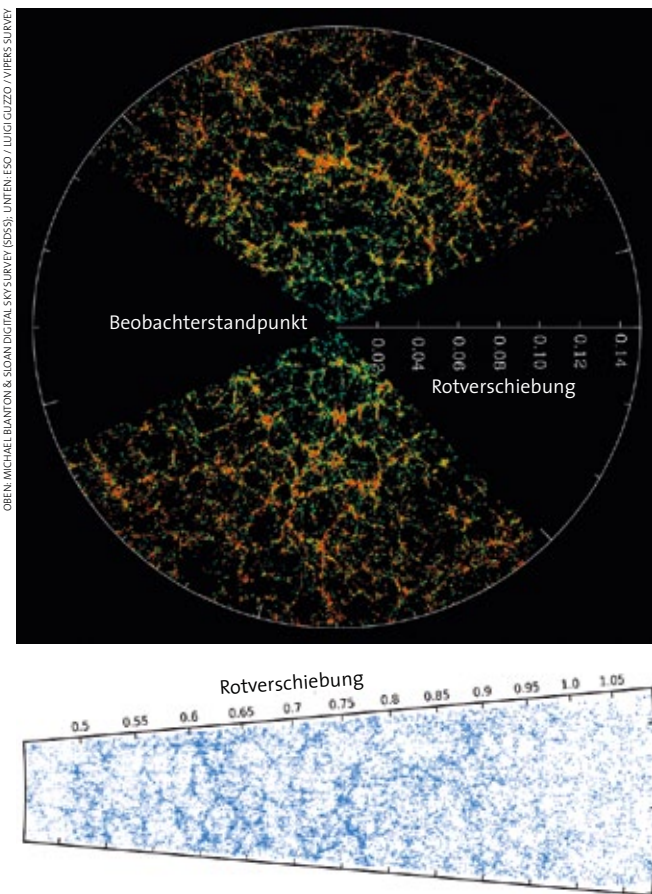
tronomen ein isotropes Universum sehen, wäre es demzufolge auch von anderswo betrachtet isotrop. Dann aber wäre es automatisch auch homogen.

Dank immer umfassenderer Himmelsdurchmusterungen, bei denen immer größere Teleskope immer tiefer ins All blicken und bislang keine Abweichungen von Homogenität und Isotropie entdecken konnten, werden wir auf das kopernikanische Prinzip in nicht allzu ferner Zukunft aber verzichten können. Bislang erweist sich die Galaxiendichte tatsächlich als in jeder Richtung etwa gleich groß. In manchen Regionen befinden sich zwar deutlich weniger Sternsysteme als in anderen, doch über kosmische Distanzen hinweg wiederholt sich das Bild von Leer- und Ballungsräumen (Diagramme links). Außerdem können wir mittlerweile sehr präzise den so genannten kosmischen Mikrowellenhintergrund vermessen. Wäre das Universum nicht isotrop, würden sich darin auffällige Strukturen zeigen.

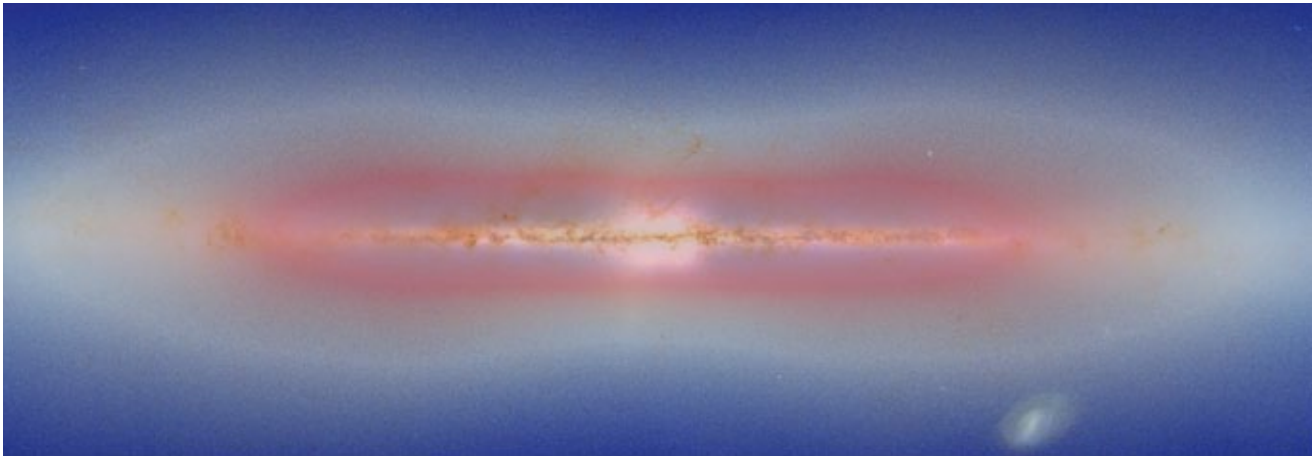
### Galaxien, die sich mit Überlichtgeschwindigkeit entfernen

Um die Entwicklung unseres Universums eindeutig zu beschreiben, brauchen wir neben den zwei verbleibenden Gleichungen, auf die Einsteins Gleichungssystem nun geschrumpft ist, zwei weitere Informationen. Wir müssen wissen, welche Gravitationsquellen unser Kosmos enthält, und wir müssen verstehen, wie sich die Raumzeit im Lauf der Zeit entwickelt. Beides ist messbar. Die Entwicklung der Raumzeit bestimmen Astronomen anhand des Lichts, das uns von fernen Galaxien erreicht. Es zeigt sich nämlich, dass die Wellenlänge dieses Lichts umso größer ist – was »röterem« Licht entspricht –, je weiter die Galaxien entfernt sind. Anders gesagt: Die Wellen erscheinen systematisch gedehnt, woraus die Kosmologen schließen, dass sich der Raum zwischen uns und den Galaxien kontinuierlich ausdehnt. Diese Interpretation kann auch einleuchtend erklären, warum wir weit abgelegene Galaxien beobachten, die sich mit Überlichtgeschwindigkeit von uns zu entfernen scheinen. Sie bewegen sich nicht schneller als das Licht durch den Raum – was Einsteins Theorie ohnehin »verbieten« würde –, sondern werden stattdessen durch die Expansion des Raums von uns fortgetragen.

Wenn das Universum homogen und isotrop ist, vereinfachen sich Einsteins komplexe Feldgleichungen und werden überhaupt erst berechenbar. Ob diese Voraussetzungen gegeben sind, müssen Astronomen durch Beobachtungen überprüfen. Der Sloan Digital Sky Survey (oben) vermaß das Licht von Galaxien bis zu einer Rotverschiebung von 0,14; es war also bis zu 1,8 Milliarden Jahre zu uns unterwegs. Die VIPERS-Durchmusterung (unten) mit dem Very Large Telescope der Europäischen Südsternwarte ermittelte Daten bis zu einer Rotverschiebung von 1,05; in diesem Fall war das Licht bereits sieben Milliarden Jahre unterwegs. Vom Beobachterstandpunkt aus, so zeigen diese Untersuchungen, sieht das Universum in jeder Richtung ungefähr gleich aus, ist also isotrop. Damit ist es automatisch auch homogen.







JUSTIN READ & OSCAR AGERTZ, UNIVERSITÄT ZÜRICH

**Neben Dunkler Energie und gewöhnlicher Materie müssen Kosmologen die Dunkle Materie berücksichtigen, um sich ein Bild der Gravitationsquellen im Universum zu verschaffen. Im Zentrum des Kompositbilds ist die Milchstraßenscheibe zu sehen; die roten Konturen geben an, wie sie einem Modell zufolge in Dunkle Materie eingehüllt ist.**

Aus der detaillierten Expansionsgeschichte des Universums lässt sich schließlich rekonstruieren, welche Gravitationsquellen in die Raumzeit eingebettet sind und den Verlauf der Expansion mitbestimmen. Am Ende geht aus all dem auch hervor, wie groß die Gesamtenergie des Universums, sein Energiebudget, sein muss, und aus welchen Bestandteilen es sich zusammensetzt.

An dieser Stelle kommt die Dunkle Energie ins Spiel, denn ohne sie hätten wir ein großes Problem. Einen Teil der Gravitation steuert gewöhnliche, so genannte baryonische Materie bei, aus der Planeten, Sterne und Menschen bestehen. Einen weiteren Beitrag liefert energiereiche Strahlung, denn ihre Energie kann über  $E = mc^2$  als Masse und damit als Gravitationsquelle aufgefasst werden; sie war jedoch nur in den allerfrühesten Phasen unseres Universums von Bedeutung. Darüber hinaus wurde bereits in den 1930er Jahren klar, dass es auch große Mengen so genannter Dunkler Materie geben muss. Eine Reihe astronomischer Phänomene lässt sich nämlich nur so deuten, dass im Universum große Ansammlungen einer Substanz existieren, die zwar gravitativ wirkt, aber sonst kaum etwas mit baryonischer Materie zu tun hat. Nicht einmal mit unseren Teleskopen können wir sie sehen, weshalb wir davon ausgehen, dass sie nicht mit der elektromagnetischen Kraft in Wechselwirkung tritt und daher auch kein Licht aussendet, also unsichtbar bleibt (siehe »Der Dunkle Kosmos«, SdW 9/2013, S. 60).

In einem einfachen kosmologischen Modell könnte man annehmen, dass sich das kosmische Energiebudget im Wesentlichen aus Dunkler sowie aus gewöhnlicher Materie zusammensetzt, deren Anziehungskraft der Expansion entgegenwirkt. Doch irgendetwas kann dabei nicht stimmen, wie sich schon zeigte, als über die Expansionsgeschichte noch wenig bekannt war. Berechnet man nämlich mit einem solchen Modell das Alter des Universums, kommt man auf etwa neun

Milliarden Jahre. Astronomen haben jedoch eine Reihe von Objekten entdeckt, die deutlich älter sind – greisenhafte Kugelsternhaufen etwa, deren Alter auf über zwölf Milliarden Jahre bestimmt wurde, und einige fast so alte Weiße Zwerge.

Zu diesem Altersproblem gesellt sich ein weiteres. Damit im Universum Strukturen entstehen, muss sich Materie mit Hilfe der Schwerkraft zusammenballen. Simulationen dieses Prozesses zeigten jedoch schon in den 1980er Jahren, dass sich die beobachteten Strukturen – Galaxien und Galaxienhaufen sowie Filamente, an denen entlang sich diese Sternsysteme fadenartig aufreihen – so nicht nachbilden ließen. Es ergibt sich ein völlig anderes Muster am Himmel als das, das wir sehen (siehe Kasten auf S. 42). Eine der beiden möglichen Erklärungen lautet: Der Raum muss gekrümmt sein, und zwar nicht nur in der Nähe von Schwerkraftquellen, sondern über das gesamte Universum hinweg. Die zweite Erklärung lautet: Neben dunkler und baryonischer Materie muss das Universum eine weitere, bislang unbekannte Energieform enthalten, die anti-gravitativ wirkt. Irgend etwas fehlt also noch in unserer Zusammenstellung des kosmischen Energiebudgets.

### **Wer hätte mit einer abstoßenden Schwerkraft gerechnet?**

1998 sorgten Saul Perlmutter, Adam Riess und Brian Schmidt dann für den Durchbruch. Ihre jahrelangen Messungen an explodierenden Sternen, so genannten Supernovae, zeigten klar, dass die Expansion des Universums zunehmend an Tempo gewinnt. Eine solche beschleunigte Expansion ist im Rahmen der Relativitätstheorie nur dann vorstellbar, wenn die Gravitation in unserem Universum auch abstoßend werden kann. Hier deutete sich also plötzlich eine Erklärung an. Worin das Phänomen genau besteht, weiß bislang zwar niemand so genau, aber seit die Physiker es als Dunkle Energie bezeichnen, haben sie zumindest einen Namen dafür. An-



Das Blanco-Teleskop auf dem Cerro Tololo in Chile half, die beschleunigte Expansion des Universums nachzuweisen. Bei der genaueren Untersuchung der Dunklen Energie kommt das Vier-Meter-Instrument wieder zum Einsatz. Das Foto zeigt es vor den Magellanschen Wolken (links) und der Milchstraße (rechts).

sonsten ist es äußerst rätselhaft: Wer hätte schließlich mit einer abstoßenden Schwerkraft gerechnet?

2000 wurden dann auch die Ergebnisse des Experiments Boomerang veröffentlicht. Ein Stratosphärenballon hatte die Antarktis mit einem Mikrowellenteleskop umrundet und dabei eine Strahlungskarte des kosmischen Mikrowellenhintergrunds gezeichnet. Diese uns von allen Seiten erreichende

Strahlung im Mikrowellenbereich stammt aus der fernen kosmischen Vergangenheit und birgt eine Vielzahl kosmologischer Informationen (siehe »Daten vom Anfang der Welt«, SdW 5/2014, S. 14). Zwar hatten Satellitendaten schon zu Beginn der 1990er Jahre angedeutet, dass unser Universum räumlich flach sein dürfte, der Raum also nicht insgesamt gekrümmt ist. Die Boomerang-Karte bestätigte aber endgültig, dass dies der Fall ist – und damit auch, dass an der Dunklen Energie kein Weg vorbeiführt.

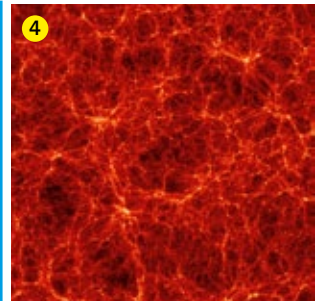
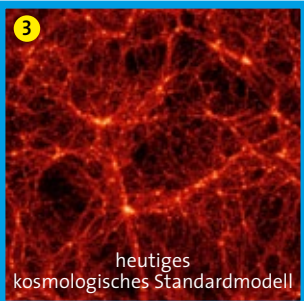
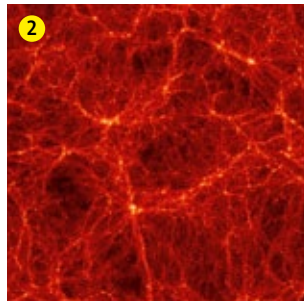
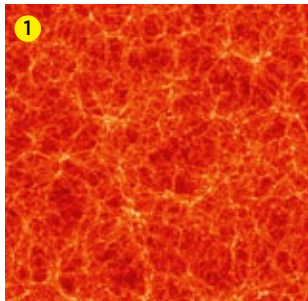
Ob es sich tatsächlich um eine Energieform handelt, bleibt trotz ihres suggestiven Namens unklar. Auch gänzlich andere Phänomene könnten das kosmische Energiebudget verändern und eine beschleunigte Expansion erzeugen – oder sie zumindest vorgaukeln. Details über die Natur der Dunklen Energie gehen aber in den bisherigen Messfehlern unter: Aus unseren Daten lässt sich bislang lediglich erschließen, welchen Anteil sie am kosmischen Energiebudget hat. Um präzisere Messungen zu liefern, sind jedoch bereits eine Reihe von Teams am Start. So haben Wissenschaftler aus den USA, Brasilien, Großbritannien, Deutschland, Spanien und der Schweiz jüngst eine fünfjährige Beobachtungskampagne am Vier-Meter-Teleskop Victor M. Blanco in Chile gestartet, das schon bei der Entdeckung der Dunklen Energie zum Einsatz kam. Die Europäische Weltraumorganisation ESA entwickelt unterdessen den Satelliten Euclid, das Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik in Garching baut das Röntgeninstrument eROSITA, das als deutsch-russisches Gemeinschaftsprojekt ebenfalls im Weltraum zum Einsatz kommen soll, und auch bodengebundene Teleskope wie das geplante Large Synoptic Survey Telescope in Chile werden sich an der Suche beteiligen.

Könnten wir unterdessen nicht einfach die Relativitätstheorie selbst befragen, worum es sich bei der Dunklen Ener-

## Welches Modell ist das richtige?

Im Verlauf der Jahrzehnte berechneten Forscher die Materieverteilung im Universum mit verschiedenen Ansätzen und verglichen ihre Resultate (unten) mit dem Bild, das großräumige Himmelsdurchmusterungen ergeben. Anfangs gingen sie vom so genannten Standard-CDM aus (1), das nur baryonische und Dunkle Materie berücksichtigt. CDM steht für Cold Dark Matter, eine bestimmte Form »kalter« Dunkler Materie. Diesem Modell erwachsen in den 1980er Jahren zwei Konkurrenten: Open CDM

(2), das auf einer negativ gekrümmten Raumzeit basiert, und  $\Lambda$ CDM (3), in dem die Existenz einer kosmologischen Konstante angenommen wird. Mit der Entdeckung der beschleunigten Expansion setzte sich  $\Lambda$ CDM schließlich durch, unter anderem weil es die großräumigen Strukturen im Universum am besten wiedergibt. Weiter diskutiert werden zudem Varianten von Tau-CDM (4); hier fließt in das Energiebudget auch Strahlung ein, die vom Zerfall massereicher Tau-Neutrinos herrührt.



JOERG COLBERG, MPI FÜR ASTROPHYSIK

gie handelt? Aus grundsätzlichen mathematischen Überlegungen zur Frage, wie die Feldgleichungen von Gravitationstheorien aussehen müssen, folgt eine als Lovelock-Theorem bekannte Aussage: Jede Theorie, welche die Schwerkraft durch die Geometrie einer vierdimensionalen Raumzeit erklären will und zugleich die gewohnten Erhaltungssätze von Impuls und Energie erfüllen soll – also auch die einsteinsche –, muss zwei Beiträge zur Schwerkraft enthalten, deren jeweilige Stärken durch Naturkonstanten festgelegt werden. Das klingt abstrakt, lässt sich aber dennoch leicht auf unser Problem anwenden. Der erste Beitrag würde der durch Massen ausgeübten anziehenden Schwerkraft entsprechen, wie wir sie von unserer irdischen Alltagswelt und unserer näheren Umgebung im Weltraum kennen. Ihre Stärke legt die newtonsche Gravitationskonstante fest, deren Wert sich seit etwa 1800 messen lässt. Den zweiten Beitrag – er könnte anziehend oder auch abstoßend sein – würde der leere Raum beisteuern. Auf kleinen Skalen dominiert dann weiterhin die gewohnte von der Masse ausgehende Gravitation, auf kosmischen Distanzen jedoch käme der zweite Beitrag zum Tragen. Ist die mit ihm verknüpfte so genannte kosmologische Konstante positiv, wirkt er abstoßend und wird mit dem großen griechischen Buchstaben  $\Lambda$  (Lambda) bezeichnet.

### Comeback der kosmologischen Konstanten

Einstein wusste um die Möglichkeit, eine solche Konstante in die Theorie einzuführen (siehe »Als Einstein noch nicht vom Urknall überzeugt war«, SdW 7/2014, S. 14). Weil er von der Vorstellung eines statischen Universums überzeugt war, nutzte er  $\Lambda$ , um ein Universum zu konstruieren, das nicht unter seiner eigenen Schwerkraft kollabiert. Dazu gab er der Konstanten einen Wert, der durch seine abstoßende Wirkung die gravitative Anziehung der Materie im Universum genau kompensiert. Als astronomische Beobachtungen ein expandierendes Universum nahelegten, verwarf er die kosmologische Konstante zwar wieder. Mehr als sieben Jahrzehnte später brachte sie sich dann aber selbst erneut ins Spiel, weil sie perfekt zu den Daten von Perlmutter, Riess und Schmidt passte. Sie muss schließlich nur um ein wenig größer sein, als es in einem statischen Universum der Fall wäre, um zu einer beschleunigten Expansion zu führen. Seither gilt  $\Lambda$  als wichtigster Kandidat für die Erklärung der Dunklen Energie und wurde zu einem zentralen Grundpfeiler für das heutige Standardmodell der Kosmologie,  $\Lambda$ CDM. Der zweite Pfeiler dieses Modells, das zuverlässig die Entwicklung des Universums seit dem Urknall beschreibt, ist eine bestimmte, nämlich »kalte« Form der Dunklen Materie, die Cold Dark Matter (CDM).

Damit verwundert das Phänomen der Dunklen Energie zwar immer noch, erscheint aber letztlich unproblematisch. Die Kosmologen könnten sich an die Existenz der kosmologischen Konstante gewöhnen, auch wenn der dahinterliegende physikalische Mechanismus fürs Erste noch unverstanden bleiben sollte. Doch selbst Saul Perlmutter hatte in seiner nobelpreisgekrönten Veröffentlichung angemerkt, dass die kosmologische Konstante nicht unbedingt die beste Erklärung



**Omega Centauri zählt mit rund zwölf Milliarden Jahren zu den ältesten Kugelsternhaufen am Himmel. Er gilt als einer der Belege dafür, dass einfache kosmologische Modelle, die das Alter des Universums auf neun Milliarden Jahre schätzen, nicht korrekt sein können.**

für die Dunkle Energie ist. Er zog auch eine »andere, bislang unbekannte physikalische Entität« in Erwägung, unter anderem deshalb, weil sich die Größenordnung des Werts der Konstanten nicht aus fundamentalen physikalischen Gesetzen erklären lässt.

Seine Zweifel haben eine lange Vorgeschichte. Schon Einstein konnte für die von ihm behauptete Existenz von  $\Lambda$  keine physikalische Begründung anführen. Eine Zeit lang hegten die Wissenschaftler aber Hoffnung, dass ihnen dies gelingen könnte. Im Lauf des 20. Jahrhunderts bekam die Physik nämlich Zuwachs von der Quantenmechanik und schließlich von der auf ihr aufbauenden Quantenfeldtheorie (siehe »Was ist Realität?«, SdW 7/2014, S. 46). Feldtheorien beschreiben mit Hilfe von Kraftfeldern, wie zwei Körper miteinander in Wechselwirkung treten, ohne dass es zu materiellem Kontakt zwischen ihnen kommt. Quantenfeldtheorien tun dasselbe, beziehen aber auch Quanteneffekte mit ein. Wie sich herausstellte, stand mit ihnen ein theoretisches Konstrukt zur Verfügung, aus dessen Grundprinzipien sich der Wert der kosmologischen Konstanten herleiten lassen sollte.

Und so machten sich die Forscher an die Arbeit. Weil Einstein die kosmologische Konstante längst wieder verworfen hatte, versuchten die Physiker des 20. Jahrhunderts mit Hilfe der Quantenfeldtheorie zu erklären, weshalb sie null sein muss. Dabei stießen sie allerdings auf immense rechnerische Probleme, die bis heute ungelöst sind. Mit der Entdeckung der beschleunigten Expansion zeigte sich zudem am Ende des Jahrhunderts, dass ihre Bemühungen möglicherweise in die falsche Richtung gezielt hatten. Seither versuchen die Quantenfeldtheoretiker zu erklären, weshalb  $\Lambda$  ungleich null ist.

Die frühesten Versuche dieser Art stammen allerdings schon aus den 1930er Jahren. Damals versuchte man, die kosmologische Konstante durch die so genannte Vakuumenergie zu erklären. Der Quantenfeldtheorie zufolge ist die Energiedichte selbst im Vakuum – also fernab jeglicher Sterne, Planeten, Galaxien und anderer Materie – größer als null. Denn erstens kann die Energiedichte von Quantenfeldern, wie sie das gesamte Universum durchziehen, aus theoretischen Gründen nie gänzlich auf null abfallen; als Vakuum gilt daher der Zustand, in dem ein Feld die niedrigst mögliche Energie aufweist. Zweitens treten in diesem Zustand so genannte Vakuumfluktuationen auf, bei denen quasi aus dem Nichts so genannte virtuelle Photonenpaare und Teilchen-Antiteilchen-Paare hervorgehen und nach sehr kurzer Lebensspanne wieder verschwinden.

Tatsächlich war es lange verführerisch, die Vakuumenergie für die Expansion des Universums verantwortlich zu machen, denn sie erfüllt die wichtigsten Anforderungen. Sie durchzieht das gesamte Universum und sollte gemäß den Feldgleichungen wie jede andere Energie eine Schwerkraft ausüben. Allerdings wurde schnell klar, dass sich die Vakuumenergie gar nicht wie eine kosmologische Konstante verhält: In der Frühphase unseres Universums war sie nämlich nicht konstant. Als unser Universum damals auskühlte, während es expandierte, veränderten sich auch die Teilchen und Quantenfelder, die es erfüllten – sie machten einen so genannten Phasenübergang durch, ähnlich wie gefrierendes Wasser oder kondensierender Dampf –, und damit auch die mit ihnen verbundene Vakuumenergie.

Hinzu kommt ein weiteres Problem. Berechnet man die Vakuumenergie, die sich durch die bekannten Teilchenarten in unserem Universum einstellen sollte, so ergibt sich ein unendlich hoher Wert, der keinerlei physikalische Aussagekraft hat. Für einen Quantenfeldtheoretiker, der schon bei einfachen Rechnungen regelmäßig Unendlichkeiten begegnet, ist das zwar nicht Besorgnis erregend. In solchen Fällen wendet er routinemäßig ein mathematisches Werkzeug an, die so genannte Renormierung: Sie formt aus den unendlich großen Werten endliche Zahlen, die auch tatsächlich die Physik korrekt beschreiben. Eines der prominentesten Experimente, bei dem sie zum Einsatz kommt, ist der Large Hadron Collider bei Genf, hier stimmen die Messungen der bei Teilchenkollisionen auftretenden Streuprozesse ebenfalls äußerst präzise

mit den durch die Renormierung vorhergesagten Werten überein. Es liegt also nahe, das Verfahren auch auf die Berechnung der kosmologischen Konstanten anzuwenden. Dennoch ist das Resultat ernüchternd: Der errechnete Wert liegt um das  $10^{54}$ -Fache über dem von Kosmologen ermittelten Messwert. Verzichtet man auf die Renormierung und begnügt sich mit einer Abschätzung, erhält man sogar einen Wert, der um das  $10^{120}$ -Fache zu hoch liegt. Könnten wir einen Schalter umlegen, der die kosmologische Konstante in unserem Universum auf einen derart hohen Wert einstellt, würden Hobbyastronomen mit ihren Teleskopen beobachten, wie es Galaxienhaufen vor ihren Augen förmlich auseinanderreißt. Wo das Problem herrührt, ist allerdings völlig unklar. Liegt es in der Relativitätstheorie begründet oder vielleicht doch in der Quantenfeldtheorie? Hat die kosmologische Konstante etwa gar nichts mit der Vakuumenergie zu tun?

### Sind Dunkle Materie und Dunkle Energie auf noch verborgene Weise miteinander verknüpft?

Zu diesem Problem gesellen sich weitere unbehaglich erscheinende Zufälle. So ist die Energiedichte der Dunklen Energie heute etwa doppelt so groß wie die Dichte der Materie in unserem Universum. Theoretisch spricht aber nichts dagegen, dass sie hundert-, tausend- oder millionenfach größer oder auch kleiner als die der Materie ist. Ist die Tatsache, dass Materie – die zum weitaus größeren Teil aus Dunkler Materie besteht – und Dunkle Energie in vergleichbarem Maß zur Energiedichte beisteuern, reiner Zufall? Oder müssen wir sie als Hinweis auf eine wie auch immer geartete Verknüpfung auffassen? Die Messungen von Perlmutter, Riess und Schmidt ergaben zudem, dass die Beschleunigung der Expansion vor rund sechs Milliarden Jahren einsetzte. Auch dies ein Zufall? Genauso gut wären Startpunkte unmittelbar nach dem Urknall oder in ferner Zukunft denkbar.

Die Suche nach einer Lösung des Problems geht also weiter. Die allgemeine Relativitätstheorie lässt etwa die Existenz einer Substanz zu, deren Gravitation abstoßend wirkt. Ungeöhnlicherweise muss der Druck dabei stark negativ sein. (Man sollte nicht der Versuchung erliegen, sich eine anschauliche Vorstellung von einer solchen Größe zu machen. Sie tritt auch nicht mit den Dingen in unserer Umgebung in Wechselwirkung, entscheidend ist ihre gravitative Wirkung auf das Universum insgesamt.) Weil Druck nichts anderes als eine Energiedichte ist – er entsteht durch die ungeordnete Bewegung vieler Teilchen, die über Bewegungsenergie verfügen –, besitzt er gemäß  $E = mc^2$  ebenfalls Masse. Während positiver Druck Schwerkraft erzeugt, würde genügend negativer Druck gravitativ abstoßend wirken, könnte also die beschleunigte Expansion erklären. Die Theoretiker haben sogar einen Kandidaten für eine Substanz, die negativen Druck ausüben könnte: ein skalares Feld, das unseren Kosmos durchzieht und stark mit sich selbst wechselwirken kann. Ein alltägliches Beispiel für ein skalares Feld ist ein Temperaturfeld, bei dem jedem Punkt im Raum eine bestimmte Temperatur zugeordnet ist. Elektrische Felder etwa sind hingegen

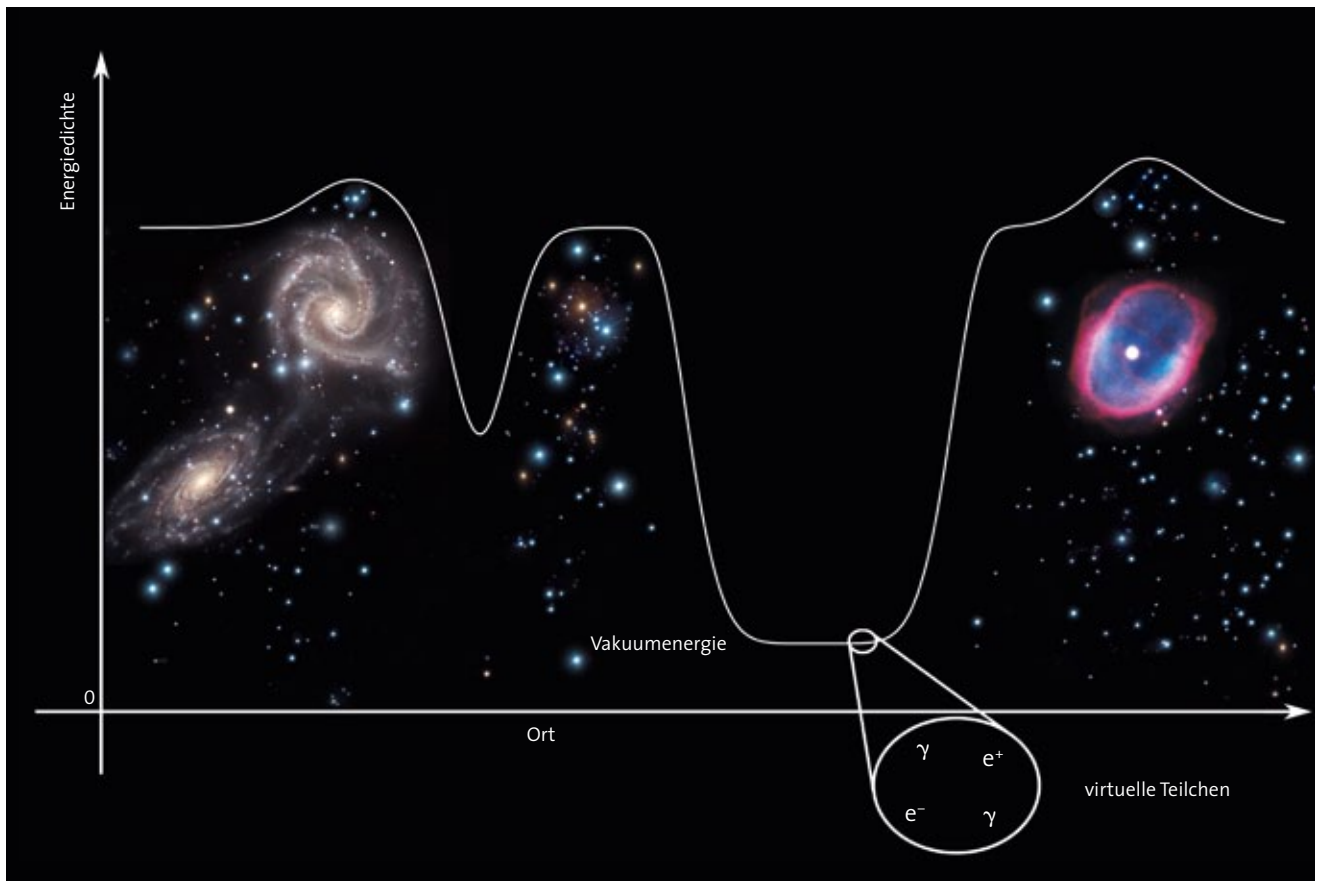
MEHR WISSEN BEI **Spektrum.de**



Unser Online-Dossier zum Thema »Kosmologie« finden Sie unter



[www.spektrum.de/thema/kosmologie/1188802](http://www.spektrum.de/thema/kosmologie/1188802)



ELENA SELLENTIN, BILDQUELLEN: ESO

Selbst dort im Universum, wo weder Teilchen noch Felder existieren, fällt die Energiedichte nie auf null ab. Weil auf Grund von Quanteneffekten aus dem »Nichts« kontinuierlich so genannte virtuelle Teilchen entstehen, die sogleich wieder verge-

hen, ist die Vakuumenergie stets positiv. Zudem ist sie im Wesentlichen konstant und erfüllt das gesamte Universum. So brachte sie sich als Kandidatin für die Erklärung der Dunklen Energie ins Spiel.

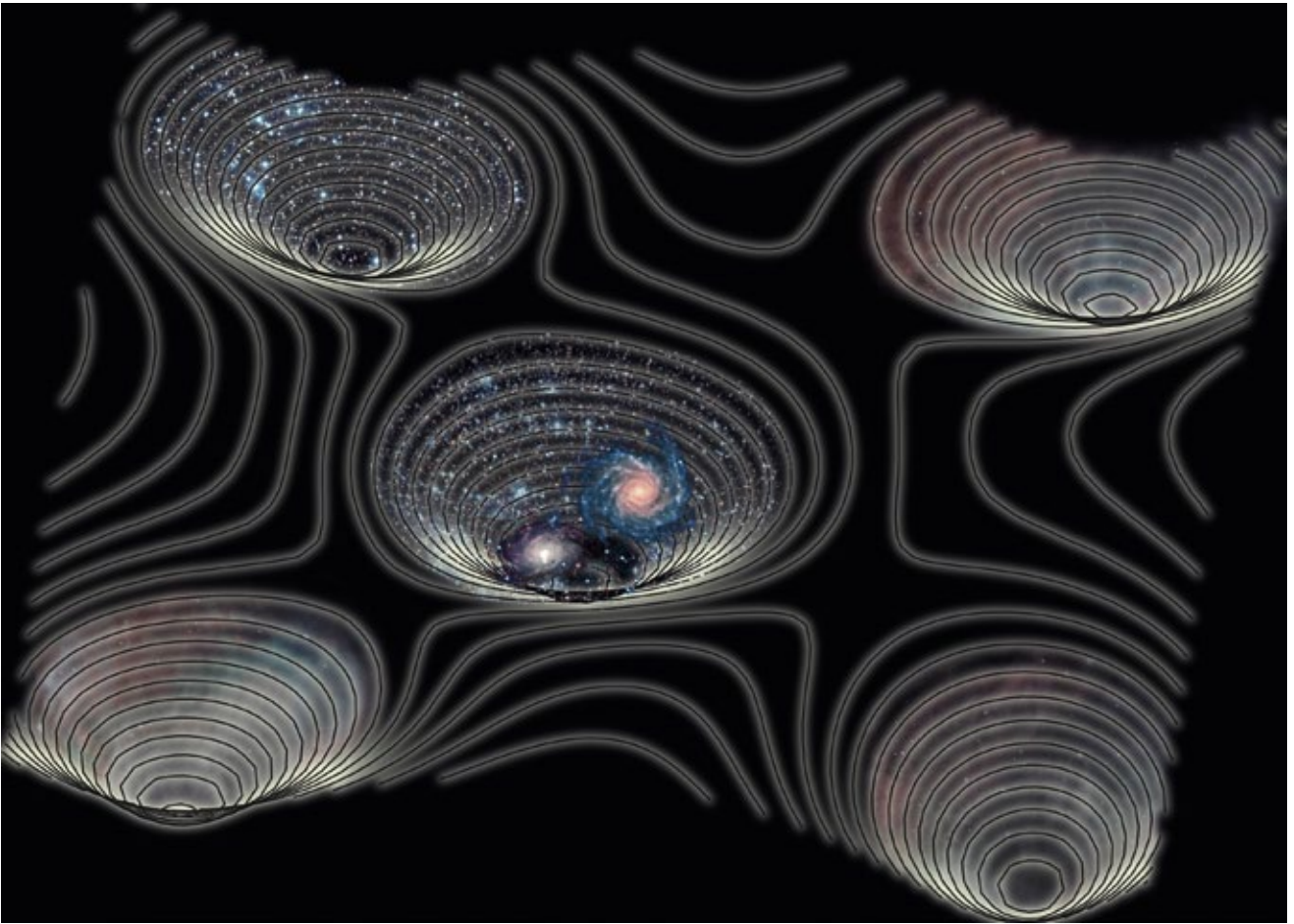
nicht skalar. Sie haben an jedem Raumpunkt nicht nur einen Wert, sondern zusätzlich auch eine Richtung, nämlich die, in welche die elektrische Abstoßung oder Anziehung wirkt.

Vielleicht verbirgt sich aber etwas völlig anderes hinter der Dunklen Energie. Interpretieren wir die astronomischen Daten möglicherweise in einem falschen theoretischen Rahmen? Tatsächlich können wir nicht ganz sicher sein, ob die beschleunigte Expansion das ganze Universum erfasst oder sich nur auf die Umgebung unserer Galaxie beschränkt. Der Grund dafür ist leicht einsichtig. War nämlich das Licht eines Objekts, das wir heute beobachten, mehr als sechs Milliarden Jahre zu uns unterwegs, wurde es zu einem Zeitpunkt emittiert, als die beschleunigte Expansion noch nicht wirksam war – für Raumregionen in entsprechend großer Entfernung können wir also prinzipiell nicht entscheiden, ob sich die beschleunigte Expansion auch dort bemerkbar macht.

Die beschleunigte Expansion könnte daher auf die Umgebung unserer Heimatgalaxie beschränkt sein. Dann wäre unser Universum möglicherweise nicht so homogen, wie wir das annehmen. Läge unsere Milchstraße beispielsweise im Zentrum einer untypisch leeren kosmischen Region, so würde die Expansionsgeschwindigkeit dieser Region das kosmi-

sche Mittel übersteigen und uns zu falschen Schlüssen führen. Für eine solche hypothetische Blase lässt sich durch astronomische Beobachtungen allerdings eine Maximalgröße ermitteln. Diese ist etwas zu klein, als dass die Blase die beschleunigte Expansion überzeugend erklären könnte. Zudem müsste, damit dieses Argument voll zum Tragen kommt, unsere Milchstraße auffällig genau im Zentrum der Blase liegen – denn nur dann erklärt es auch die Beobachtung, dass die Expansion um uns herum völlig symmetrisch abläuft. Dann aber widerspricht es erneut dem kopernikanischen Prinzip, das jegliche Sonderstellung des Menschen im Universum bestreitet. Die beschleunigte Expansion scheint also doch eher ein Phänomen zu sein, welches das gesamte Universum und nicht nur einen Teil davon umfasst.

Forscher haben auch eine radikale Lösung des Problems vorgeschlagen. Dabei verzichten sie völlig auf die kosmologische Konstante oder auf eine neue Energieform, können aber trotzdem eine Theorie formulieren, der zufolge wir in einem immer schneller expandierenden Universum leben. Sie setzen allerdings voraus, dass die allgemeine Relativitätstheorie noch keine ganz korrekte Beschreibung der Gravitation liefert. Deren Präzisionstests erfolgte nämlich bisher nur in der



Verdächtigerweise liegt der Wert der kosmologischen Konstanten in genau dem schmalen Wertebereich, in dem die Voraussetzungen für die Entstehung von Sternen, Galaxien und damit Leben gegeben sind – obwohl sie im Prinzip jeden beliebigen Wert hätte annehmen können. Die Existenz vieler Subuniversen (Illustration)

mit je unterschiedlichen Naturkonstanten könnte diesen Umstand erklären: Wir würden dann eben in einem derjenigen Subuniversen leben, in denen der Wert der Konstanten die Bildung von Galaxien zulässt (Mitte). Andere wären stattdessen von nebelartig verteilter Materie erfüllt.

Umgebung der Erde, in unserem Sonnensystem und an Objekten wie dem erwähnten Doppelpulsar PSR J0737-3039. Doch Merkur umrundet die Sonne in nur wenigen zehn Millionen Kilometern. Die beiden Pulsare trennen gar nur wenige Millionen von Kilometern. Tests von Schwerkräfteeffekten auf solch winzigen Distanzen belegen nicht, dass die Gravitation auch dort Einsteins Gesetz gehorcht, wo Galaxien Milliarden Lichtjahre voneinander entfernt sind. Wir können daher nicht ausschließen, dass die Messdaten, aus denen wir auf die Existenz Dunkler Energie schließen, letztlich nur ein Artefakt aus der Verwendung eines noch nicht endgültigen Gravitationsgesetzes sind, das uns in die Irre führt.

Trotz allem gilt die kosmologische Konstante nach bisheriger Datenlage als einfachste und daher für die meisten Kosmologen wahrscheinlichste Erklärung für die beschleunigte Expansion. Doch dann bleibt immer noch das Unbehagen über die genannten »Zufälle«, etwa über die von ihr beige-steuerte Energiedichte, deren Wert so verdächtig nah am Beitrag der Dunklen Materie liegt. Dieses Unbehagen lässt sich

vielleicht ein wenig abmildern, wenn man fragt, ob der Wert der kosmologischen Konstante eigentlich mit der Existenz der Menschheit kompatibel ist. Diese Fragestellung ist als das anthropische Prinzip bekannt, das – in unterschiedlichen Varianten – besagt, dass unser Universum Leben allein schon aus dem Grund ermöglichen *mus*s, da wir es sonst nicht beobachten könnten. Das Prinzip ist allerdings umstritten, weil es dem Anspruch der Naturwissenschaften nicht genügt, nachvollziehbare Erklärungen für die Beschaffenheit der Welt zu finden. So kommt es meist nur dann zur Anwendung, wenn ein naturwissenschaftliches Modell an die Grenzen seiner Erklärungskraft stößt, weil sich eine unerwartete Beobachtung nicht mehr darin einfügen lässt. Ließe man das anthropische Prinzip gelten, könnte man in einem solchen Fall allerdings übersehen, dass möglicherweise gerade diese Beobachtung entscheidende Hinweise darauf gibt, dass wir das Modell durch ein besseres ersetzen müssen.

Der bestechenden Logik des Prinzips kann man sich dennoch nicht leicht erwehren. Sehen wir uns an, wie es den

Wert der kosmologischen Konstante rechtfertigen könnte. Für unsere heutige Existenz ist es notwendig, dass unser Universum Galaxien hervorbringen konnte. Solche kosmischen Strukturen entstanden, weil diffus verteilte Materie sich entgegen der kosmischen Expansion unter ihrer eigenen Schwerkraft zusammenzog. In einem Universum, in dem die Expansion übermächtig wäre, würde die Materie stattdessen auseinandergetrieben; es bräuchte keine Galaxien hervor, sondern wäre für immer von nebelhaft verteilter Materie erfüllt. Theoretischen Überlegungen zufolge darf die kosmologische Konstante, damit Galaxien entstehen, höchstens um etwa das 100-Fache größer sein, als wir messen. Aus dieser Perspektive ist ihr Wert also plötzlich gar nicht mehr verwunderlich. In einem Universum, in dem die kosmologische Konstante den von der Quantenfeldtheorie vorhergesagten ungeheuer großen Wert besäße, könnten Menschen schließlich gar nicht leben.

### Manches Rätsel ließe sich leicht lösen, falls unser Universum nicht das einzige ist

Physikalische Rückendeckung erhält diese Argumentation durch einige Varianten der Theorie der kosmischen Inflation, die ebenfalls Bestandteil des kosmologischen Standardmodells ist. Ihr zufolge durchlief unser Universum unmittelbar nach seiner Entstehung eine sehr kurze Phase extrem schneller, beschleunigter Expansion. Noch ist aber unklar, durch welchen Mechanismus die Inflation wieder aufhörte und in die gemächliche Expansion der folgenden Jahrmilliarden überging. Manche Theoretiker spekulieren, dass sie in den meisten Raumregionen weiterhin anhält, in manchen aber zufällig endete. Und nur dort, wo sie endete, konnte jeweils ein Universum entstehen. Demzufolge gäbe es also mehrere, möglicherweise unendlich viele Subuniversen, von denen das unsere nur eines ist. Und in jedem dieser Subuniversen könnte die kosmologische Konstante einen anderen Wert annehmen. Dann wäre die Sache einfach: Wir leben eben in einem derjenigen Subuniversen, in denen der Wert der kosmologischen Konstante die Existenz von Leben erlaubt.

Während wir mittlerweile auf eine bald 100-jährige Geschichte der kosmologischen Konstante zurückschauen, sind ihre Alternativen viel jüngeren Datums. Obwohl die Wissenschaftler, die sie erforschen, das Problem ebenfalls noch nicht gelöst haben, verhelfen sie uns doch schon zu faszinierenden Erkenntnissen. Beispielsweise zeigte sich, dass die mathematische Beschreibung der heutigen beschleunigten Expansion jener der Inflation gleicht, auch wenn Erstere seit Milliarden Jahren andauert und Letztere je nach Modell nur für den Bruchteil einer Sekunde stattfand. Nehmen wir an – rein spekulativ –, während der Inflation hätten Astronomen den Himmel beobachtet und keine besseren Instrumente besessen als heutige Wissenschaftler. Dann hätten sie, genau wie wir heute, nicht entscheiden können, ob neben der kosmologischen Konstanten noch eine andere Art Dunkler Energie im Spiel ist. Weil Wissenschaftler einfache Erklärungen komplizierteren vorziehen, hätten sie es fürs Erste wohl bei

der Annahme einer kosmologischen Konstanten belassen und vermutet, dass das Universum am Ende wüst und leer sein würde. Dennoch ging die Inflation zu Ende und hinterließ erst die Saatkörner, aus denen sich jene Strukturen im Universum entwickelten, denen wir unser eigenes Leben verdanken. Die Astronomen aus der Zeit der Inflation hätten mit ihrer Annahme also falsch gelegen.

Das bedeutet für uns: Selbst wenn sich fürs Erste die These bewahrheiten sollte, dass die Dunkle Energie, die heute das Universum auseinandertreibt, durch die kosmologische Konstante beschrieben wird, würde die Frage nach unserer Zukunft auch dann noch offen bleiben. Entweder legt die Expansion unseres Kosmos tatsächlich weiter an Geschwindigkeit zu – dann werden sich Galaxien und schließlich selbst Sterne und Planeten mit der Zeit bis in alle Ewigkeit weiter voneinander entfernen, so dass schließlich überall finstere Nacht herrscht. Oder aber wir entdecken in neuen Daten unerwartete Hinweise, die auf ein ganz anderes Schicksal des Universums hoffen lassen. ~

#### DIE AUTOREN



**Elena Sellentin** beschäftigte sich in ihrem Physikstudium an der Universität Heidelberg mit der Entstehung von Planeten. Seit 2013 promoviert sie am dortigen Institut für theoretische Physik über Kosmologie und ist zudem Mitarbeiterin

des Heidelberger Hauses der Astronomie. **Matthias Bartelmann** lehrt seit 2003 theoretische Astrophysik an der Universität Heidelberg. Von der Ludwig-Maximilians-Universität München und dem Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching, wo er über Gravitationslinsen promovierte, ging er 1994 als Postdoc an das Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics und habilitierte sich 1998 in München. Vor seinem Wechsel nach Heidelberg leitete er fünf Jahre lang die deutschen Teilprojekte zur Satellitenmission Planck.

#### QUELLEN

**Perlmutter, S. et al.:** Measurement of  $\Omega$  and  $\pi$  from 42 High-Redshift Supernovae. In: *Astrophysical Journal* 517, S. 565–586, 1999

**Riess, A. G. et al.:** Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant. In: *Astronomical Journal* 116, S. 1009–1038, 1998

#### LITERATURTIPPS

**Amendola, L., Tsujikawa, S.:** *Dark Energy. Theory and Observations.* Cambridge University Press, 2010

*Luca Amendola (Universität Heidelberg) und Shinji Tsujikawa (University of Tokyo) haben das erste Fachbuch zur Dunklen Energie verfasst.*

**Martin, J.:** Everything You Always Wanted to Know About the Cosmological Constant Problem (But Were Afraid to Ask), <http://arxiv.org/abs/1205.3365>, 15. Mai 2012

*Jérôme Martin vom Institut d'Astrophysique de Paris führt auf 50 Seiten in alle physikalisch-mathematischen Aspekte der kosmologischen Konstanten ein.*

Dieser Artikel im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1298015](http://www.spektrum.de/artikel/1298015)

# Sonnenbrand im Grünen

Eine alte Gärtnerregel auf dem Prüfstand:  
»Verbrennen« die Blätter von Pflanzen wirklich,  
wenn man sie bei prallem Sonnenschein gießt?

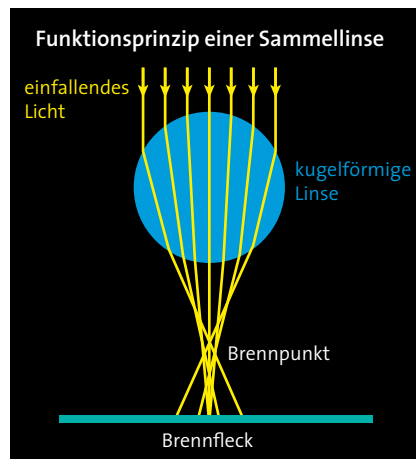
VON H. JOACHIM SCHLICHTING

»... Wenn in den Tropfen frisch erquickter Blätter  
Die neue Sonne tausendfach sich spiegelt ...«

*Johann Wolfgang von Goethe (1749–1832)*

Wer hat nicht schon in mittäglicher Sommerhitze die Pflanzen in seinem Garten bedauert, die ausgedorrt ihre Blätter hängen lassen. Der Gartenschlauch wäre zwar zur Hand, aber eine weit verbreitete Gärtnerregel besagt: Wässere niemals in praller Sonne! Die Warnung erscheint durchaus plausibel. Wenn man den Schlauch trotzdem auf die Blätter richtet, fallen im Inneren des Schlagschattens, den die an ihnen hängen gebliebenen Wassertropfen nun werfen, tatsächlich helle Flecke gebündelten Lichts auf (Foto rechts oben).

Doch reicht ihre Intensität, um Brandflecken hervorzurufen? Laut den Gesetzen der geometrischen Optik wird das in die Tropfen eindringende Licht beim Durchqueren der Grenzfläche zwischen Luft und Wasser zum Einfallslot hin gebrochen. Die Form der Tropfen lässt diese wie eine Sammel-



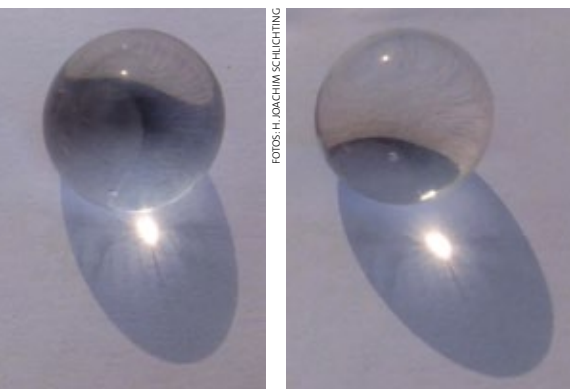
linse funktionieren: Sie lenken die Lichtstrahlen zunächst aufeinander zu, bis sie sich überkreuzen und danach wieder auseinanderstreben (siehe Grafik oben).

Stellen wir uns nun vor, dass sich diesem Lichtbündel ein Hindernis in den Weg stellt. Je nachdem, wie nah es dem Kreuzungspunkt des Lichts ist, desto stärker konzentriert sich auf seiner Oberfläche das Licht. Eine Glaskugel von zwölf Millimeter Durchmesser, auf ein Blatt Papier in der Sonne gelegt, gibt uns ein Gefühl für die Situation (siehe Fotos links). Der Brennfleck durchmisst etwa 2,4 Millimeter, fokussiert das Licht also auf etwa ein Fünftel des Kugeldurchmessers. Da Durchmesser und Fläche in einem quadratischen Verhältnis zueinander stehen, ist die Energiedichte auf der kleinen Fläche 25-mal höher als sie es bei direktem Lichteinfall wäre.

Darüber hinaus können wir davon ausgehen, dass sich ein Blatt Papier, das

wir der Sonne aussetzen, leicht um rund 20 Grad Celsius erwärmt. Weil die Temperaturerhöhung proportional zur absorbierten Energie ist, müssen wir also mit einer Endtemperatur von bis zu  $25 \times 20$  Grad Celsius = 500 Grad Celsius rechnen. Weil Schreibmaschinenpapier schon bei 360 Grad zu brennen beginnt, reicht das. Nach wenigen Minuten zeigen sich auf der papierernen Unterlage deutliche Verbrennungsspuren. Ob ein in vollem Saft stehendes Pflanzenblatt der Bestrahlung mehr entgegenzusetzen hat? Der Test zeigt, dass alles einfach nur ein wenig länger dauert: Man muss etwa dreimal so lange warten, bis das Blatt dunkel wird.

Gegen die Aussagekraft des Glaskugel-experiments könnte man einwenden, dass Wasser mit  $n = 1,33$  einen kleineren Brechungsindex hat als Glas mit typischerweise  $n = 1,5$ . Doch führt der Unterschied lediglich dazu, dass die Lichtstrahlen vom Glas stärker zum Einfallslot hin gebrochen werden. Folglich ist der Brennfleck mit dem kleinsten Durchmesser (der Ort, wo die Lichtstrahlen am stärksten gebündelt sind; im Idealfall ein Brenn-»Punkt«) bei einer Linse aus Wasser etwas weiter entfernt als bei einer aus Glas. In welchem Fall das Licht auf dem Blatt stärker oder schwächer konzentriert würde, lässt sich aber nicht allgemein beantworten. Das hängt vor allem von der Form des Tropfens und darüber hinaus vom Winkel ab, der zwischen Blatt und Sonnenstrahlen liegt, und damit auch von der Tageszeit und sogar der geografischen Breite.



Auch eine kleine Glaskugel fokussiert das Licht. Links ist das Ergebnis bei hohem und rechts bei niedrigerem Sonnenstand zu sehen.





Kugelförmige Tropfen im Sonnenlicht werfen einen Schlagschatten, in dessen Inneren fokussiertes Licht einen hellen Fleck hervorruft. Zu sehen ist das Blütenblatt eines Stiefmütterchens kurz nach einem Regenschauer.

Im Fall linsenförmiger Tropfen befinden sich die Brennflecken in der Regel im Bereich der Kontaktfläche zwischen Tropfen und Blatt. Dann beugt die kühlende Wirkung des Wassers Verbrennungen vor.



Damit es aber überhaupt zur Bildung von Tropfen kommt, müssen die Blätter mindestens ein wenig hydrophob, also Wasser abweisend sein. Das sind sie in der Regel, denn Blätter atmen durch Spaltöffnungen, so genannte Stomata. Würden diese verstopft, weil das Wasser, statt Tropfen zu bilden, sich in einem Film über das Blatt legt, könnte die Pflanze ersticken.

### Effektive Wasserkühlung

Auf vielen Pflanzen nehmen die Tropfen Linsenform an, die für Gärtner völlig unbedenklich ist. Die Kontaktfläche zum Blatt ist dann relativ groß (siehe Foto rechts), so dass sich der Brennfleck fast immer innerhalb dieser Fläche befindet. Auf diese Weise kann ihn der Tropfen mit seiner großen Wärmekapazität sehr effektiv kühlen. Auch wenn das gar nicht unbedingt nötig ist: Der Brennfleck ist im Fall eines linsenförmigen Tropfens nämlich recht ausgedehnt, weil der Brennpunkt relativ weit hinter dem Blatt liegt. Entsprechend gering fällt die Temperaturerhöhung aus.

Anders ist es bei stark Wasser abweisenden Blättern. Auf ihnen sorgen winzige Härchen für eine gewisse Rauigkeit und verhindern, dass das Wasser bis zur eigentlichen Blattoberfläche vordringt. Der Tropfen grenzt also vor allem an Luft, was aus energetischen Gründen zu kugelförmigen Tropfen führt – mit umso perfekterer Kugelgestalt, je kleiner sie sind (siehe Spektrum der Wissenschaft 4/2009, S. 29). Dann aber kühlen sie den Brennfleck nicht, weshalb

der Linseneffekt seine Wirkung voll entfalten kann.

Die Brennglaswirkung der Tropfen hat auch Wissenschaftler auf den Plan gerufen. 2010 kamen sie bei experimentellen und theoretischen Untersuchungen zu dem Ergebnis, dass Tropfen auf glatten Blättern das Blattgewebe nicht schädigen können. Nur im Fall stark Wasser abweisender Blätter wie etwa denen des Schwimmpfarns, welche die Tropfen durch Härchen auf Abstand halten, kommt es tatsächlich zu Verbrennungen. Ihre Ergebnisse übertrugen die Wissenschaftler sogleich auch kühn auf den Menschen. Unter »idealen« Bedingungen, so schreiben Ádám Egri von der Eötvös-Loránd-Universität in Budapest und seine Kollegen, können Wassertropfen, die nach dem Baden in der Körperbehaarung hängen geblieben sind, ebenfalls zu einem Sonnenbrand führen.

Was lernen wir also aus der alten Gärtnerregel? Schauen wir einige Minuten nach einem Regenschauer mit anschließendem Sonnenschein in den Garten, werden wir vor allem trockene Pflanzen entdecken, die aus ihrer Hydrophobie keinen Hehl machen. Und solange die wenigen verbleibenden Tropfen keine Kugelgestalt annehmen, kann eigentlich nichts passieren. Trotzdem kann es sinnvoll sein, die Regel zu befolgen: Enthält das Gießwasser zwecks Düngung mineralische Salze, bleiben diese auf den Blättern zurück, falls das Wasser allzu schnell verdunstet. Dann droht statt der thermischen die chemische »Verbrennung«. ☺

### DER AUTOR



**H. Joachim Schlichting** war Direktor des Instituts für Didaktik der Physik an der Universität Münster. 2013 erhielt er den Archimedes-Preis für Physik.

### QUELLE

**Egri, Á. et al.:** Optics of Sunlit Water Drops on Leaves: Conditions Under Which Sunburn is Possible. In: *New Phytologist* 185, S. 979–987, März 2010

### WEBLINKS

Dieser Artikel und Links zu den im Text genannten Publikationen im Internet:  
[www.spektrum.de/artikel/1298016](http://www.spektrum.de/artikel/1298016)

# Schalten mit Lichtblitzen

Die elektronische Signalverarbeitung wird immer schneller. Bei der Weiterentwicklung der nötigen Bauteile stoßen Ingenieure jedoch allmählich an die Grenzen des technisch Machbaren. Einen möglichen Ausweg bieten ultrakurze Laserpulse.

Von Martin Schultze und Ferenc Krausz

**E**in kleines elektrisches Bauteil führte Mitte des 20. Jahrhunderts zu einer technischen Revolution: Der Feldeffekttransistor erlaubte es fortan, Strom relativ einfach zu beeinflussen und begründete so unsere moderne Datenverarbeitung und Kommunikation.

Heute enthält der Prozessor eines Smartphones rund eine Milliarde dieser Transistoren. Jeder von ihnen ist nur etwa 20 Nanometer groß – kleiner noch als viele Viren. Doch die stetige Miniaturisierung der Schaltkreise wird bald an physikalische Grenzen stoßen. Brauchen wir also eine neue Revolution?

Das Funktionsprinzip ist seit den ersten Feldeffekttransistoren im Wesentlichen gleich geblieben. Das Bauteil besteht aus Halbleitern, in denen Strom normalerweise nicht fließt. Erst eine kleine angelegte Spannung »legt den Schalter um« und macht das Material leitfähig für elektrischen Strom.

Der Gedanke, der dieses Prinzip revolutionieren könnte: Obwohl die Bauelemente nicht unbegrenzt verkleinert werden können, ließen sich Schaltvorgänge dennoch radikal beschleunigen – mit Hilfe von Lichtwellen. Statt konventionell angelegter Spannungen könnten die elektrischen Felder von Laserblitzen Ströme durch die Schaltkreise fließen lassen und dabei wesentlich schnellere Geschwindigkeiten erlau-

ben. Ließe sich ein Transistor mit dem Feld eines Laserpulses steuern, wie sie heute etwa bereits in Medizin und Materialbearbeitung eingesetzt werden, wären diese Vorgänge innerhalb von Femtosekunden (Millionstel einer Milliardstel Sekunde) möglich und damit noch viele tausende Male schneller als die Schaltzyklen bei den besten herkömmlichen Transistoren.

Tatsächlich fanden wir ein Material – Quarz –, dessen Leitfähigkeit wir mit einem solchen ultrakurzen Laserpuls, in dem das elektrische Feld kaum mehr als eine Schwingung ausführt, an- und wieder ausschalten konnten. Diese am Max-Planck-Institut für Quantenoptik (MPQ) erzeugten Impulse ermöglichten uns zudem, die Dynamik dieser Schaltprozesse im Verlauf des Lichtblitzes zu verstehen.

Um diese Effekte nicht nur auszulösen, sondern auch im Detail zu untersuchen, mussten wir sie jedoch noch wesentlich feiner abtasten, die femtosekundenschnellen Prozesse also in noch kleinere Zeitintervalle zerlegen. Dazu benutzten wir Techniken aus der Attosekundenphysik, die ihre Entwicklung vor mittlerweile mehr als zehn Jahren begann. Im Vergleich zu Experimenten mit Femtosekundenlasern können wir noch einmal tausendfach schnellere Vorgänge im Bereich von milliardstel Milliardstel Sekunden zu beobachten (siehe »Elektronenjagd mit Attosekundenblitzen«, SdW 2/2009, S. 32).

## AUF EINEN BLICK

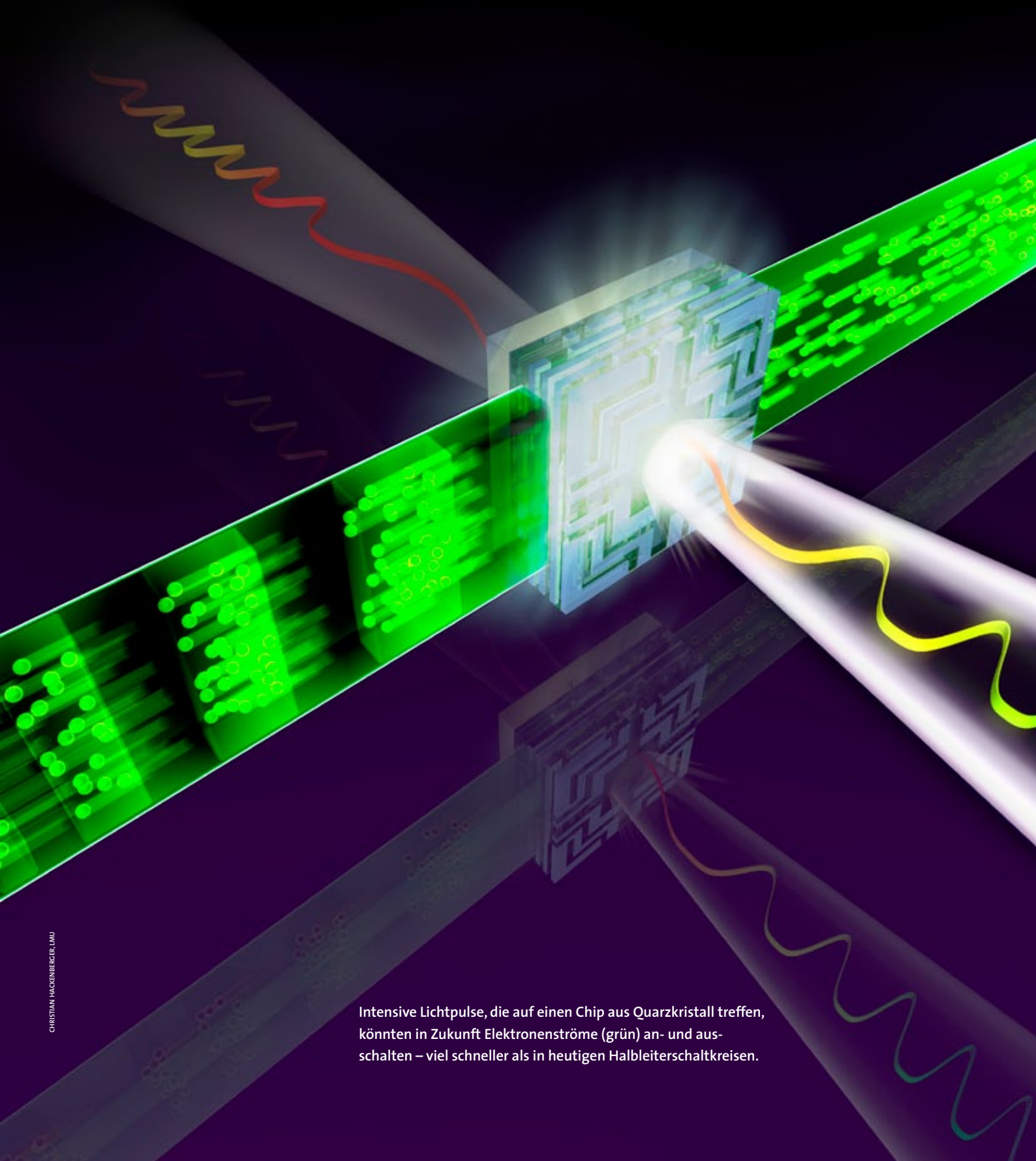
### EINE GANZ NEUE ELEKTRONIK

- 1** Im starken Feld intensiver Laserpulse können Nichtleiter (Dielektrika) **elektrischen Strom** transportieren.
- 2** Der Effekt ist vergleichbar mit den **Vorgängen** in Halbleiterttransistoren beim Anlegen einer Spannung – allerdings **vieltausendfach schneller**.
- 3** Auf die Spur kamen die Forscher diesem Effekt dank **ultrakurzer Laser- und Röntgenpulse** aus der Trickkiste der Attosekundenphysik.

### Ein höchst ungewöhnlicher Laser

Seit etwa 20 Jahren können Physiker mit speziellen Lasern einzelne Impulse erzeugen, die nur einige Femtosekunden lang sind und nur wenige Schwingungen des elektrischen Feldes dauern. Viele ihrer Eigenschaften unterscheiden sich von denen herkömmlicher Laser. Der augenfälligste Unterschied ist, dass sie als weißes Licht erscheinen, da ihr Spektrum aus vielen verschiedenen Frequenzen, also Farben, zusammengesetzt ist.

Daher können die Lichtblitze auch unfassbar kurz sein, denn die mögliche zeitliche und die spektrale Breite eines Si-



Intensive Lichtpulse, die auf einen Chip aus Quarzkristall treffen, könnten in Zukunft Elektronenströme (grün) an- und ausschalten – viel schneller als in heutigen Halbleiterschaltkreisen.

gnals sind miteinander verknüpft. Die Abstände zwischen den einzelnen Impulsen sind im Vergleich dazu scheinbar endlos. Die Laser erzeugen im Lauf einer Sekunde einige tausend Lichtpulse von wenigen Femtosekunden Dauer. Wäre ein solcher Kurzpuls laser 100 Jahre lang Tag und Nacht in Betrieb, so hätte er in diesem Zeitraum zusammengenommen lediglich eine tausendstel Sekunde lang Licht ausgesendet.

Solche Laserpulse wollten wir einerseits verwenden, um die Eigenschaften der untersuchten Materialien gezielt zu verändern. Andererseits konnten wir mit ihrer Hilfe zugleich die im Material ausgelösten Prozesse studieren – über den Umweg der Erzeugung von Attosekundenimpulsen. Dabei regt ein Femtosekunden-Lichtpuls Elektronen in Atomhüllen an, die daraufhin Röntgenstrahlung aussenden (siehe Kasten »Der Trick hinter den Röntgenblitzen« unten).

Diese Blitze aus Röntgenlicht dauern nur etwa 70 Attosekunden. Sie sind die kürzesten Signale, die heute technisch erzeugt werden können. Mit ihnen lassen sich sogar die Bewegungen von Elektronen im Inneren von Atomen und Molekülen in Echtzeit abbilden und – wie in unserer Studie – die Elektronendynamik in Festkörpern verfolgen. Da die Röntgenblitze ausgehend von den Laserimpulsen erzeugt werden, haben sie eine ideale Form für Messungen mit hoher zeitlicher Auflösung: Röntgen- und Lichtblitz sind ein perfekt synchronisiertes Paar von Pulsen, deren zeitliche Abfolge sich sehr genau einstellen lässt.

Dadurch wird die so genannte Anrege-Abfrage-Technik möglich. Sie dient dazu, Vorgänge zu erfassen, die sich wegen ihrer Geschwindigkeit der Untersuchung mit anderen Methoden entziehen – bei unseren Experimenten also die extrem schnellen Bewegungen von Elektronen in Festkörpern.

Bei diesem Vorgehen regt ein erster Laserimpuls Elektronen im untersuchten Material an. Dann tastet ein nach einer

vorgegebenen Zeitverzögerung eingestrahler Attosekunden-Röntgenpuls die vom ersten Lichtblitz ausgelöste Entwicklung ab. Begrenzt wird die Zeitauflösung dieser Methode nur durch zwei Aspekte: erstens die Röntgenpulsdauer und zweitens die kleinstmögliche Schrittweite dabei, die Zeitverzögerung zwischen beiden Impulsen zu ändern. Beide liegen heute im Bereich von wenigen zehn Attosekunden. Durch wiederholte Messungen mit immer anderem Zeitunterschied wird der zu untersuchende Effekt allmählich abgetastet. So entsteht gewissermaßen Bild für Bild ein Film des Vorgangs. Das kann Prozesse sichtbar machen, die nur wenige Attosekunden dauern.

Attosekundenblitze eignen sich also ideal, um zu untersuchen, wie sich die Elektronen in einem Festkörper verhalten, nachdem sie das intensive elektrische Feld eines Kurzpuls lasers getroffen hat und sind damit das perfekte Werkzeug, um unsere Frage zu beantworten: Können wir in einem geeigneten Material lichtgetriebene Schaltprozesse erreichen?

### Eingespernte Elektronen

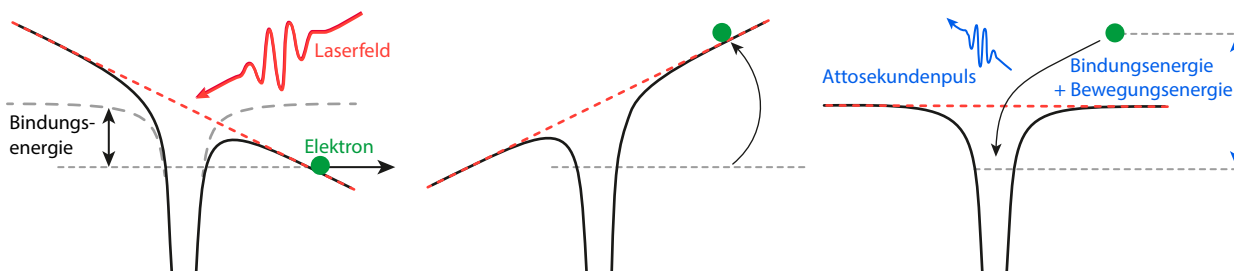
Atome sind in kristallinen Festkörpern in Form eines dreidimensionalen Gitters angeordnet. Sie teilen sich einige der an sie gebundenen Elektronen und werden zu positiv geladenen Rumpfatomen. Bewegt sich ein Elektron durch dieses Gitter, üben die Rumpfatome und die anderen Elektronen eine Kraft auf es aus. Diese verändert sich räumlich periodisch und führt letztlich dazu, dass sich das Elektron nur noch mit bestimmten Ausbreitungsgeschwindigkeiten bewegen und daher nur ausgewählte Energien besitzen kann. Diese Energien sind in so genannten Bändern sortiert. Sie bilden die Bandstruktur des Festkörpers.

Im Gegensatz zu Metallen weisen Halb- und Nichtleiter (Dielektrika) eine »Bandlücke« auf. Das bedeutet, dass zwi-

## Der Trick hinter den Röntgenblitzen

**Mit Femtosekundenlasern erzeugen** Physiker in einem dreistufigen Prozess ultrakurze Röntgenblitze: Trifft der Lichtimpuls auf ein Edelgasatom, verformt das elektrische Feld des Laserlichts (rot) kurzzeitig die Wände des so genannten Potenzialtopfs (graue gestrichelte Linie), der die Elektronen im Ausgangszustand an den Atomkern bindet (links). Daraufhin kann das Elektron den Bereich des anziehenden Atompotenzials ver-

lassen. Es ist nun frei und wird vom elektrischen Feld des Laserpulses beschleunigt. Nach einer halben Schwingungsperiode kehrt dieses Feld sein Vorzeichen um (Mitte). Das Elektron wird zurück zum Atomkern geschleudert und nimmt seinen ursprünglichen Zustand im Potenzialtopf wieder ein (rechts). Die überschüssige Bewegungsenergie strahlt es als Röntgenphoton (blau) ab.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: MARTIN SCHULTZE UND FERENC KRAUSZ



Durch ein Röhrchen lassen Forscher im Max-Planck-Institut für Quantenoptik Edelgas in eine Experimentierkammer strömen, auf das sie intensive Pulse aus Laserlicht schießen. So regen sie die Atome im Gas an und erzeugen unsichtbare Röntgenblitze. Diese sind derart kurz, dass die Physiker mit ihnen sogar die Bewegungen von Elektronen in Atomen, Molekülen oder Festkörpern untersuchen können.

schen den Energiezuständen, die Elektronen im Kristall ohne äußere Einwirkung einnehmen («Valenzband») und den Zuständen, in die eine Anregung sie versetzen kann («Leitungsband») ein Energieunterschied besteht. Erst ein Einfluss, der ausreichend Energie auf die Elektronen überträgt, um sie in das Leitungsband zu befördern, macht das Material durchlässig für elektrischen Strom.

Denn: Wie leitfähig das Material ist, hängt von der Anzahl der Elektronen im Leitungsband ab. Beim Feldeffekttransistor regt eine äußerlich angelegte Spannung die Elektronen in dieses Energieband an. Mit ihr lässt sich die Ladungsträgerkonzentration im Leitungsband steuern und damit die Leitfähigkeit des Transistors an- und ausschalten. Verbessern lässt sich die Schaltgeschwindigkeit durch höhere Reinheit des Materials und kleinere Strukturen. Erstere macht den ungehinderten Transport von Elektronen möglich. Letztere verringern die Anzahl der Ladungsträger, die angeregt werden müssen, um die Leitfähigkeit zu verändern. Dank immer besserer Herstellungsverfahren hochreiner Kristalle und immer kleineren Strukturgrößen erreichten Ingenieure im Lauf der Jahrzehnte mit diesen Transistoren bereits enorme Schaltgeschwindigkeiten. In Forschungslaboren ist es heute sogar möglich, Strukturen im Bereich von zehn Nanometern herzustellen. Die schnellsten Rechenfrequenzen in solchen Schaltkreisen erreichen dabei unter Laborbedingungen mehr als 100 Milliarden Schaltungen pro Sekunde – das entspricht einer Schaltzeit von 10 000 Femtosekunden.

### Die Grenzen der herkömmlichen Technologien

Die Schaltgeschwindigkeit auf diesem Weg weiterzuschleunigen, erweist sich aber aus mehreren Gründen als problematisch. Die Schaltkreise fortgesetzt zu verkleinern, bedeutet nicht nur wegen der Komplexität der Herstellung

eine Herausforderung. In Strukturen, die nur noch wenige Nanometer groß sind, wirken sich zunehmend die Quanteneigenschaften der Elektronen aus. Werden die Ladungsträger räumlich stark eingeschränkt, führt das zur Aufspaltung der erlaubten Energiezustände, und die Bewegung der Elektronen hängt fortan wesentlich von diesen neuen Zuständen ab. Ein simples Bändermodell, das die Ladungsträger nur kollektiv berücksichtigt, reicht dann nicht mehr aus, um das elektronische Verhalten der Bauelemente zu beschreiben. Wissenschaftlich ist es zwar interessant, solche Strukturgrößen zu erreichen und die veränderte Energielandschaft der Elektronen zu studieren. Technisch wäre es jedoch sehr schwierig, sie dann auch weiterhin für die Signalverarbeitung einzusetzen. Dies könnte zum Ende der als Mooresches Gesetz bekannt gewordenen Erfahrung führen, nach der sich die Anzahl von Schaltelementen in kommerziellen Chips etwa alle zwei Jahre verdoppelt.

Zudem sind die Elektronen in stets kleiner werdenden Halbleiterstrukturen durch die angelegten Spannungen immer größeren Kräften ausgesetzt. Diese können den Bindungskräften zwischen den Atomen nahe kommen und das Bauteil selbst stark beeinflussen. Ohne das Material dabei zu zerstören, sind solche Bedingungen selbst im Labor nur sehr schwer zu handhaben.

### Energiepakete aus Licht

Dieser Umstand war ein Ansatzpunkt für unsere Experimente mit KurzpulsLasern, welche die abgestrahlte Energie in enorm kleine Zeitintervalle zwingen. Denn das hat eine wesentliche Konsequenz: Im zeitlichen Mittel ist die abgestrahlte Leistung zwar klein, für die Dauer der Lichtimpulse herrschen aber stärkere elektrische Felder, als mit jeder anderen Methode zur Verfügung stünden. Zudem lässt sich Laserlicht auf kleinste Flächen fokussieren.

## Ein Kristall wird zum Leiter

Auf eine dünne Quarzprobe (Bildmitte, dunkler Rahmen) trifft ein Femtosekundenpuls (rote Kurve). Währenddessen erlaubt eine Serie kurzer Attosekundenblitze (blaue Kurve) Aufschlüsse über die elektronische Struktur des Kristalls.

Um Elektronen in der Quarzprobe vom Valenz- ins Leitungsband zu befördern, sind gleichzeitig mehrere Laserphotonen (siehe Grafik rechts, rote Pfeile) nötig, denn ein einzelnes überträgt nur ungefähr ein Sechstel der Energie zum Überwinden der Bandlücke. Durch die extrem hohe Intensität des Fem-

tosekundenlasers wird ein solcher »Mehrphotonenprozess« aber möglich.

Die Röntgenphotonen des Attosekundenlasers (blauer Pfeil) können Elektronen dagegen aus einer tiefer gelegenen Atom- schale in das Leitungsband befördern. Befinden sich dort bereits Ladungsträger, ist dieser Prozess aber quantenmechanisch unterdrückt. Daher lässt sich anhand der absorbierten Röntgenstrahlung ablesen, ob die Probe durch den Femtosekundenpuls kurzzeitig leitend wird.

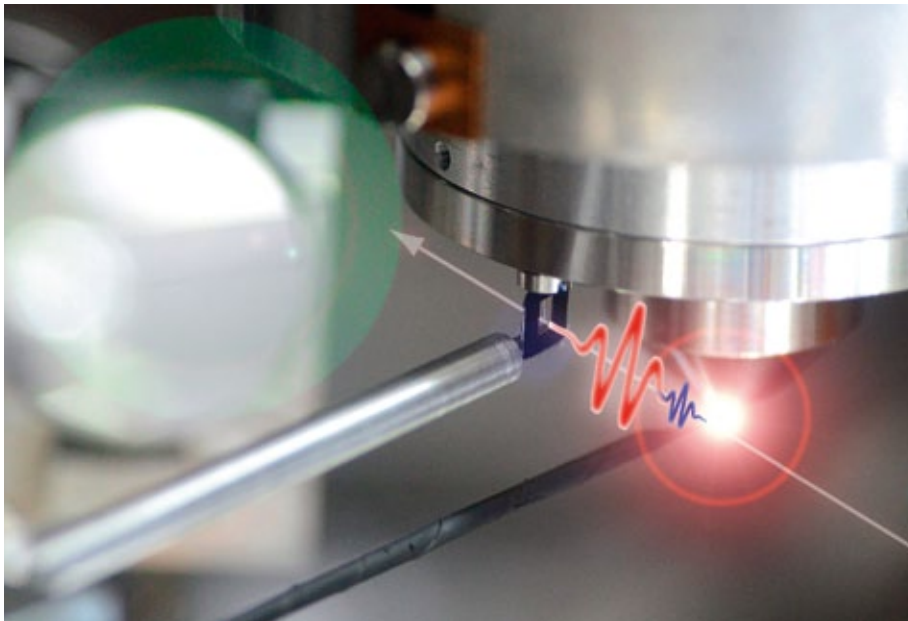
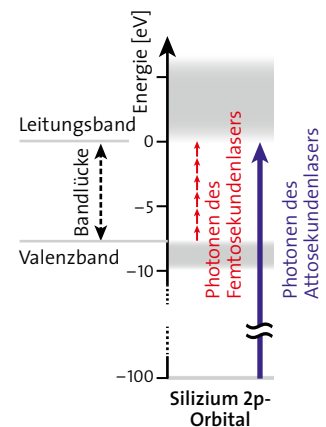


FOTO: THORSTEN NAESE, LMU & ELISABETH BOTHSCHAFER, TUM; GRAFIK RECHTS: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: MARTIN SCHULTZE UND FERENC KRAUSZ



Um vergleichbare Feldstärken konventionell zu erreichen, müsste man das elektrische Feld einer Überland-Höchstspannungsleitung zwischen zwei Elektroden aufrechterhalten, die nur einige tausendstel Millimeter voneinander entfernt sind. Bisher ist kein Material bekannt, das dieser Belastung standhält.

Im Fall von Femtosekunden-Laserimpulsen liegen die Verhältnisse aber anders. Sie erreichen mit ihrer elektrischen Feldstärke leicht Werte wie in unserem Beispiel. Hier liegen etwa beim Halbleiter Silizium über einen halben Nanometer, dem typischen Abstand zwischen zwei Siliziumatomen im Kristallgitter, ganze fünf Volt Spannung an. Ein statisches Feld dieser Stärke würde das Material sofort zerstören. Im oszillierenden elektrischen Feld unserer Laserpulse erreicht die Feldstärke aber nur wenige Male und immer nur für den Bruchteil einer Femtosekunde ihren Maximalwert. Im Fall solch kurzer Beanspruchungen ertragen Materialien wesentlich stärkere Felder.

Dies trifft besonders für optisch transparente Materialien zu, die Licht im sichtbaren und nahen infraroten Spektralbereich nicht absorbieren. In Frage kamen daher Silizium-

dioxid – bekannt als Quarz –, Diamant, Saphir oder andere nichtleitende, durchsichtige Kristalle mit einer großen Bandlücke zwischen Valenz- und Leitungsband. Dann wird die Anregung eines Elektrons aus dem Valenzband ins Leitungsband nur bei sehr hohen Feldstärken möglich, die einer Spannung von mehreren Volt zwischen zwei benachbarten Atomen im Kristallgitter entsprechen. Genau diesen Hochfeldeffekt wollten wir uns zu Nutze machen, um den ursprünglich nichtleitenden Kristall leitend zu machen.

Für unsere Experimente wählten wir einen Quarzkristall. Dabei untersuchten wir, wie sich die elektronische Struktur einer dünnen Probe im elektrischen Feld eines ultrakurzen Laserimpulses ändert. Wir bestrahlten den Kristall im Anrege-Abfrage-Schema: Zeitgleich zum Laserpuls beleuchteten wir ihn mit einem Röntgenblitz von weniger als 100 Attosekunden, etwa einem Fünfzigstel der Laserimpulsdauer. Dabei maßen wir, wie stark das Material den eingestrahlen Röntgenpuls absorbierte, immer zum jeweiligen Zeitpunkt der Einstrahlung. Dieser ließ sich insgesamt auf wenige Attosekunden genau festlegen, das ist nur noch ein Bruchteil der Röntgenpulsdauer. Das gemessene Absorptionssignal reprä-

sentiert dabei den »Schnappschuss«, aus dem wir auf die elektronische Konfiguration des Quarzkristalls zu verschiedenen Zeitpunkten während des Laserimpulses schließen konnten.

Wir begannen mit Laserpulsen niedriger elektrischer Feldstärke. Dabei verhielt sich die Probe zunächst so wie man es für transparente Medien erwartet: Sie reflektierte einen geringen Teil des einfallenden sichtbaren Lichts des Femtosekundenpulses an der Vorderfläche, der Großteil hingegen gelangte ungestört hindurch. Das Röntgenlicht des Attosekundenpulses wurde zu einem gewissen Teil absorbiert. Wir zeichneten dieses Röntgenabsorptionssignal auf und fanden darin erst einmal keine Anzeichen, dass sich durch den Laserstrahl zu irgendeinem Zeitpunkt die elektronischen Eigenschaften der Probe geändert hätten. Wäre dies der Fall gewesen, hätte das sichtbare Laserlicht die Elektronen dazu angeregt, das Leitungsband zu besetzen. Diese besetzten Zustände wären nicht mehr für vom Röntgenstrahl ausgelöste Übergänge (siehe Grafik links) verfügbar gewesen. Dieser Vorgang hätte die Absorption des Röntgenpulses abgeschwächt, was wir aber nicht beobachteten.

### Ultraschnelles Schalten – bis hin zu Lichtfrequenzen?

Danach brachten wir die Stärke des elektrischen Felds des Laserimpulses bis in unmittelbare Nähe der Schwelle für den so genannten dielektrischen Durchbruch, der die Probe zerstört hätte. Denn die Anregungsprozesse, auf deren Spur wir waren, hängen sehr empfindlich von der Intensität des Laserlichts ab. Und tatsächlich: Jetzt maßen wir im Röntgenabsorptionssignal den erhofften Effekt – während das elektrische Feld des Lasersignals sein Maximum erreichte, ließ der Kristall mehr Röntgenstrahlung passieren. Als wir das Signal analysierten und mit quantenmechanischen Rechnungen verglichen, bestätigte das unsere Interpretation. Vorübergehend waren die Energiezustände der Elektronen anders verteilt.

Die Modellrechnungen unserer Kooperationspartner von der Georgia State University in Atlanta lassen den Schluss zu, dass das starke elektrische Feld des Laserimpulses die Probe für den Bruchteil einer Femtosekunde in einen Zustand versetzt, bei dem sich Elektronen übergangsweise im Leitungsband befinden. Eine Situation, die man sonst nur bei Metallen und Halbleitern beobachtet und bei der das Material leitfähig für elektrischen Strom wird. Das konnte unsere Gruppe dann in einem weiteren Experiment auch direkt nachweisen.

Als zusätzliches bemerkenswertes Ergebnis unserer Messung konnten wir beobachten, dass die Probe nach dem Ende des Laserimpulses unmittelbar wieder in den nichtleitenden Ausgangszustand zurückkehrt. Die vom Licht ausgelöste Änderung kann also in weniger als einer Femtosekunde an- und ausgeschaltet werden. Dieser Effekt im Dielektrikum unterscheidet sich fundamental davon, wie sich angeregte Elek-

tronen in Halbleitern verhalten. Dort verbleiben die Elektronen für ein Vielfaches der Dauer des Anregungspulses im Leitungsband, bevor sie spontan wieder ins Valenzband zurückfallen. Währenddessen bleibt das Material leitend. In Halbleitern liegen diese Lebensdauern der angeregten Elektronen typischerweise im Nanosekundenbereich. Solch ein Vorgang ist als schneller Schalter also ungeeignet. Zwar ließe sich mit einem Laserpuls ebenfalls ein Halbleiterbauelement femtosekundenschnell anschalten, aber man müsste zu lange warten, bis das System von selbst in den nichtleitenden Zustand zurückkehrt.

Mit der Attosekudentechnologie können Wissenschaftler beobachten, wie sich Elektronen in Atomen, Molekülen und Festkörpern bewegen. Diese Bewegungen lassen sich mit der elektrischen Kraft präzise kontrollierter Lichtwellen, die nur noch aus wenigen Schwingungen bestehen, auch gezielt beeinflussen, gewissermaßen steuern. Der Umstand, dass solche Lichtpulse die elektrischen und optischen Eigenschaften von Nichtleitern in wenigen Femtosekunden grundlegend verändern können, ebnet vielleicht den Weg zu einer hochgradig beschleunigten Signalverarbeitung.

Elektronische Logikschaltungen, die mit Lichtfeldern gesteuert werden, könnten eine Revolution für die möglichen Rechengeschwindigkeiten bedeuten. Dieser Entwicklung würde zwar kein fundamental neues Konzept zu Grunde liegen wie etwa beim viel diskutierten Quantencomputer. Dafür könnte sie auf erprobte Protokolle und Technologien aufbauen. Der Attosekundenphysik verdanken wir die Erkenntnis, dass die Grenze elektronischer Schaltgeschwindigkeiten und Messtechnik im Bereich der Lichtfrequenzen liegt – zigtausendfach schneller als die beste heutige Mikroprozessortechnologie. ~

#### DIE AUTOREN



**Martin Schultze** (links) promovierte 2008 im Team von Ferenc Krausz am Max-Planck-Institut für Quantenoptik (MPQ) und verwendete erstmals die Attosekundenmesstechnik zur Echtzeitbeobachtung von Elektronenbewegungen innerhalb

eines Festkörpers. **Ferenc Krausz** ist Direktor am MPQ in Garching und Lehrstuhlinhaber an der Ludwig-Maximilians-Universität in München. Seine Gruppe demonstrierte 2001 zum ersten Mal Attosekundenpulse – die Geburtsstunde der experimentellen Attosekundenphysik.

#### QUELLEN

**Krausz, F., Stockman, M.:** Attosecond Metrology: From Electron Capture to Future Signal Processing. In: Nature Photonics 8, S. 205–213, 2014

**Schiffrin, A. et al.:** Optical-Field-Induced Current in Dielectrics. In: Nature 493, S. 70–74, 2013

**Schultze, M. et al.:** Controlling Dielectrics with the Electric Field of Light. In: Nature 493, S. 75–78, 2013

Dieser Artikel im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1298017](http://www.spektrum.de/artikel/1298017)

## JAHRES- ODER GESCHENKABO

- + **ERSPARNIS:**  
12 x im Jahr **Spektrum der Wissenschaft** für nur € 89,- (ermäßigt auf Nachweis € 69,90), fast 10 % günstiger.
- + **WUNSCHGESCHENK:**  
Wählen Sie Ihren persönlichen Favoriten. Wenn Sie ein Abo verschenken möchten, erhalten dennoch Sie das Präsent.
- + **PÜNKTLICHE LIEFERUNG:**  
Sie erhalten die Hefte noch vor dem Erscheinen im Handel.
- + **KEINE MINDESTLAUFZEIT:**  
Sie können das Abonnement jederzeit kündigen



## MINIABO

- + **ERSPARNIS:**  
3 aktuelle Ausgaben von **Spektrum der Wissenschaft** für nur € 16,-, das entspricht 35 % Rabatt.
- + **WUNSCH-GESCHENK:**  
Wählen Sie Ihren persönlichen Favoriten.
- + **PORTOFREI:**  
Die Lieferung erfolgt frei Haus.





# SICHERN SIE SICH ALLE VORTEILE IM ABO



SCHREIBSET VON LAMY  
Druckbleistift und Kugelschreiber  
mit Etui



## »MEINE KURZE GESCHICHTE« VON STEPHEN HAWKING

Zum ersten Mal lässt der Physiker sein ganzes privates und wissenschaftliches Leben Revue passieren – in einem Buch voller Weisheit und Humor.

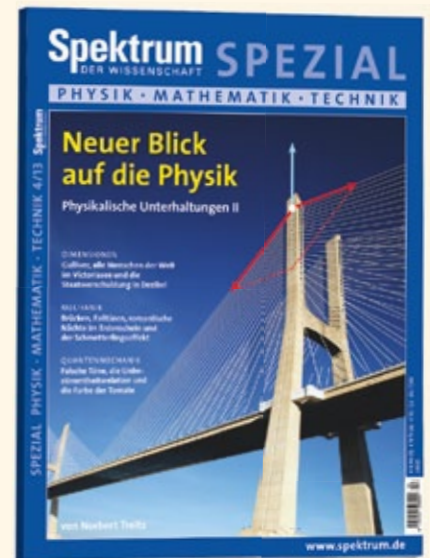
WÄHLEN  
SIE IHR  
GESCHENK!



## T-SHIRT »WISSENSHUNGRIG«

Für alle, die Lust auf mehr Wissen haben: Das Spektrum-T-Shirt »wissenshungrig« aus 100 % Baumwolle; Größe L.

SPEKTRUM-SPEZIAL –  
PHYSIK · MATHEMATIK · TECHNIK  
»Neuer Blick auf die Physik« zeigt vertraute Schulphysik aus völlig ungewohnten Blickwinkeln.



So einfach erreichen Sie uns:

Telefon: 06221 9126-743  
[www.spektrum.de/abo](http://www.spektrum.de/abo)

Fax: 06221 9126-751 | E-Mail: [service@spektrum.com](mailto:service@spektrum.com)

Hier QR-Code  
per Smartphone  
scannen und  
Angebot sichern!





SÜDOSTASIEN

# Angkor – Wiederentdeckung einer antiken Großstadt

Angkor Wat, die Tempelstadt im Herzen des kambodschanischen Urwalds, ist heute ein beliebtes Touristenziel. Doch einst war sie nur ein Teil von Angkor, der riesigen Hauptstadt des Khmer-Reichs. Aktuelle Ausgrabungsprojekte erforschen den weitläufigen Komplex aus Palästen, Heiligtümern, Wohngebieten, Straßen und Bewässerungsanlagen.

Von Christophe Pottier, Pierre Bâty, Jean-Baptiste Chevance und Julia Estève



Wie bei den meisten Tempeln von Angkor umgibt ein breiter Wassergraben auch das Heiligtum Angkor Wat. Einst war er in das weitläufige Netz aus Kanälen und Wasserspeichern der Khmer-Metropole integriert.

**A**ngkor Wat, die im Dschungel Kambodschas liegende, fast 200 Quadratkilometer große Ruinenstätte, ist berühmt für seine monumentalen Steinbauten mit ihren Statuen und verzierten Friesen. Doch sie ist nur eine von mehreren großen Tempelanlagen in dem 1000 Quadratkilometer großen Angkor-Gebiet. Diesen Zeugnissen von Herrschaft und Religion galt bis vor wenigen Jahren das Hauptinteresse der Forscher. Insbesondere anhand der Inschriften rekonstruierten sie die Geschichte des antiken Khmer-Reichs (9.–15. Jahrhundert n. Chr.). Sie begann demnach im 8. Jahrhundert mit König Jayavarman II. Dieser sei aus dem Land Java zurückgekehrt (ob es sich dabei um die heutige Insel diesen Namens handelt, ist

umstritten), um die verschiedenen Fürstentümer zu einen. Eines davon kannten die Chinesen als Königreich von Chenla; es erstreckte sich von Kambodscha nach Nordosten bis ins heutige Thailand und im Süden bis nach Vietnam. Im Jahr 802 ließ er sich dann in Mahendraparvata auf dem heutigen Plateau von Phnom Kulen zum »universellen Souverän« aus weltlicher und »Gottkönig« aus religiöser Sicht ausrufen. Seinen Lebensabend verbrachte der erfolgreiche Dynastiegründer in Hariharalaya, das anhand von Inschriften als Ruinenstätte Roluos etwa 15 Kilometer südöstlich von Angkor identifiziert wurde.

Jayavarman II. begründete das Königreich von Angkor aber nicht nur in politischer Hinsicht. Er rief auch Kulturpraktiken ins Leben, die bis zu den letzten Dynastien Gültigkeit hatten. Zudem begann mit ihm eine Zeit, in der sich mehrere Residenzen im Gebiet von Angkor ablösten, bis dieses im 15. Jahrhundert aus vermutlich klimatischen, politischen oder wirtschaftlichen Gründen ganz aufgegeben wurde.

Jayavarman II. und seine Nachfolger ließen monumentale Tempel errichten, einige davon pyramidenförmig und im Zentrum der jeweiligen Kapitale. Sie verbanden sie mit großen Wasserreservoirs (»barays«), kleineren Bassins sowie Straßen- und Kanalnetzen. Manche dieser Könige sind bis heute berühmt, wie Suryavarman II. (1113 – etwa 1150), Erbauer des berühmtesten Tempelkomplexes Angkor Wat, und Jayavarman VII. (1181 – etwa 1215), der buddhistische Herrscher, der die letzte Hauptstadt, Angkor Thom, gründete. Deren Grundriss ist ein exaktes Quadrat von drei Kilometer

## AUF EINEN BLICK

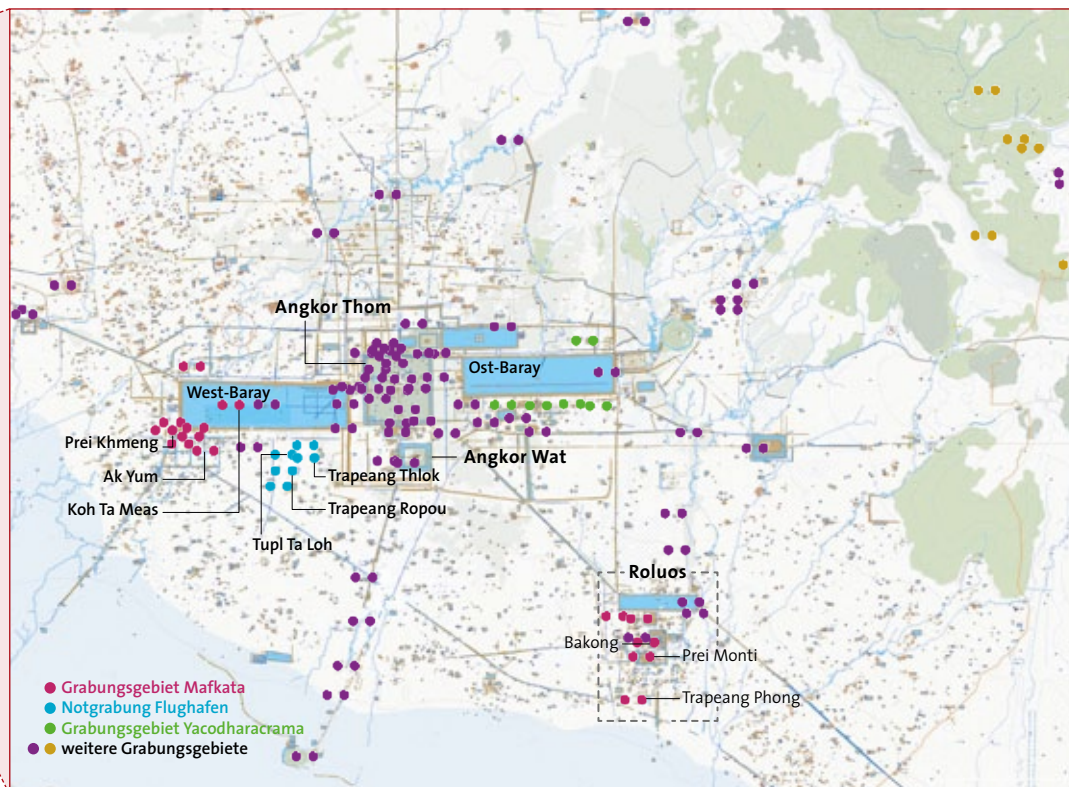
### VERGANGENE PRACHT

**1** Vom 9. bis zum 15. Jahrhundert n. Chr. war Angkor die **Hauptstadt des kambodschanischen Königreichs der Khmer**. Zu ihrer Blütezeit erstreckte sich die Metropole über fast 1000 Quadratkilometer.

**2** Im Gegensatz zu den monumentalen Tempelanlagen wie Angkor Wat bestanden **Wohnhäuser** und auch **Paläste** der Khmer **nicht aus Stein**, sondern aus vergänglichen Materialien. Seit den 1990er Jahren versuchen Wissenschaftler, Spuren auch solcher Gebäude zu entdecken.

**3** Inzwischen gilt als sicher, dass Angkor dicht besiedelt war und über ein **komplexes Bewässerungssystem** verfügte. Das Reich der Khmer unterhielt zudem Handelsbeziehungen bis nach China und in den Vorderen Orient.

Die archäologische Stätte Angkor in Kambodscha umfasst weit mehr als die berühmten Tempelanlagen Angkor Wat und Angkor Thom. Die Ausdehnung der einstigen Metropole zeigen Dämme und Siedlungshügel (braun), Wasserbecken und Kanäle (blau) in der topografischen Geländekarte.



LANDKARTE: URUTSEG / CCO (CREATIVECOMMONS.ORG) / PUBLICDOMAINIZE.ROD/ANGKOR/KARTE: DAMIAN EDWARDS & CHRISTOPHE FORTIER. FELD UND GREAT ANKOR PROJECT (GAP)



Rund um die zahlreichen kleinen Tempel lagen Gruppen von Häusern, daran anschließend Reisfelder, Speicherbecken und Kanäle. Exemplarisch rekonstruierten Archäologen diese Situation in Prasat He Phka, einem Siedlungshügel im Süden Angkors (nicht in Karte).

Kantenlänge, in dessen Mitte der Tempel von Bayon mit den berühmten »Gesichtertürmen« steht.

Nach dem Ende der vietnamesischen Besetzung Kambodschas vor etwa 20 Jahren wurde Angkor nicht nur wieder für Besucher zugänglich. Inzwischen beschäftigt sich eine neue Generation von Archäologen mit anderen Aspekten der vergangenen Hochkultur. Nicht mehr nur ihre Religion und die Königsdynastien stehen im Fokus, sondern auch Fragen der Siedlungsgeschichte. Seit der Aufnahme Angkors auf die UNESCO-Weltkulturerbeliste 1992 sind in Kooperation mit dem Staat Kambodscha und der Autorité pour l'aménagement et la sauvegarde de la région d'Angkor (APSARA) mehr als 15 archäologische Projekte an den Start gegangen, von denen einige die komplexe Organisation und die Geschichte des Verkehrssystems der Khmer-Kultur erfassen sollen.

### Die ersten Siedler kamen vor annähernd 4000 Jahren

Neben klassischen Methoden wie dem Sammeln und Auswerten von Daten und Artefakten vor Ort setzen Archäologen auch auf neueste Techniken, darunter die Vermessung der Geländetopografie mit einem Infrarot-Laser (LIDAR) von einem Helikopter aus. Auf diese Weise zeigte sich beispielsweise, dass das Gebiet von Angkor weit früher besiedelt war als bisher gedacht. Das Team der École française d'Extrême-Orient stieß nämlich schon 2000 und 2005 im Grabungsgebiet Mafkata (siehe Karte links) auf zwei prähistorische Nekropolen. Die älteste, Koh Ta Meas, liegt genau in der Mitte eines »Baray« und stammt aus der Bronzezeit. Sie belegt, dass Menschen hier schon seit fast 4000 Jahren lebten. Auf den Ruinen des zweiten, Prei Khmeng, wurde im 6. Jahrhundert der erste brahmanische Tempel des Khmer-Reichs errichtet. Darunter konnten die Archäologen anhand der Abfolge von Siedlungsschichten eine kontinuierliche Nutzung seit dem Beginn unserer Zeitrechnung nachweisen.

Der Baray selbst, der im Westen Angkors lag, war einst 16 Quadratkilometer groß. Er wurde im 11. Jahrhundert ausgehoben – mitten in eine Stadt hinein, die sogar schon vor Jayavarman II. existierte. Inzwischen wurden auch deren Siedlungsreste und Ruinen untersucht. So erhob sich in ihrem Zentrum der Pyramidentempel Ak Yum, den der französische Architekt Georges Trouvé schon in den 1930er Jahren entdeckte und der heute fast vollständig unter einem Damm begraben ist. Er war das älteste Beispiel dieser für die Regierungssitze der Angkor-Kultur charakteristischen »Bergtempel«. Jüngste Nachgrabungen lieferten immerhin Material für die Radiokohlenstoffdatierung. Demnach entstand Ak Yum Ende des 6. Jahrhunderts – er ist damit ein Jahrhundert älter als alle Inschriften und stammt aus der Zeit vor der Reichsgründung. Andere Stätten in seiner Umgebung gehören offenbar zur gleichen Epoche, was eine komplexe Organisation Mafkatas nahelegt. Da sich Einrichtungen des Wasserbaus nachweisen lassen, handelt sich um eine der ersten Khmer-Residenzen. Ihren Namen kennen wir nicht, denn diese frühe Phase der Khmer-Kultur ist historisch wenig belegt. Auch aus den zwei Jahrhunderten um die legendäre Gründung Angkors (802) sind zwar die Namen von Königen und Städten überliefert, doch lassen sie sich selten den Ruinenstätten zuordnen.

Eine Ausnahme machen Jayavarman's Residenzen Hariharalaya und Mahendraparvata, die als Roluos und Phnom Kulen identifiziert wurden. Allerdings wurde dort bislang kein Gebäude entdeckt, dessen Inschrift es diesem Herrscher zuordnen würde. Obwohl der Dynastiegründer in Hariharalaya, heute Roluos, vor seiner Krönung gelebt haben und dort auch gestorben sein soll, werden die wichtigsten Monumente anhand der Inschriften bislang einem Nachfolger zugerechnet: König Indravarman I. will die Tempel im Jahr 877 erbaut haben. Auch hier machen radiometrische Datierungen und sowie der Vergleich mit den in Mafkata erstellten Keramikchronologien deutlich, dass die Gründung dieser

## »Aschramas« – Stätten der Einkehr, Zeugnis der Königsmacht

**Laut Textzeugnissen wurden Ende des 9. Jahrhunderts** etwa 100 »aschramas« oder Einsiedeleien von König Yasovarman I. gegründet. Sie waren die erste Institution, die im ganzen Reich eingeführt wurde und sind damit ein Zeichen der königlichen Zentralmacht. In der Provinz lagen sie bei den wichtigsten Heiligtümern und erlaubten Reisenden und Pilgern, unter königlichem Schutz dort ihr Lager aufzuschlagen.

In Angkor selbst gab es vier Aschramas, von denen eines dem Wischnu, zwei dem Schiwa und eines Buddha geweiht waren. Ihre Aufgabe war auch die Betreuung des östlichen Baray, einer gewaltigen Bewässerungseinrichtung, die eine wesentliche Bedeutung für das wirtschaftliche und religiöse Leben der Stadt hatte.

Bei bisher in drei dieser Klöster durchgeführten Grabungen und geophysikalischen Prospektionen hat man ihr Erscheinungsbild und ihre Funktionen erforscht. Trotz ihrer unterschiedlichen konfessionellen Zugehörigkeit hatten sie alle denselben Aufbau: Eine rechteckige Umfassungsmauer in Ost-

West-Ausrichtung (375 mal 150 Meter) fasste eine dreigeteilten Innenraum ein.

**Im Osten gab es eine Anhöhe für rituelle Aktivitäten.** Darauf standen ein 25 Meter langes Kultgebäude aus Laterit und ein kleiner Schrein mit einer Stele, auf der die Klosterordnung erläutert wurde. Der Rest des Aschramas war für das Wohnhaus und den für die Versorgung der Mönche unverzichtbaren Garten reserviert. Dort entdecktes Werkzeug und Eisenschlacken zeigen, dass diese Orte auch Stätten des Handwerks waren. Laut Datierung der Keramikfunde blieben sie mindestens bis zum Ende des 13. Jahrhunderts in Betrieb.

Dieses Ensemble wurde durch einen Damm in der nordöstlichen Ecke vervollständigt, der das Aschrama mit dem Baray verband. Es ist wahrscheinlich, dass diese Wege für Zeremonien an dessen Ufern vorgesehen waren, die in den Inschriften angeordnet waren.

*Dominique Soutif, Wissenschaftler  
an der École française d'Extrême-Orient*

Metropole mehr als ein Jahrhundert früher angesetzt werden muss.

Die zentrale Verwaltung des Khmer-Reichs hatte ihren Sitz stets in der aktuellen Hauptstadt mit ihrem Königspalast. Bei Hariharalaya wusste man lange nicht, wo dieser lag. Das Gelände Prei Monti einige hundert Meter südlich des so genannten Bakong-Tempels (siehe Karte S. 60) brachte die Archäologen schließlich auf eine Spur. In das Gebiet, um das ein Graben von 800 mal 530 Metern läuft, war ohne erkennbaren archäologischen Zusammenhang ein unscheinbarer Tempel gebaut. Mehrere Grabungskampagnen konnten nun bestätigen, dass er zum gesuchten Palast gehörte.

### Das Puzzle

#### des Königspalastes von Hariharalaya

Sondagen lieferten ein Sammelsurium von Fundamenten, Resten gemauerter Abflussrohre und Stellen, an denen offenbar Gebäude mit Dächern aus gebrannten Ziegeln gestanden hatten, allesamt an den Himmelsrichtungen orientiert. Aus den verschiedenen Befunden lässt sich eine Bebauung mit einem System von Höfen und Galerien aus vergänglichem Material – wahrscheinlich Holz – erschließen. Die Fundamente waren von ebenso hoher Qualität wie die der wichtigsten Tempel. Auch die hölzernen Teile zweier großer Gebäude, die sich in Gräben erhalten hatten, stammten wohl kaum von Privathäusern. Obendrein kamen kostbare Importwaren zum Vorschein, insbesondere Keramik aus dem China der Tang-Zeit (618–907) sowie türkisfarbene Krüge aus dem Vorderen Orient.

Das alles spricht dafür, Prei Monti mit dem Königspalast von Hariharalaya gleichzusetzen. Zudem zeigt sich, dass Angkor im 9. Jahrhundert in das Fernhandelsnetz Südostasiens jener Zeit eingebunden war – bislang galt es als abgelegene Landwirtschaftsmetropole.

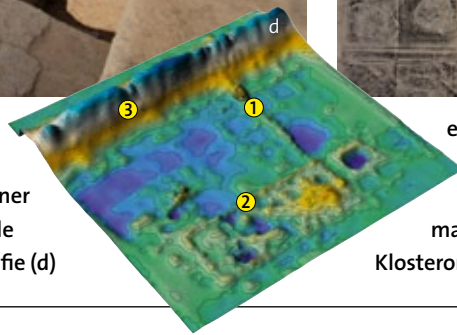
In der Umgebung der Pyramidentempel folgten sämtliche Baustrukturen geometrischen Formen, mochten sie auch mehrere Dutzend Hektar umfassen. Man hatte sie offenbar vor Baubeginn als Ganzes konzipiert. Dies ist auch beim Pyramidentempel von Bakong in Roluos der Fall: Er ist von zahlreichen Mauern und Gräben umgeben, die mehr als 100 Hektar Fläche einschließen; zudem besitzt er etwa 20 Nebentempel, die regelmäßig um den Tempel herum verteilt sind.

Die Pyramide bildete also das Zentrum eines monumentalen, am Reißbrett geplanten Komplexes, der den archäologischen Daten nach in einer Bauphase entstand. Allein die Menge des Verfüllungsmaterials aus den Gräben lässt ahnen, welcher außergewöhnliche Aufwand dafür getrieben wurde. Jüngsten Datierungen nach geschah dies Ende des 8. Jahrhunderts, also ein Jahrhundert vor der Regierungszeit Indravarman I., den man auf Grund einer Inschrift bisher als Gründer angesehen hatte. Er war wohl nur der Auftraggeber diverser Renovierungsarbeiten. Um den Tempel herum ist die Bebauung mit Wohnhäusern nicht besonders dicht. Der Bakong-Komplex bildete daher wohl eine religiöse Einheit, die von einigen Priestern und Beamten bewohnt wurde, aber sicher keine dicht besiedelte Großstadt, wie es die weitläufigen Umfassungsmauern annehmen lassen könnten. Die Ge-



A--D-EFEO

Die »aschramas« umfassen ein längliches Gebäude, wie das von Komnap Süd (a). Es war 2012 bei einer Analyse der mit der LIDAR-Methode aufgenommenen Geländetopografie (d)



entdeckt worden. Sie zeigt außerdem einen Damm (1), der ein Gebäude (2) mit einem Wasserbecken (3) verband. Ein Unterstand des Aschrama von Ong Mong barg eine Stele (b, c), auf der die Klosterordnung aufgeführt war.

Wie heutzutage lebten die Menschen auch im antiken Khmer-Reich mit den Wassermassen, welche die Monsunregen alljährlich über das Land ergossen. Wie in dieser Illustration gezeigt, standen die Häuser daher auf Stelzen, waren aus Holz gebaut und mit pflanzlichen Materialien gedeckt. Landwege, aber auch ein Netz von Kanälen verbanden die einzelnen Dörfer.



THE VISUALISING ANCIOR PROJECT, MONASH UNIVERSITY

## Mahendraparvata, die verlorene Stadt vom Phnom Kulen



L. BERNHART, ARCHAEOLOGY AND DEVELOPMENT FOUNDATION (ADF)

Ein Suchschnitt bringt einen Kanal und Gehsteige zu Tage.

Das etwa 400 Meter über dem Meeresspiegel gelegene Hochplateau von Phnom Kulen steht mit seiner dichten Bewaldung und seinen Steilhängen aus Sandstein in starkem Kontrast zur Tiefebene des etwa 40 Kilometer südwestlich gelegenen Angkor. In diesen Bergen entspringen die Flüsse der Gegend. Spuren der Vergangenheit sind zahlreich zu finden, etwa Tempel, Bewässerungsanlagen und Höhlen, die auch heute noch religiöse Bedeutung haben.

Gemäß den Schriftquellen hatte König Jayavarman II. am Ende des 8. Jahrhunderts seine Residenz und Hauptstadt Mahendraparvata auf diesem Plateau gegründet. Seit 2008 unternimmt die Stiftung Archaeology and Development daher eine Kartierung des Massivs, archäologische Ausgrabungen und LIDAR-Untersuchungen. Zu Tage kamen Indizien für eine Residenzstadt vom Beginn der Angkor-Periode, also dem Übergang vom 8. zum 9. Jahrhundert. Nach den Himmelsrichtungen ausgerichtete Straßen erstreckten sich über mehrere Kilometer. Sie verbanden heilige Stätten miteinander, von denen einige schon bekannt waren, andere nun erst entdeckt wurden. Ein komplexes Bewässerungsnetz, bestehend aus Wehren, Dämmen, Kanälen und Bassins vervollständigt dieses Muster.

**Wahrscheinlich im 9. Jahrhundert** wurde der Phnom Kulen als Königsresidenz aufgegeben, doch in den Steilwänden und Felsen des Massivs entstanden später Einsiedeleien. In der Post-Angkor-Periode strömten Pilger dorthin, um Buddhasstatuen zu weihen. Noch heute gilt der Phnom Kulen als einer der heiligsten Berge Kambodschas.

bäude und Besiedlungsspuren zeigen, dass der Zentraltempel von Bakong noch mindestens bis ins 12. Jahrhundert in Betrieb war, obwohl der Regierungssitz Ende des 9. Jahrhunderts zum heutigen Zentrum Angkor Wat verlegt wurde.

21 im ganzen Reich entdeckte Inschriften bezeugen, dass zum geistlichen Leben im Khmer-Reich auch Klöster («aschramas», siehe Kasten S. 62/63) gehörten, die Yasovarman I. ab Ende des 9. Jahrhunderts gegründet hatte. Julia Estève und Dominique Soutif von der École française d'Extrême-Orient (EFEO) untersuchen diese Orte der Einkehr, die auch als Pilgerherbergen fungierten und der Wissensvermittlung dienten. Sie bildeten die erste staatliche Institution, die flächendeckend im gesamten Khmer-Reich eingeführt wurde und bezeugen damit eine Zentralisierung königlicher Macht in jener Zeit. Durch einen Abgleich mit den Angaben in den Inschriften wollen die Archäologen die Ausdehnung des Khmer-Reichs in dieser Phase deutlich machen.

In den 1990er Jahren erforschte ein EFEO-Team unter der Leitung von Jacques Gaucher die Umwallung der Ruinenstätte Angkor Thom und entdeckte dort Indizien auf eine dichte Besiedlung wie zahlreiche kleinere Erhebungen, Bas-

sins und Straßen. Inzwischen erstellt einer von uns (Pottier) in Zusammenarbeit mit der University of Sydney eine Karte des Gesamtgebiets. Sie zeigt eine Megastadt von 1000 Quadratkilometer Fläche, in deren Zentrum sich die großen Kultbauten erhoben. Zwar bestanden selbst die Paläste aus Holz, Bambus und Stroh und sind daher ebenso wie alle Wohngebäude längst zerfallen. Die topografische Analyse des Geländes mit Luft- und Satellitenbildern sowie den LIDAR-Messungen machten aber trotz des Urwalds beziehungsweise der heutigen Nutzung weitläufige, geometrisch angelegte Strukturen sichtbar.

Das Leben der einfacheren Bevölkerung spielte sich in kleinen, recht eng verbundenen Nachbarschaften auf Hügeln ab, auf denen auch kleine Tempel standen und die von Reisfeldern und Wasserbecken umgeben waren. Eingestreut zwischen die verschiedenen Zentren mit den großen Monumenten waren diese Dorfgemeinschaften in ein umfangreiches Straßen- und Kanalnetz eingebunden.

Um die erwähnten Hauptelemente der Stadt Roluos – die Bakong-Pyramide und der Palast von Prei Monti – lagen ebenfalls kleine Tempel mit eigenen Wasserbecken; Erdauf-



schüttungen deuten auf Gruppen von Wohnhäusern hin. Die Forscher haben eine dieser Stätten, den Tempel von Trapeang Phong, 2004 und 2005 exemplarisch untersucht. Sie konnten eine Reihe von Wohnhäusern nachweisen und sie verschiedenen Entwicklungsphasen zuordnen. Offenbar waren besonders im 11. und 12. Jahrhundert immer neue Hügel angelegt und die schon bestehenden erhöht worden – ein Ausdruck der zunehmend dichteren Besiedlung.

Auch die LIDAR-Messung der Hochfläche des Kulen-Gebirges hat ein außerhalb Angkors gelegenes Stadtsystem von enormen Ausmaßen aufgedeckt. Auf diesem Plateau im Nordosten der Region erforscht Jean-Baptiste Chevance von der gemeinnützigen Stiftung Archaeology and Development die Stadt Mahendraparvata, die anscheinend eine bedeutende Residenz in der Frühzeit des Reichs gewesen ist.

### Rekonstruktion der alten Dorfgemeinschaften

Andere Dörfer wurden im Zuge der Rettungsgrabungen an der Baustelle des Flughafens Siem Reap durch Pierre Bâty vom Institut national de recherches archéologiques préventives (INRAP) untersucht. Dort, im Südwesten des berühmten Tempelgeländes Angkor Wat waren vom 9. bis 14. Jahrhundert etliche Wohnhügel (»tuol«) entstanden, von denen 15 inzwischen erforscht wurden. Auch dort lagen die Wohnstätten um Heiligtümer und fügten sich in ein altes Reisanbaugebiet ein. Interessant ist, dass dieses offenbar aus zusammenhängenden Parzellen bestand, welche die Forscher als Grundbesitzeinheiten interpretieren.

Drei Wohngebiete von insgesamt fast vier Hektar sind vollständig ausgegraben worden: Ein Hügel, der zum Tempel von Trapeang Thlok gehört, einer in Trapeang Ropou und die Häusergruppe von Tuol Ta. Sie lieferten Indizien, dass man im Khmer-Reich offenbar in vieler Hinsicht baute wie heute auch. Das Haus stand auf einem Hügel und damit vor allem in der Monsunzeit über dem Grundwasserspiegel; es war aus Holz gebaut, mit pflanzlichem Material oder Ziegeln gedeckt und auf Pfosten gestellt. Alle Wohnanlagen waren mit Tempeln verbunden. Dementsprechend bildeten die zwölf Wohnhügel von Trapeang Ropou ein Dorf, dessen Zentrum das gleichnamige Heiligtum darstellte.

Die Hügel selbst waren viereckige, mehr oder weniger stark nach den Himmelsrichtungen orientierte Plattformen, die zur Zeit um den Kultbau herum errichtet wurden. Sie belegten in den verschiedenen Nachbarschaften Flächen von 1200 bis 2000 Quadratmetern. Gräben zwischen den Erhebungen leiteten in der Monsunzeit das abfließende Regenwasser fort, mitunter zu den Vorratsbecken.

Die Nutzungsdauer variierte. So war das Dorf von Trapeang Thlok nur zwischen dem Ende des 10. und der ersten Hälfte des 11. Jahrhunderts bewohnt. Im Wohngebiet von Trapeang Ropou lebten vom 10. bis zum 14. Jahrhundert und in Tuol Ta Lo zwischen dem 12. und dem 14. Jahrhundert Menschen. In den meisten Fällen wurden die Tuols auf vorher unbewohntem Land errichtet.

Die genaue Bebauung lässt sich anhand von Pfostenlöchern nachzeichnen. Meist gab es ein Hauptgebäude auf dem Scheitel des Hügels und manchmal kleinere Gebäude an seinem Rand. Die Fläche der ausgemessenen Gebäude variiert zwischen 40 und mehr als 50 Quadratmetern. Wie man es noch heute bei traditionell lebenden Bauern sehen kann, grenzten Holzzäune um den Hügel eine Art Obstgarten ab. Wie der Geograf Jean Delvert 1961 ermittelte, wuchsen darin Bananenstauden, Mangobäume, Apfelbäume, Papayabäume, Brotfrucht bäume, Guavenbäume, Kokosnussbäume, Betelnussbäume, Zitronenbäume und Pampelmusenbäume. In einigen der vielen Gruben, die auf der Oberfläche der Hügel entdeckt wurden, könnten Bäume gestanden haben. Bei manchen Häusern deutet eine Verfärbung des Bodens auf eine erhöhte Phosphatkonzentration hin, was wahrscheinlich mit der Viehhaltung unter dem Haus zusammenhängt.

Der Garten würde der gemeinsamen Lebensmittelproduktion der Familie dienen und einem offenen Gemeinschaftsraum entsprechen. Dort produzierte und lagerte man Lebensmittel, wahrscheinlich in Speicherräumen für Paddyreis (noch von Spelzen umschlossener Rohreis) und in Tonkrügen. Mehrere Sorten landwirtschaftlicher oder häuslicher Aktivitäten lassen sich dort ebenfalls nachweisen: Schneidbretter für Fleisch verraten Viehzucht und Schlachtung, Mahlsteine den Anbau und die Verarbeitung von Getreide, Gewichte für Fangnetze dienten der Fischerei, kleinere Gewichte strafften die Fäden beim Weben, und Spinnwirteln stabilisierten wohl hölzerne Spindeln. Das Hügelhaus mit seinem Gemüsegarten komplettierte das auf Reisanbau basierende Wirtschaftssystem Angkors.

Das gefundene Geschirr gibt Auskunft über die Ausstattung des Hauses, aber auch über den wirtschaftlichen Austausch mit benachbarten Gegenden (wie Keramik aus dem Kulen-Gebirge) oder fernen Produktionszentren wie etwa China oder der Region Buriram auf dem Gebiet des heutigen Thailand. Dagegen ließ sich noch keine der feuernutzenden Handwerkskünste wie Metallverarbeitung oder Keramikherstellung nachweisen. ~

#### DIE AUTOREN



**Christophe Pottier** (ganz links) ist Architekt und Archäologe an der École française d'Extrême-Orient (EFEO). Er leitet die Mission von Mafkata. **Pierre Bâty** (links) ist Archäologe am Institut national de recherches archéologiques préventives (INRAP). Er leitet die Notgrabungen am Flughafengelände von Siem Reap. **Jean-Baptiste Chevance** leitet das Phnom-Kulen-Projekt der Stiftung Archaeology and Development. **Julia Estève** ist – mit Dominique Soutif – Gründerin des EFEO-Projekts »Die Einsiedeleien des Yacovarman I.«.

Dieser Artikel im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1257684](http://www.spektrum.de/artikel/1257684)

GEOMETRIE

# Die tanzenden Polyeder des Ueli Wittorf

Ein Architekt und Geometrikünstler aus Zürich hat eine neue Art beweglicher Körper konstruiert.

VON CHRISTOPH PÖPPE

Der einflussreiche amerikanische Architekt Richard Buckminster Fuller (1895–1983) hat – neben vielen anderen Dingen – eine Möglichkeit gefunden, einem der altbekannten platonischen (überaus regelmäßigen) Körper eine neue und überraschende Beweglichkeit zu geben. Er schlitze das Oktaeder, den platonischen Körper aus acht Dreiecken, entlang aller Kanten auf. Nur in den Eckpunkten bleiben je zwei der vier Dreiecke, die sich dort treffen, miteinander verbunden. Dabei ist das System der Verbindungen so gewählt, dass der Körper nicht etwa in Teile zerfällt, sondern alle acht Dreiecke miteinander verbunden bleiben.

Derart von ihrer festen Verbindung befreit, sind die acht Teilflächen zu einem merkwürdigen Tanz fähig (Bilder a bis h, unten). Hält man eines der Dreiecke auf dem Boden fest und bewegt das gegenüberliegende auf und ab, so vollführen die sechs anderen einen derart eleganten Hüftschwung, dass Fuller sein Werk »Jitterbug« nannte.

Das spektakulärste Exemplar eines solchen tanzenden Oktaeders ist zweifellos die stählerne Installation, die 1991 die Forschungsausstellung »Heureka« in Zürich zierte, während der Ausstellung zusammenbrach und neu aufgebaut werden musste. Auf dem Bodendreieck mit mehr als sieben Meter Kantenlänge hatte sogar ein Orchester Platz (Spektrum der Wissenschaft 9/1991, S. 48).

In einer Ausstellung von Fullers Werken entdeckte ein Architektenkollege namens Ueli Wittorf 1999 das bewegliche Oktaeder – und nahm es zum Ausgangspunkt für ein umfangreiches Projekt. Eigentlich war er damals gar kein Architekt mehr. Auf einem windungsreichen Berufsweg – Chemielaborant, Metallarbeiter, Architekt und Lehrer an einer Waldorfschule – fand er schließlich zu seiner Berufung als freischaffender »Geometriker«. In seinem Atelier in Zürich ist eine beeindruckende Fülle geometrischer Objekte entstanden, von denen die Verallgemeinerungen von

Fullers Jitterbug nur einen, allerdings bedeutenden Teil bilden.

Während das Oktaeder sich entfaltet, wandern seine acht Dreiecke nach auswärts, als würde jedes von ihnen von einer Stange geführt, die auf dem Dreieck senkrecht stehend durch dessen Mittelpunkt und außerdem durch den Mittelpunkt des ganzen Gebildes verläuft. Zusätzlich drehen sich alle Dreiecke um ihre jeweilige imaginäre Stange, und zwar gegenläufig: Dreht sich ein Dreieck nach rechts, so rotieren die drei, mit denen es über seine Ecken verbunden ist, nach links und umgekehrt. Ueli Wittorf hat mehrere Stadien dieser Bewegung in einer Skulptur zusammengefasst (Bild rechts oben, linkes Teilbild).

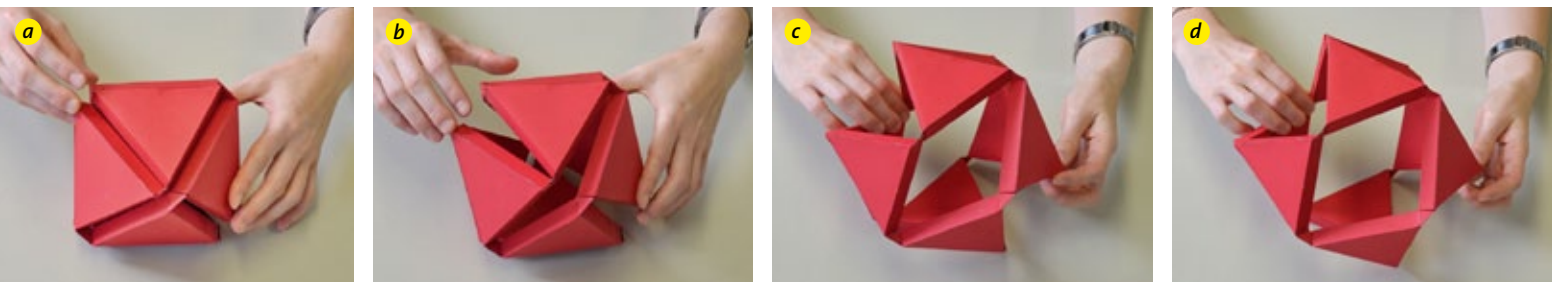
## Jitterbug mit platonischen Körpern

Kann man die anderen platonischen Körper ebenso tanzen lassen wie das Oktaeder? Die erste Antwort lautet nein. Denn bei ihnen trifft sich in jeder Ecke eine ungerade Anzahl an Flächen: drei Dreiecke beim Tetraeder, drei Quadrate beim Würfel, drei Fünfecke beim Dodekaeder und fünf Dreiecke beim Ikosaeder. Knüpft man je zwei dieser Flächen in einer Ecke zusammen, bleibt stets eine ungebundene übrig.

Aber dem Problem ist abzuhelfen, indem man jede Fläche verdoppelt. Im Ruhezustand liegen dann an Stelle ei-

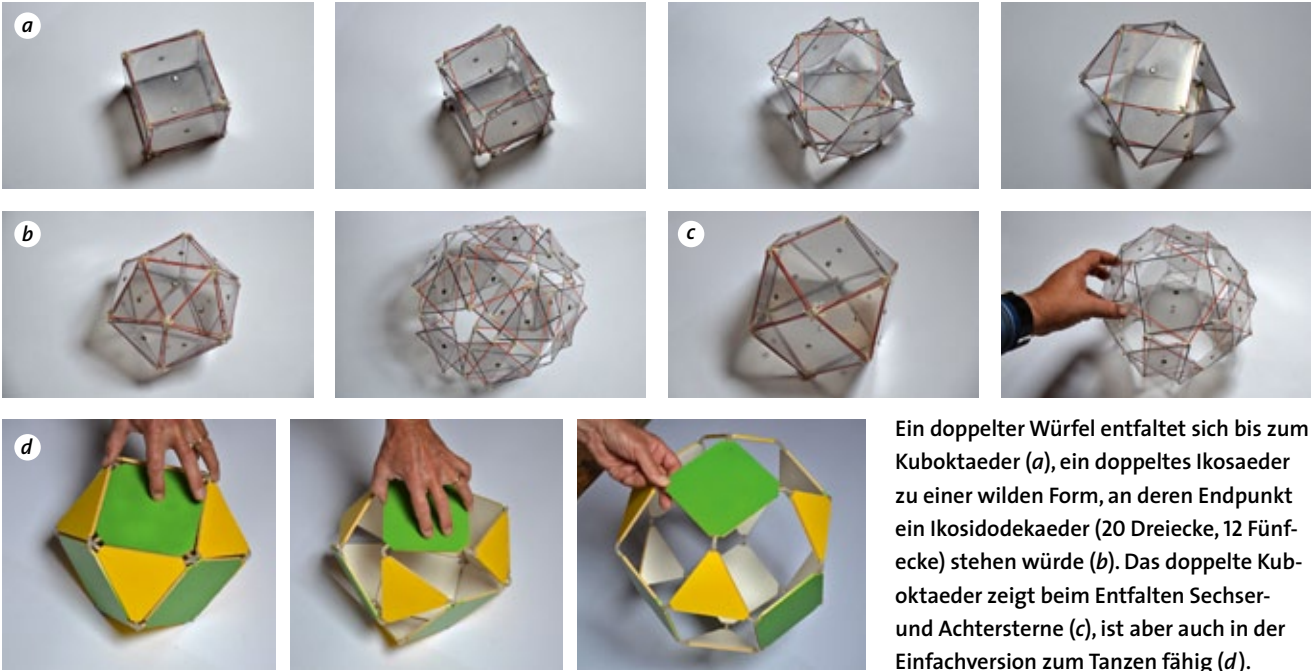
In diesem Torsionsoktaeder sind die Dreiecksflächen zu flachen Kästchen verdickt, um Platz für die papiernen Gelenke zu schaffen. Jede geschlitzte Kante öffnet sich zu einem gleichschenkligen Dreieck (a bis c), das irgendwann (d) zu einem gleichseitigen Dreieck wird. Dann ist der Körper ein regelmäßiges Ikosaeder, bei dem 12 der 20 Flächen aus Luft bestehen. Die maximal entfaltete Form ist das Kuboktaeder (e); durch weiteres Bewegen falten sich die acht Dreiecke wieder zum Oktaeder (f bis h) – in anderer Anordnung.

CHRISTOPH PÖPPE



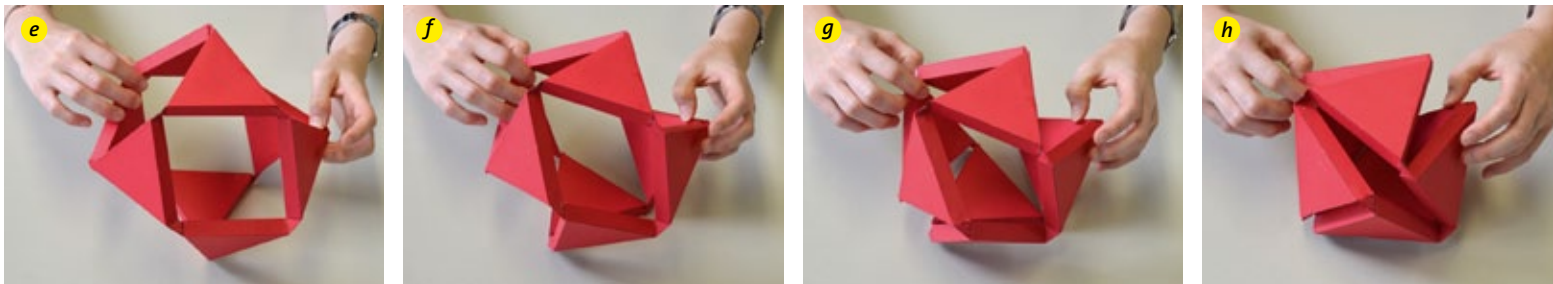


Ueli Wittorf hält in seinem Atelier in Zürich einen »Goldklumpen« in den Händen (rechts; siehe Kasten S. 68). An der Decke hängen von links nach rechts verschiedene Positionen des Torsionsoktaeders (Detailbild oben), eine Projektion des vierdimensionalen 120-Zells und ein Stern nach Bauart der Herrnhuter Weihnachtssterne.

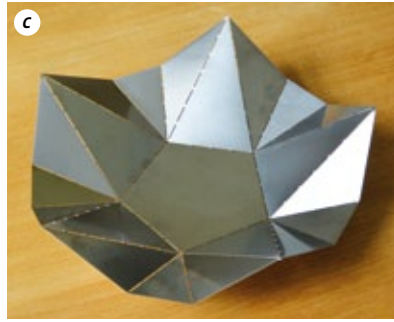
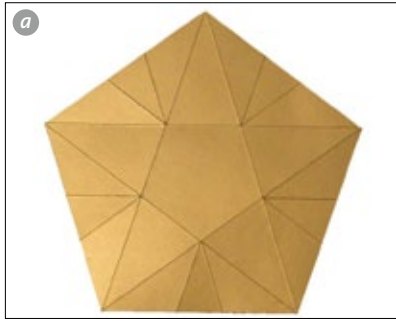


Ein doppelter Würfel entfaltet sich bis zum Kuboktaeder (a), ein doppeltes Icosaeder zu einer wilden Form, an deren Endpunkt ein Ikosidodekaeder (20 Dreiecke, 12 Fünfecke) stehen würde (b). Das doppelte Kuboktaeder zeigt beim Entfalten Sechser- und Achtersterne (c), ist aber auch in der Einfachversion zum Tanzen fähig (d).

ALLE FOTOS DIESER SEITE: CHRISTOPH POPPE



## Gold- und Silberklumpen

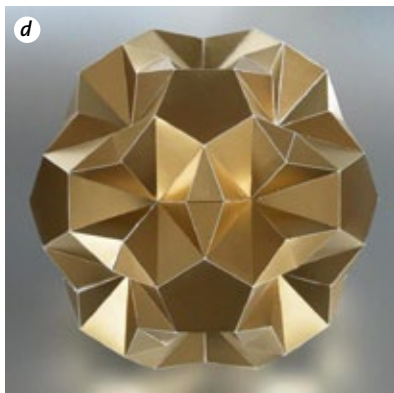


**Ueli Wittorf gibt dem regelmäßigen Fünfeck** innere Beweglichkeit, indem er es mit Knicklinien versieht (a). Und zwar verbindet er die Ecken des Fünfecks durch Diagonalen, so dass ein Fünfstern (Pentagramm) entsteht. Dieser enthält in seiner Mitte wieder ein Fünfeck. Auch das wird mit Diagonalen versehen, aber »nach außen«: Nur die Verlängerungen der Diagonalen werden zu Knicklinien. Dadurch werden die fünf Dreiecke, die das Pentagramm vom ursprünglichen Fünfeck übrig lässt, in je drei Teile zerlegt. Wittorf nennt diese Dreiteiler »Schwimmhäute« – gespannt zwischen den »Fingern« (den Spitzen des Fünfsterns) und zu allerlei Bewegung fähig.

Zwölf starre Fünfecke ergeben zusammen ein ebenfalls starres Dodekaeder (b). Knickt man die Teilflächen eines seiner Fünfecke gegeneinander, so entsteht daraus eine extravagante Obstschale (c). Dieselben Knicke – die dreieckigen Spitzen des Fünfsterns nach innen und die Schwimmhäute nach außen – auf alle zwölf Fünfecke angewandt bringen das ganze Dodekaeder in Bewegung. Dabei

bleibt sein Zusammenhang sogar erhalten (d).

Will man dagegen die Sternspitzen nach wie vor nach innen und die



Schwimmhäute noch weiter nach innen knicken, dann reißen die Kanten des Dodekaeders auf. An den Ecken halten die Fünfecke noch zusammen; deshalb hat das ganze Gebilde während der ganzen Bewegung die Symmetrie des Dodekaeders. Der Endpunkt der Bewegung ist erreicht, wenn benachbarte Schwimmhäute im Inneren des Gebildes aneinanderstoßen (e).

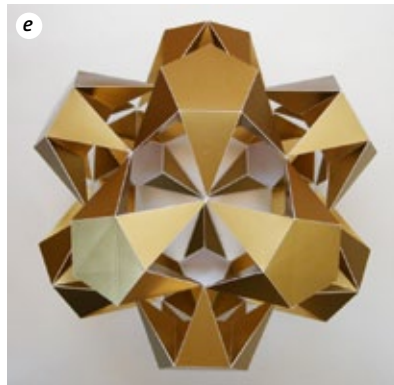
Lässt man die Schwimmhäute ganz weg, so faltet sich jedes Pentagramm zu einer fünfseitigen Pyramide zusammen. Die Pyramiden weisen mit den Spitzen nach innen, auf den Mittelpunkt des Dodekaeders – und passen nicht ganz zusammen, weil sie dafür ein bisschen zu spitz sind (f).

Wittorf hat seine Gebilde Goldklumpen genannt, weil seine Exemplare beim Weihnachtsbasteln aus Goldpapier entstanden. Die »Silberklumpen« sind nach demselben Prinzip gebaut; allerdings werden diesmal die Spitzen der Fünfstern nicht nach innen, sondern nach außen



geknickt, so dass die zentralen Fünfecke nicht hervorstehen, sondern etwas versteckt liegen.

Die Schwimmhäute lassen zwischen sich Löcher von der Form eines nichtebenen Sechsecks. Wittorf hat sie, der Symmetrie des Dodekaeders getreu, mit Kapfen aus einem gleichseitigen Dreieck und drei gleichschenkligen Dreiecken abgedeckt (g).



ALLE FOTOS: DIESE SEITE (SO FERN NICHT ANDERS ANGEGEBEN) VON UELI WITTOF



Das Iksosaeder lässt sich in zwei spiegelbildlich gleiche Teile zerlegen. Die Hälften beliebig nach diesem Prinzip zersägter Körper passen stets zusammen.

ner Fläche zwei identische Exemplare genau übereinander. Der abstrakt denkende Mathematiker kann sich mühelos vorstellen, dass sie genau denselben Platz einnehmen. Wer allerdings einen solchen Körper in der Realität konstruieren will, muss eine äußere und eine innere Fläche aufeinanderlegen – und zweckmäßigerweise im Mittelpunkt zusammennieten. Denn sowie sich der Körper in Bewegung setzt, wandern die verdoppelten Flächen nicht nur gemeinsam nach außen, sondern der äußere Partner dreht sich rechtsherum und der innere linksherum – oder umgekehrt. Jede der beiden Teilflächen findet eine gegenläufig rotierende Nachbarin; das ist jedoch für eine äußere Teilfläche stets eine innere und umgekehrt. An jeder Ecke halten sich also zwei Paare von Flächen die Händchen, aber überkreuz, was die Beweglichkeit des ganzen Gebildes etwas einschränkt.

Mit diesem Kunstgriff – den in der Theorie auch schon Fullers Schüler Joe Clinton entdeckt hatte – gelingt es Ueli Wittorf, alle platonischen Körper zum Tanzen zu bringen (Bilder a bis d, S. 67). Am Endpunkt der Bewegung liegen die beiden Partner eines Paares wieder exakt aufeinander, aber gegenüber der Ausgangsstellung verdreht. Im »aufgedrehten« Zustand sind die Körper, wenn man die »Luftlöcher« mitzählt, nicht in jedem Fall platonisch, zählen aber immerhin zu den regelmäßigen Körpern zweiter Klasse, den archimedischen Körpern. Auch diese haben als Grenzflächen regelmäßige Vielecke, aber nicht nur von einer Sorte; zusätzlich müssen jeder Ecke die gleichen Flächen in der richtigen Reihenfolge anliegen.

Aus dem Tetraeder wird das Oktaeder – mit Luftlöchern. Der Würfel ver-

wandelt sich in das Kuboktaeder aus Quadraten mit dreieckigen Luftlöchern, das Oktaeder – über die unerwartete Zwischenstufe Iksosaeder – ebenfalls in ein Kuboktaeder; nur sind diesmal die Dreiecke real und doppelt vorhanden, und die Quadrate bestehen aus Luft. Das Dodekaeder und das Iksosaeder entfalten sich zum Iksidodekaeder: An jeder Ecke liegen der Reihe nach ein Dreieck, ein Fünfeck, ein Dreieck und wieder ein Fünfeck.

Nachdem auf diese Weise die archimedischen Körper ins Blickfeld geraten sind, liegt die Frage nahe, ob auch sie zum Tanzen zu bringen sind. Für das Kuboktaeder und das Iksidodekaeder ist das der Fall. Denn die haben um jede Ecke herum vier Flächen liegen. Also können diese, ohne sich verdoppeln zu müssen, mühelos miteinander Händchen halten und gegenläufig rotieren, und keine Fläche geht leer aus.

### Paarung der halben Iksosaeder

Eine weitere Idee Wittorfs geht vom Iksosaeder aus: dem platonischen Körper aus 20 Dreiecken, die zu fünft an jede Ecke angrenzen. Man stelle sich diesen Körper massiv vor und zusammengesetzt aus 20 dreiseitigen Pyramiden, die als Grundflächen die dreieckigen Seitenflächen haben und sich alle mit den Spitzen im Mittelpunkt des Iksosaeders treffen. Nehmen wir dann in Gedanken zehn einander benachbarte Pyramidchen in die eine Hand und die restlichen zehn in die andere, wobei in keinem Fall zwei Pyramidchen, die einander genau gegenüberstehen, in dieselbe Hand geraten.

Bei einer speziellen Aufteilung auf die zwei Hände passiert etwas Erstaunliches: Die beiden Hälften lassen sich so

ineinanderschieben wie die beiden Teile einer Klauenkupplung (Bilder oben). Im Kartonmodell halten sie auch in diesem Zustand ohne weitere Hilfe zusammen. Ueli Wittorf hat sie deswegen Riegel genannt und das entsprechend zerlegte Iksosaeder einen Zweiriegelkörper.

Die beiden halben Iksosaeder sind Spiegelbilder voneinander. Jedes von ihnen hat eine dreizählige Drehsymmetrie und passt daher auch in drei verschiedenen Positionen mit seinem Partner zusammen. Die überraschende mechanische Eigenschaft ist damit zu erklären, dass von den inneren Grenzflächen der Halbikosaeder jeweils zwei in ein und derselben Ebene liegen. Ein Paar dieser beiden Ebenen dient beim Zusammenschieben als Führung und lässt den Teilen keinen anderen Weg zur Vereinigung.

Einmal gefunden, lässt sich das Muster dieser Ebenen nutzen, um andere Körper zu zersägen, insbesondere platonische. Die so entstehenden Zerlegungen sehen schon deswegen ziemlich schräg aus, weil sie die Symmetrie des Ursprungkörpers missachten. Darüber hinaus können die Partner einer solchen Zerlegung »fremdgehen«, indem sie sich mit der Hälfte eines ganz anderen Körpers paaren (Bild oben, rechts). ∞

### DER AUTOR



**Christoph Pöppe** ist promovierter Mathematiker und Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

### WEBLINKS

Dieser Artikel und weitere Links im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1298018](http://www.spektrum.de/artikel/1298018)

# Das Rätsel der großen Sprachfamilien

Manche Forscher vertreten die Ansicht, dass sich die Welt mit dem Aufkommen der Landwirtschaft auch in sprachlicher Hinsicht veränderte: Letztlich sei damit die Dominanz von fünf Supersprachfamilien zu erklären.

Paul Heggarty

»Die Sprache ist voller unangenehmer Geräusche vom häufigen Knacken mit den Zähnen und dem ständigen Krächzen im Hals; und sie ist extrem arm, nicht weniger an Wörtern als an Lauten; sie verstehen sich eher durch Gesten als durch Sprechen.« (Martin Hinrich Carl Lichtenstein, Anfang 19. Jahrhundert)

Mögen auch solche Eindrücke und Vorurteile längst Geschichte sein, kaum eine Sprache erscheint uns so seltsam wie ein Vertreter der nur in Afrika gebräuchlichen Klicksprachen. Ihre Bezeichnung haben sie von den schnalzenden Lauten, die wie Konsonanten verwendet werden. Um Wörter dieser Sprachen in unser Schriftsystem umzusetzen, mussten Linguisten ungewöhnliche phonetische Zeichen verwenden und manche dazu erfinden (siehe Kasten S. 75).

Die meisten Sprecher leben in der Namib-Wüste, im Kalahari-Becken und in den Gebieten um das Kap der Guten Hoffnung. Den europäischen Kolonialisten galten sie als primitive »Buschmänner« und »Hottentotten«. Heute nennt man diese indigenen Gruppen San beziehungsweise Khoe. Auch äußerlich unterscheiden sie sich von den meisten anderen indigenen Bewohnern Afrikas. Erbgutvergleiche haben gezeigt, dass sie genetisch von anderen Menschengruppen abweichen. Experten schätzen, dass die Vorfahren der heutigen Khoe-San spätestens vor 30 000 Jahren, möglicherweise sogar schon vor 100 000 Jahren eine eigene Entwicklung einschlugen.

Weil sie ihnen daher als letzte Vertreter einer steinzeitlichen Lebensart galten, folgerten manche Anthropologen in den 1950er Jahren, Klicklaute seien Elemente aller ursprünglichen Kommunikation gewesen, beispielsweise auf Grund einer Eignung zur Kommunikation in der Wildnis. Aber auch Klicklaute unterliegen der Veränderung, können im Lauf der Zeit verloren gehen oder als neue Elemente in eine Sprache einfließen. Zudem zeigen linguistische Analysen, dass die heute noch gebräuchlichen Klicksprachen in Struktur, Vokabular und Grammatik zu sehr differieren, um zu einer einheitlichen Sprachfamilie zu gehören. Zudem sind die verschiedenen Sprechergruppen keineswegs genetisch identisch und folgen im Übrigen verschiedenen Lebensweisen: Die San sind Jäger und Sammler, die Khoe hingegen Viehhirten.

Mit der allmählichen Verbreitung der Landwirtschaft im äußersten Süden Afrikas während der letzten zwei Jahrtausende durch Bantu-Völker wurden die Khoe-San-Gruppen in unfruchtbarere Gebiete verdrängt. Im Zuge dieser »Neolithischen Revolution« expandierte die Bantu-Sprachfamilie also auf Kosten der Klicksprachen, auch wenn ein paar wenige Mitglieder Klicklaute in ihr Repertoire aufgenommen haben, etwa das Zulu und Xhosa.

Ein vergleichbarer Vorgang soll, laut einer umstrittenen These, weltweit stattgefunden haben: Neolithisierung förderte die Sprachausbreitung. Auf diese Weise ließe sich erklä-



## DIE SERIE IM ÜBERBLICK

### WELT DER SPRACHE

- |               |   |                    |
|---------------|---|--------------------|
| Teil 1        | ► Ende der Exklusivität<br><i>Ina Bornkessel-Schlesewsky<br/>und Matthias Schlesewsky</i><br>Sprachenvielfalt als natürliches Experiment<br><i>Nikolaus P. Himmelmann</i> | Mai 2014           |
| Teil 2        | ► Sprachenvielfalt der Anden<br><i>Paul Heggarty</i>  | Juni 2014          |
| Teil 3        | ► Sehen, riechen, orientieren<br><i>Thomas Widlok und Niclas Burenhult</i>  | Juli 2014          |
| <b>Teil 4</b> | ► <b>Das Rätsel der großen Sprachfamilien</b><br><i>Paul Heggarty</i>   | <b>August 2014</b> |
| Teil 5        | ► Pfeifsprachen<br><i>Jan Dönges</i>  | September 2014     |
| Teil 6        | ► Die Entstehung der kreolischen Sprachen<br><i>Jürgen Lang</i>   | Oktober 2014       |

ren, warum zwei Drittel der Menschen weltweit entweder einen Vertreter der indoeuropäischen oder der sinotibetischen Sprachfamilie sprechen, und die drei Familien Niger-Kongo (wozu die Bantu-Sprachen gehören), Afro-Asiatisch und Australonisch den Löwenanteil des restlichen Drittels für sich verbuchen. Die gut 150 bis 200 restlichen Sprachlinien – entweder kleine Sprachfamilien oder »isolierte« Sprachen, die also keine klare Verwandtschaft zu irgendeiner anderen zeigen – müssen sich mit dem restlichen 15 Prozent zufriedengeben und werden oft nur von hunderten oder gar nur einigen Dutzend Menschen gesprochen.

Die größte Sprachfamilie weltweit ist das Indoeuropäische, nahezu jeder Zweite spricht eines ihrer Mitglieder. Diese gehen auf eine gemeinsame »Proto-Indoeuropäische« Ursprache zurück, die sich gen Osten bis zum Golf von Bengalen

#### AUF EINEN BLICK

##### EVOLUTION DANK REVOLUTION?

**1** Die meisten Menschen sprechen eine Sprache, die zu einer von fünf **großen Sprachfamilien** gehört. Diese stammen aus der Alten Welt.

**2** Der Archäologe Colin Renfrew sieht die »**Neolithische Revolution**« als Hauptursache: Die Entwicklung der Landwirtschaft ließ die Bevölkerungsdichte steigen, was eine Expansion in zuvor nur von **Jägern und Sammlern** bewohnte Gebiete auslöste. So verbreitete sich auch die von den Einwanderern gesprochene Sprache.

**3** Um der historischen Wirklichkeit gerecht zu werden, muss man aber auch die jeweiligen **Rahmenbedingungen** und **Ausprägungen** der Landwirtschaft sowie andere Technologien wie die **Seefahrt** oder **Eisenverarbeitung** einbeziehen.

DREAMSTIME / TEMISTOCLE LUCARELLI

Einst waren die »San«-Jägervölker im südlichen Afrika weit verbreitet. Heute ist ihre Lebensweise (sowie ihre Klicksprachen) nur noch bei sehr wenigen Gruppen gebräuchlich.



und in westlicher Richtung bis zur europäischen Atlantikküste ausbreitete. Auf ihrem Weg durch Europa verdrängte die neue Familie fast alle bis dahin gebräuchlichen Sprachlinien.

Doch wo das Proto-Indoeuropäisch seinen Ursprung hatte, wird schon lange diskutiert. Seit den 1970er Jahren verlegt die gängigste Hypothese ihn in die Steppen der heutigen Ukraine und den Beginn der Expansion vor etwa 6000 Jahre. Als Ursache gelte: die Domestikation des Pferdes, die Entwicklung des Rades und das Aufkommen der pastoralen Lebensweise, das heißt der Tierhaltung auf Naturweiden.

Der britische Archäologe Colin Renfrew von der University of Cambridge aber postulierte 1987, die enorme Verbreitung des Indoeuropäischen müsse eine andere Ursache gehabt haben: die neolithische Revolution. In diesem Fall hätte sie vor mehr als 9000 Jahren begonnen, ausgehend von den Bauernsiedlungen im nördlichen Bogen des Fruchtbaren Halbmondes, in der heutigen Osttürkei.

Renfrew verwies in diesem Zusammenhang auf die erwähnte und durchaus vergleichbare Expansion der Bantu-

Sprachen sowie die Karriere des Austronesischen, das zwischen 4000 und 1000 vor heute von Taiwan aus über die südostasiatische und pazifischen Inselwelten und gen Westen bis nach Madagaskar gelangte. Schon bald griff Peter Bellwood von der australischen National University in Canberra Renfrews Idee auf und erforschte weltweit die mögliche gemeinsame Verbreitung von Landwirtschaft und Sprachen. Schließlich avancierte diese Idee zum allgemeinen Erklärungsmodell. Die von Linguisten als Proto-indoeuropäisch, Proto-austronesisch und so weiter bezeichneten Ursprachen seien demnach von jenen Gruppen gesprochen worden, die als Erste in ihrer Region die Landwirtschaft entwickelt hatten. Das folgende Bevölkerungswachstum führte zur Erschließung neuer Gebiete; dort lebende Wildbeuter seien verdrängt oder assimiliert worden. Deren Sprachen verschwanden, während sich die Neankömmlinge jeweils unabhängig voneinander weiter veränderten. Auf diese Weise entstand die heutige geografische Vielfalt innerhalb der großen Sprachfamilien.

## Die Teilung der (Sprach)Welt

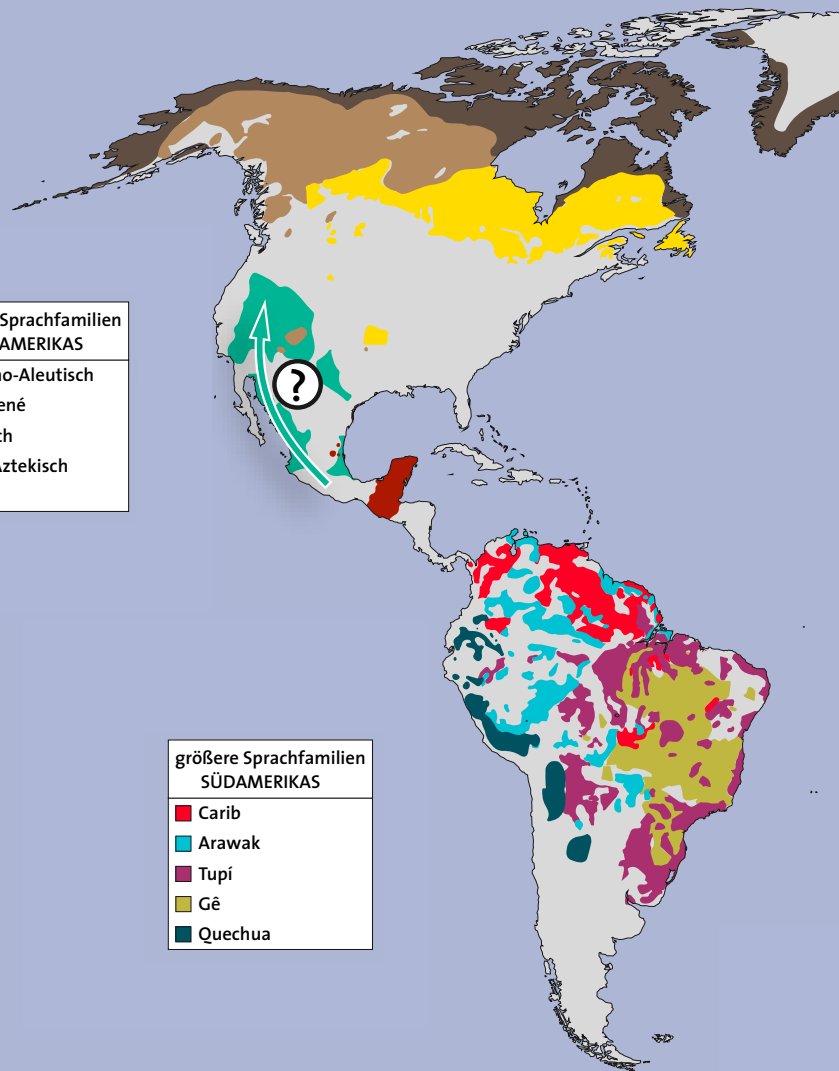
Während die Darstellung der größten Sprachlinien des amerikanischen Doppelkontinents einem bunten Flickenteppich gleicht, dominieren in der Alten Welt fünf große Sprachfamilien (kleinere Familien und isolierte Sprachen sind auf dieser Karte nicht dargestellt). Archäologen, Genetiker und Linguisten suchen nach Erklärungen für dieses Phänomen. In einigen Fällen förderte wohl eine agrarische Lebensweise die Expansion, doch in anderen lässt sich ein solcher Zusammenhang nicht herstellen oder würde als Erklärung nicht ausreichen.

### größere Sprachfamilien NORDAMERIKAS

- Eskimo-Aleutisch
- Na-Dené
- Algisch
- Uto-Aztektisch
- Maya

### größere Sprachfamilien SÜDAMERIKAS

- Carib
- Arawak
- Tupí
- Gê
- Quechua



MARKUS SCHREIBER UND PAUL HEGGARTY, NACH: ISH ISHVAR / CC-BY-2.0 (KREATIVCOMMONS.ORG/LICENSING/RY/2.0) (NORDAMERIKA), BRADAK / CC-BY-SA-3.0 (SÜDAMERIKA) UND TIMMISTERS / CC-BY-SA-3.0 (KREATIVCOMMONS.ORG/LICENSING/RY/SA/3.0) (ALTE WELT)



Renfrew und Bellwood sind keine Sprachwissenschaftler, sondern Archäologen. Anhand der materiellen Hinterlassenschaften vorschriftlicher Kulturen hatte ihre Zunft schon seit Langem die große Bedeutung der Domestikation von Pflanzen und Tieren für die Menschheit erkannt. Als Jäger und Sammler hatte Homo sapiens nur in kleinen Gemeinschaften leben können. Schon die Landwirtschaft hob diese Grenze auf. Felder bearbeitende Bauern gründeten zudem dauerhafte Siedlungen. Wachsende Erträge ernährten mehr Menschen, ergaben Überschüsse, die als Vorrat dienten oder gegen andere Güter getauscht werden konnten.

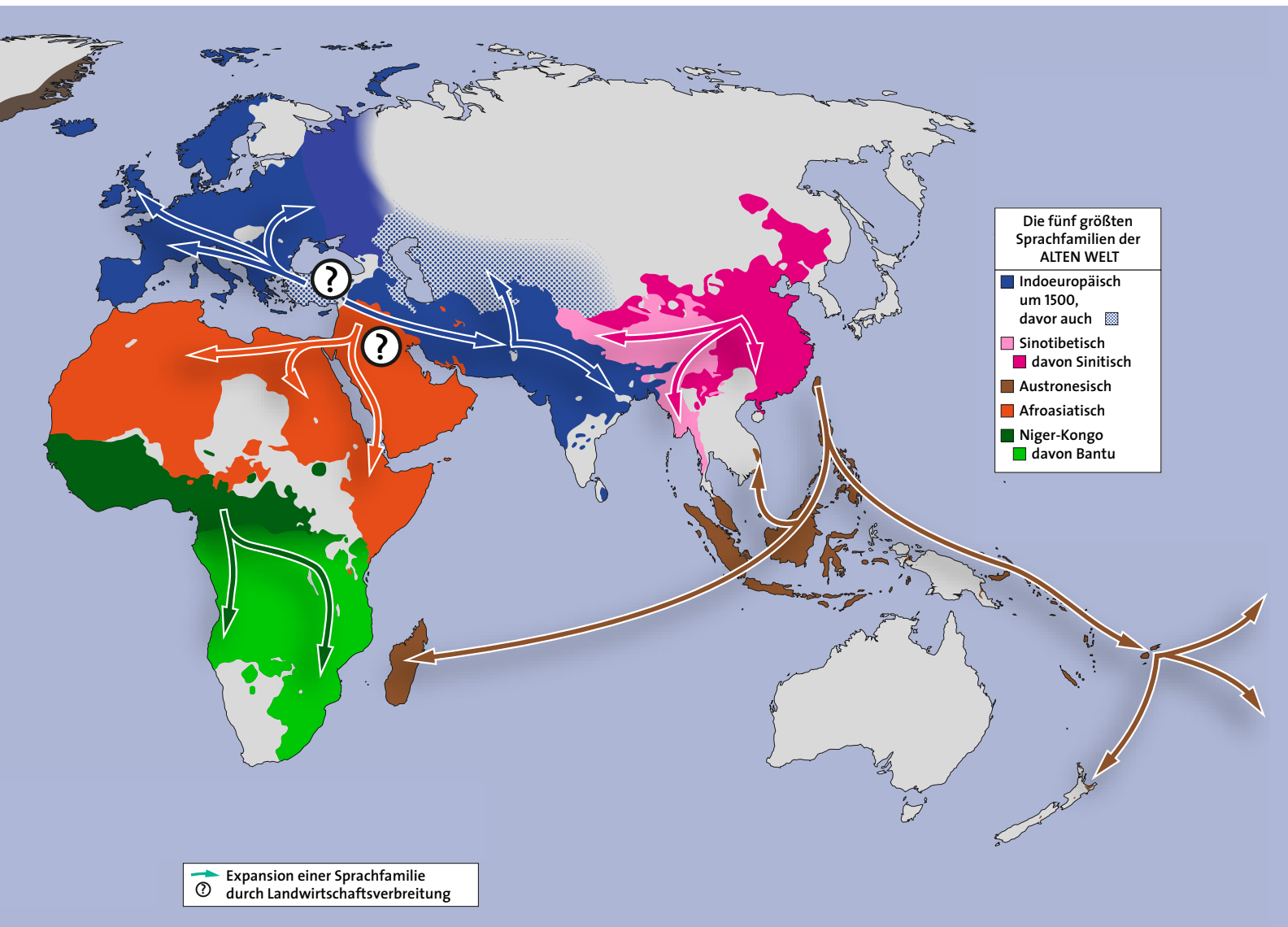
### Bunte Sprachvielfalt in Melanesien

Eine Dynamik entstand, die in bis dahin egalitären Gesellschaften unterschiedliche Arbeitsarten und damit soziale Strukturen ausbildete, bis Jahrzehntausende später Eliten über Bauern und Handwerker herrschten, monumentale Bauwerke, Städte und Staaten entstanden. Die Annahme lag

nahe, dass dieser fundamentale Wandel auch die Schicksale der Sprachen dramatisch veränderte.

So bestechend diese Schlussfolgerung auf den ersten Blick scheint, ist die Realität doch komplexer, als das einfache Modell zu erklären vermag. Beispielsweise wurde Austronesisch in einem großen Teil Melanesiens nicht übernommen. Auf diesen Inseln nördlich von Australien, zu denen als größte Neuguinea zählt, herrscht vielmehr eine bunte Sprachvielfalt. Das genetische Profil liefert eine Erklärung für diese Beobachtung: Es unterscheidet sich von dem der Bewohner austronesischsprachiger Inseln in Südostasien und Polynesien. Offenbar wurde die große Sprachfamilie von einer Gruppe verbreitet, die sich in den betreffenden Gebieten Melanesiens nicht durchsetzen und ihre genetischen wie auch linguistischen Spuren hinterlassen konnte.

Noch mehr irritieren die Befunde aus der Neuen Welt: Auf dem amerikanischen Kontinent finden sich zahlreiche einheimische Sprachlinien, doch keine vermag derart zu dominieren wie eine der genannten fünf in der Alten Welt. Selbst



die Sprachfamilien der Landwirtschaft betreibenden Hochkulturen Mesoamerikas und der Anden erreichen keine solche Dominanz. Im Amazonasgebiet etwa gibt es zwar einige mittelgroße Sprachfamilien, doch sie bilden einen regelrechten Flickenteppich, durchsetzt mit Dutzenden kleiner, unabhängiger Sprachlinien. Auch an der Westküste Nordamerikas gab es vor den Europäern eine enorme sprachliche Vielfalt.

Im äußersten Norden des Doppelkontinents hingegen dominierten bis zur »Invasion« des Englischen und Französischen tatsächlich drei Sprachfamilien: Eskimo-aleutisch, Algisch und Na-Dene-Sprachen (siehe Karte S. 72). Sie hatten sich verbreitet, obwohl sie von Jägern und Sammlern benutzt wurden. Gleiches gilt für die Pama-Nyunga-Sprachen Australiens. Einige Sprachwissenschaftler glauben, damit die mögliche Kopplung von Neolithisierung und Sprache zu widerlegen. Doch meist handelt es sich um Wildbeutergemeinschaften in Gegenden, die Ackerbau sowieso kaum erlauben.

Grönland ist hierfür ein gutes Beispiel. Siedler brachten das Altnordische, eine indoeuropäische Sprache, um das Jahr 980 auf die Insel. Der Name »Grünes Land« mag auch damals ein wenig übertrieben gewesen sein, doch Bauern fanden dort ihr Auskommen. Gut 500 Jahre später fielen die Siedlungen jedoch wüst, denn die so genannte Kleine Eiszeit machte

Landwirtschaft unmöglich. Die mit Kajaks, Harpunen und Huskys bestens gerüstete indigene Bevölkerung war wieder für sich allein – und sprach ihr Eskimo-Aleutisch.

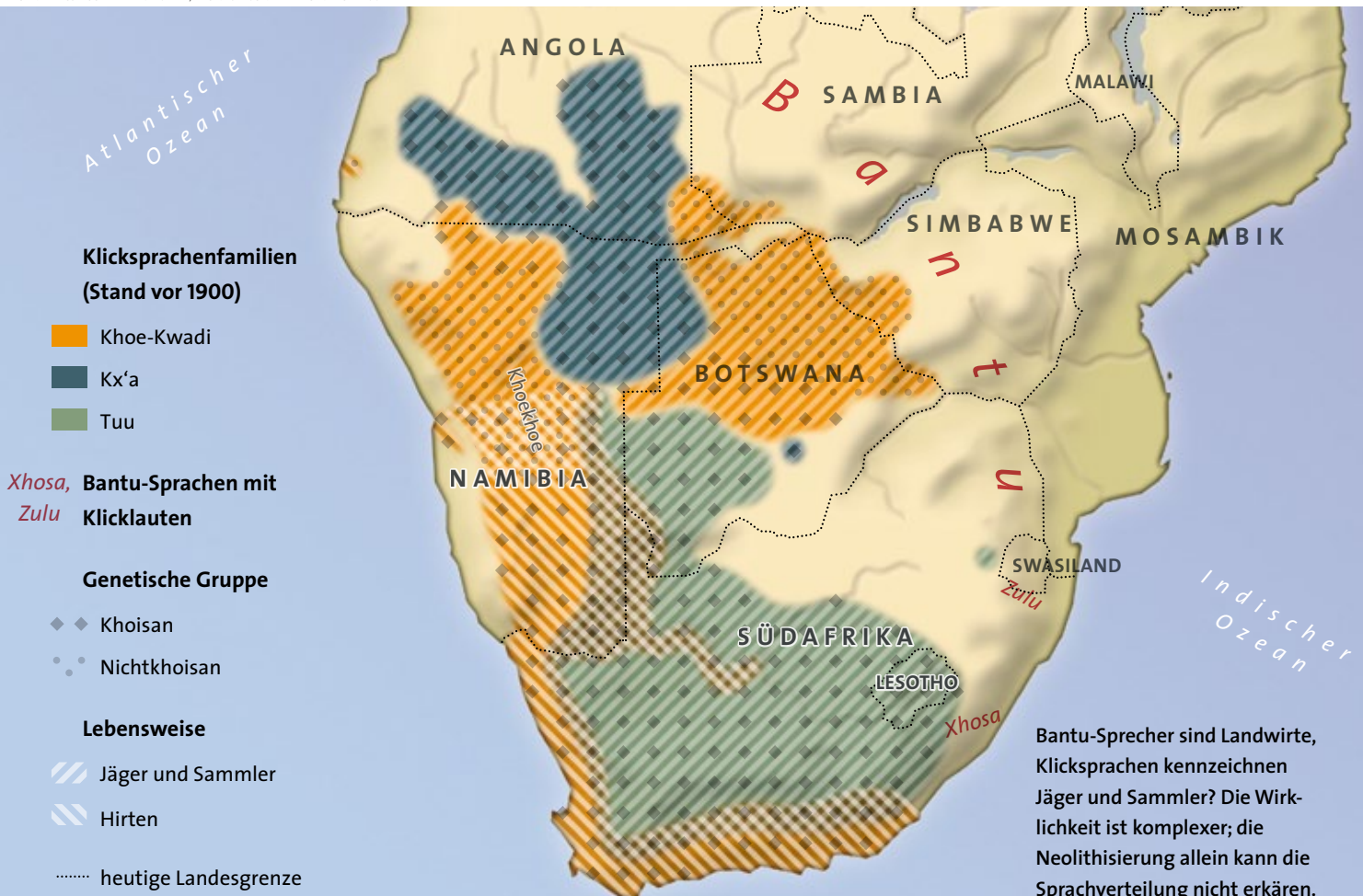
Eine solche Bewertung der Nutzbarkeit für den Ackerbau erklärt auch, warum sich die Neue Welt in linguistischer Hinsicht ganz anders entwickelt hat: Meere, Wüsten und dichter Regenwald hemmten die Verbreitung der Landwirtschaft von ihren Zentren in Mittelamerika und den Zentralanden aus. Auch wenn sich einige wenige Sprachfamilien wie das Maya mit dem Ackerbau erklären lassen, blieben sie auf Grund der geografischen Bedingungen auf ihre Kerngebiete beschränkt.

### Die Landwirtschaft erklärt nicht alles

Archäologen und Linguisten haben Renfrews These inzwischen präzisiert: Obwohl die Landwirtschaft eine logische Erklärung für die Ausbreitung mehrerer sehr großer Sprachfamilien zu bestimmten Zeiten liefert, will dieses Modell nicht gleichzeitig die Schicksale von vielen kleineren Sprachlinien auf der Welt erklären. Und wo Landwirtschaft schwer möglich ist, wird man ihr ohnehin keine treibende Kraft zubilligen.

Es ist also kein Zufall, dass jene Sprachen des südlichen Afrika, die nicht zur Bantu-Gruppe gehören, längst größtenteils auf die unwirtlichen Gebiete im Umfeld der Kalahari- und

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / EMIDE-GRAFIK, NACH: TOM GÜLDEMANN UND PAUL HEGGARTY



Sprachlaute entstehen meist, indem Luft aktiv aus der Lunge ausgeblasen wird. Bei Klicklauten hingegen bewirkt die Zunge einen einwärts gerichteten Luftzug. Im südlichen Afrika lassen sich drei Sprachfamilien unterscheiden, die Klicklaute wie Konsonanten verwenden. Durch den Kontakt mit ihren Sprechern haben auch einige Bantu-Sprachen dergleichen übernommen.

SPRACHFAMILIE	KHOE-KWADI	KX'A	TUU	BANTU	
BEISPIELSPRACHE	Khoekhoe (Namibia)	Ju!'hoan (Botswana)	!Xóõ (Botswana)	Swahili (Tansania)	Zulu (Südafrika)
»Mensch«	khòèi	jù	tâa	mtu	umuntu
»Schlange«	jàǒb	ǀààmà	sí'í-sà	nyoka	inyoka
»Baum«	hàii	!aihn	'Onàje	mti	umuthi
»Ei«	!ùwús	n!ù	ǀgúã	yai	!landa
»Fleisch«	ǀgàni	!há	ǀàje	nyama	inyama
»Zahn«	ǀgúúǀb	nǀah	ǀqhàã	jino	izinyu

Phonetische Symbole:

ǀ | ! | ǀ | ǀ = Klicklaute, anzuhören unter [http://de.wikipedia.org/wiki/Klick\\_%28Phonetik%29#Arten](http://de.wikipedia.org/wiki/Klick_%28Phonetik%29#Arten)

˘ ˙ ˚ ˛ = Tonhöhe (hell, sehr hell, dunkel, sehr dunkel)

˜ = nasale Vokale

(gleiche Farbe bedeutet gleiche Herkunft; Transkriptionen gemäß dem Internationalen Phonetischen Alphabet).

Namib-Wüste beschränkt sind. Irritierenderweise sind heutzutage Klicksprachen hauptsächlich bei Gruppen in Gebrauch, die von der Weidewirtschaft leben – einer speziellen Form der Viehzucht und damit der Landwirtschaft.

Der Linguist Tom Güldemann von der Humboldt-Universität Berlin formulierte die These, dass das Khoe-Kwadi, eine der drei Klicksprachfamilien, nicht lange vor dem Bantu in die Region gelangte. Seines Erachtens sprachen es aus Ostafrika kommende Hirten, die Weidewirtschaft und ihre Sprache mitbrachten. Weil sie sich auch mit den indigenen Gruppen vermischten, passt die geografische Verbreitung der Klicksprachfamilien, die Genetik der Khoe-San-Völker sowie ihre Zuordnung zu den beiden Wirtschaftsweisen nicht immer zueinander (siehe Karte links).

Andererseits ist das Aufkommen der Bantu-Sprachen in diesen Gebieten kein reiner Neolithisierungseffekt – die Landwirtschaft existierte in Westafrika schon lange vorher. Die Expansion nach Süden beruhte vielmehr auch auf dem Knowhow, Eisen zu verhütten und Werkzeuge zu schmieden. Denn nun konnten die Bantu-Völker den Ackerbau intensivieren, und die Bevölkerung wuchs mit den genannten Folgen.

Auch das Austronesische passt nicht ganz ins Bild. Denn am Anfang stand nicht der große Exodus. Vielmehr verließen wohl nur wenige hundert bis wenige tausend Sprecher vor gut 4000 Jahren Taiwan. Sie erreichten die gut 250 Kilometer entfernten nördlichen Philippinen, von wo aus sich die Inselwelt Südostasiens und des Pazifiks leicht von Eiland zu Eiland erschließen ließ. Da die Auswanderer die Landwirtschaft mitbrachten, wuchs die Bevölkerung – und erneut suchten Mutige eine neue Heimat.

Aber warum war ausgerechnet diese austronesische Sprachlinie so erfolgreich? Insbesondere im benachbarten China und in Indien lebten die Menschen ebenfalls von der Landwirtschaft, und doch trugen nicht sie ihre Sprachen in die Welt hinaus. Vielmehr ermöglichte wohl das Knowhow in Sachen Seefahrt den Austronesiern, neue Inseln zu besiedeln. Auf ihren Auslegerbooten wagten sie sich Hunderte von Kilometern aufs offene Meer hinaus, Samen und Nutz-

tiere an Bord. Wohl waren die meisten der Inseln schon von Wildbeutern bewohnt, doch die Gruppen vermischten sich, wie nicht allein genetische, sondern auch linguistische Analysen zeigen: So wie manche Bantu-Gruppen Klicklaute übernahmen, lassen sich auch in einigen austronesischen Sprachen Relikte längst verschwundener Sprachen nachweisen.

### Genetische Spuren der ursprünglichen Bevölkerung

Renfrews Modell postuliert dementsprechend keine Vertreibung indigener Gruppen, was einen vollständigen genetischen Austausch implizieren würde. Es beruht vielmehr auf der Vorstellung einer Bevölkerungswelle, bei der die Neuankömmlinge die Zahl der Einheimischen bei Weitem übertreffen. An der Wellenfront – also zwischen den vergleichsweise dicht besiedelten bäuerlichen und den von Wildbeutern bewohnten Gebieten – konnten Letztere die neue Kultur und Sprache übernehmen und sich in die neue Lebensweise integrieren. So verhältnismäßig gering der Beitrag der indigenen Bevölkerung zum Genpool auch sein mochte, er wuchs zwangsläufig, je weiter sich die Wellenfront von ihrem Ausgangsort entfernte. Genetische Studien aus den 1990er Jahren entdeckten ein solches Muster von Anatolien aus quer durch Europa, was zu einer Verbreitung indoeuropäischer Sprachen durch der Neolithisierung passen würde. Inzwischen verfügen Genetiker über weit bessere Techniken; sie können sogar aus von Archäologen entdeckten menschlichen Überresten »alte DNA« gewinnen und mit den Erbanlagen heutiger Menschen vergleichen. Bisherige Studien liefern noch kein definitives Bild für oder gegen das Modell, doch sollte es in den nächsten Jahren möglich sein, genauere Aussagen zu treffen.

Vollends komplex wird die These, bedenkt man: Landwirtschaft ist nicht gleich Landwirtschaft, sondern immer ein Gesamtpaket mit vielen Komponenten wie Feldfrüchten, Tieren und Technologien. Diese müssen nicht alle von gleicher Herkunft sein. Im insularen Südostasien kam manches aus Taiwan, anderes aus Indochina oder Neuguinea. Zudem



ISTOCKPHOTO: SPONK

Die auch heute noch gebräuchlichen Auslegerboote dürften einen wesentlichen Anteil an der Verbreitung und Weiterentwicklung der Austronesischen Sprachfamilie gehabt haben.

schnüren die Menschen nicht immer das gleiche Paket. Im Amazonasgebiet bringen nur die Überflutungen der großen Ströme Nährstoffe in die kargen Böden ein, weshalb Bauern die Ufer besiedeln und den Urwald den Wildbeutern überlassen. Manche Linguisten sehen darin einen Grund dafür, weshalb Sprachfamilien wie Arawak, Tupí und Carib wie auf einem Flickenteppich in Amazonien verstreut sind.

Einem simplen Prozess nach dem Muster »Neolithisierung bewirkt Sprachübernahme« hat es also nur selten gegeben. Oft kam die Landwirtschaft in einer Region nicht plötzlich auf, sondern im Zuge eines langen Übergangs von einer Lebensweise in eine andere. Im kalten Nordeuropa etwa blieb das Meer eine wichtige Nahrungsquelle. Wohl aus diesem Grund finden sich genetische Spuren einer präneolithischen Urbevölkerung im Genpool Nordwesteuropas beziehungsweise mögliche linguistische Relikte im germanischen Zweig der indoeuropäischen Sprachfamilie.

Insgesamt halten Linguisten es für wahrscheinlich, dass die sinotibetischen, austronesischen und Niger-Kongo-Sprachen (oder zumindest ihr Bantu-Hauptzweig) einst auf die Ausbreitung der Landwirtschaft zurückgingen – selbst wenn Seefahrt und Eisenverarbeitung in den letzten beiden Fällen eine bedeutende Rolle spielten. Was die afroasiatischen und indoeuropäischen Sprachen angeht, so steht die Neolithisierung zwar im Fokus der Forschung, wird aber weiterhin als Triebkraft kontrovers diskutiert.

Man darf nicht vergessen, dass die Entwicklung mit der Neolithisierung nicht stehen blieb. Die Erträge wurden gesteigert, beispielsweise durch neue Getreidesorten, Tierassen oder Technologien wie Bewässerungsanlagen oder die bei den Bantu schon erwähnte Eisenverhüttung. Das Ergebnis war weiteres Bevölkerungswachstum und eine neuerliche Expansion. Ein solcher Effekt zeigt sich auch innerhalb des Stammbaums der sinotibetischen Sprachen. Sie haben

ihren Ursprung in der Hirse anbauenden Yangshao-Kultur (5000 bis 3000 v. Chr.), die sich von der nordchinesischen Ebene aus verbreitete. Im ersten Jahrtausend v. Chr. erfuhr ein Zweig dieser Familie eine gewaltige Ausdehnung, was zur Entstehung der sinitischen beziehungsweise chinesischen Sprachen führte. Wahrscheinlich beruhte dies auf einer zweiten Phase von Bevölkerungswachstum, die zumindest zum Teil einem massiven Ausbau der landwirtschaftlichen Infrastruktur zu verdanken war. Aber dabei handelte es sich um nur eine unter vielen kulturellen, sozialen und politischen Kräften, die hier am Werk waren. So erforderten die im Rahmen dieses Ausbaus anfallenden Anlagen von Systemen zur Bewässerung und Hochwasserkontrolle ein Heer von Arbeitern, das nur eine etablierte Führungsschicht mit weitreichenden Befugnissen bereitstellen konnte. Solche gesellschaftlichen Entwicklungen brachten ihre eigene Dynamik mit, die Bevölkerungs- und damit wieder auch Sprachexpansion zur Folge haben konnte. Auch heutzutage unterliegt der sinitische Zweig derartigen Veränderungen: Das als Hochchinesisch geltende Mandarin, ursprünglich aus der Region um Peking, dominiert mehr und mehr in ganz China.

Ähnliche Kräfte sind auch heutzutage am Werk: Kleine Sprachen verschwinden, große Familien breiten sich weiter aus. Mit der Nahrungsbeschaffung hat das alles nur noch sehr wenig zu tun. Wenn der Blick in die ferne Vergangenheit aber eines lehrt, dann dieses: Die Dominanz von Sprachfamilien ist eine Wirkung, für die wir die Ursachen finden können. Die Stichworte der jüngeren Geschichte lauten beispielsweise Kolonialismus, industrielle Revolution, Globalisierung, Massenkommunikation. Wo Schulpflicht gilt, trägt sie meist ihren Teil dazu bei, große Sprachen zu verbreiten. Mit der Einführung neuer Technologien und Lebensweisen verändern wir nicht nur unsere physische Umwelt, sondern auch das linguistische Panorama der gesamten Welt. ~

#### DER AUTOR



**Paul Heggarty** arbeitet als Prähistoriker in der Abteilung für Linguistik des Max-Planck-Instituts für evolutionäre Anthropologie in Leipzig.

#### QUELLEN

- Güldemann, T., Stoneking, M.:** A Historical Appraisal of Clicks: A Linguistic and Genetic Population Perspective. In: Annual Review of Anthropology 37, S. 93–109, 2008  
<http://dx.doi.org/10.1146/annurev.anthro.37.081407.085109>
- Heggarty, P., Beresford-Jones, D.G.:** Farming-Language Dispersals (1) Principles (2) A worldwide Survey. In: Smith, C. (Hg.): Encyclopedia of Global Archaeology, S. 2731–2749. Springer, New York 2014  
[http://dx.doi.org/10.1007%2F978-1-4419-0465-2\\_2308](http://dx.doi.org/10.1007%2F978-1-4419-0465-2_2308)
- Renfrew, C.:** Archaeology and Language: The Puzzle of Indo-European Origins. Jonathan Cape, London 1987

Dieser Artikel im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1298019](http://www.spektrum.de/artikel/1298019)

# UNSERE NEUERSCHEINUNGEN



Das Magazin für alle Wissbegierigen zwischen 10 und 14 Jahren: Roboter zum Staunen • Wenn Computer denken • Mensch und Maschine im Duell • Krieg der Maschinen • € 6,50



Parasomnien: Was im Umfeld des Schlafs passiert • Schlafstörungen bei neurologischen Erkrankungen • Mehr Leistung durch richtige Schlafkultur • € 8,90



Gründungsmythen: Brudermord und Fremdherrschaft • Ständekämpfe: Sieg der Verweigerer • Rom und der hellenistische Osten • Karthago: Das antike Reich des Bösen? • € 8,90



Neuroenhancement: Doping für das Gehirn • Intelligenz: Werden wir immer klüger? • Demografie: Das Jahrhundert der Hundertjährigen • Raumfahrt: Der Mensch im All • € 8,90

So einfach erreichen Sie uns:

**Telefon: 06221 9126-743**

**[www.spektrum.de/neuerscheinungen](http://www.spektrum.de/neuerscheinungen)**

Fax: 06221 9126-751 | E-Mail: [service@spektrum.com](mailto:service@spektrum.com)

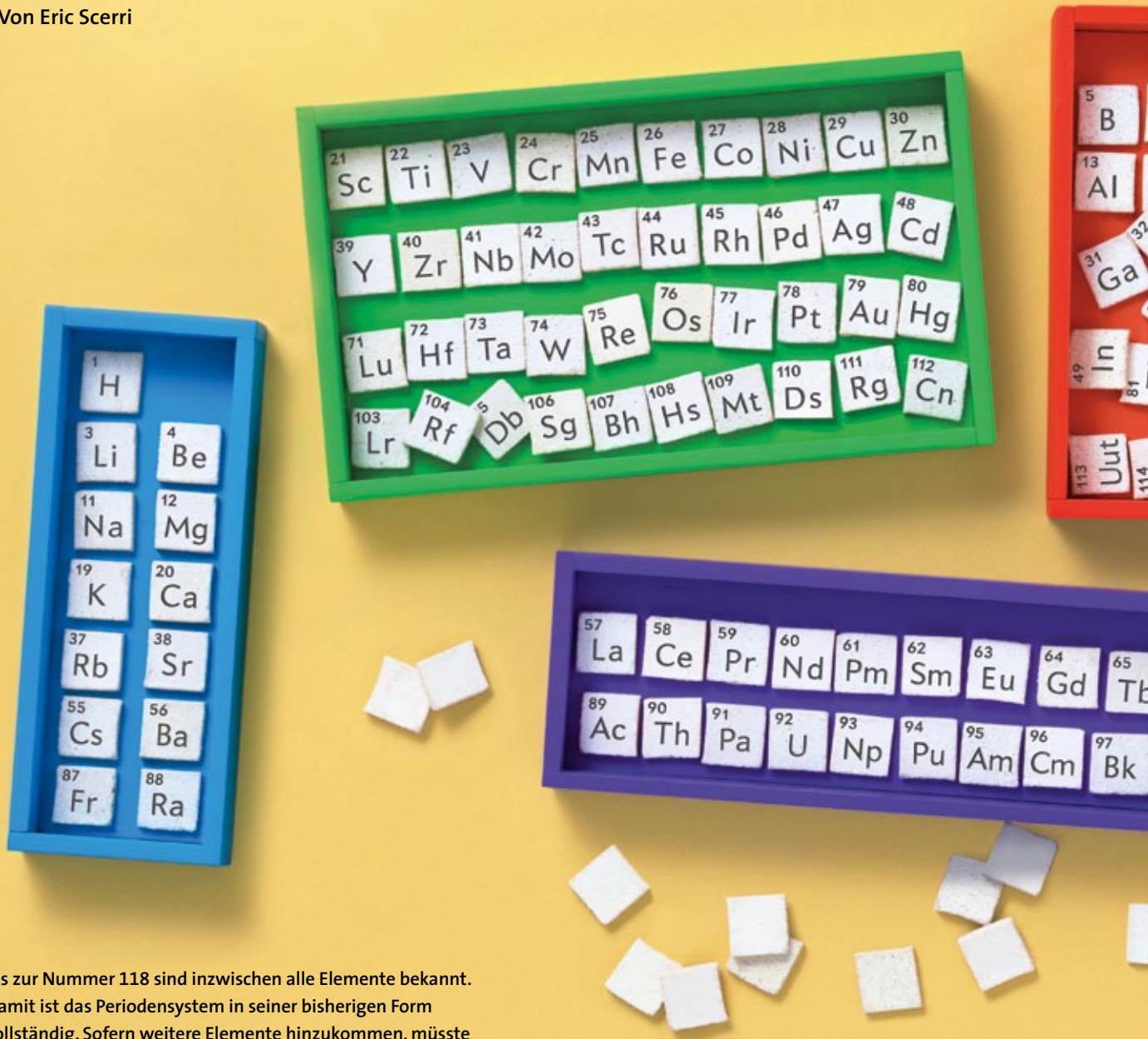
Hier QR-Code per Smartphone scannen!



# Risse im Periodensystem

Seit Mendelejew vor 150 Jahren das Periodensystem der Elemente aufstellte, enthielt es Lücken. Erst kürzlich konnten Physiker die letzten davon schließen. Doch mit seiner Vollendung scheint das berühmte Schema ironischerweise einen Teil seiner Vorhersagekraft zu verloren zu haben.

Von Eric Scerri



Bis zur Nummer 118 sind inzwischen alle Elemente bekannt. Damit ist das Periodensystem in seiner bisherigen Form vollständig. Sofern weitere Elemente hinzukommen, müsste für sie eine neue Reihe geschaffen werden.



vor vier Jahren berichteten Jurij Oganessian und seine Mitarbeiter am Vereinigten Institut für Kernforschung in Dubna nahe Moskau über die Synthese der ersten Atomkerne von Element 117. Vorläufig mit lateinischen Zahlen als Ununseptium (Uus) bezeichnet, hat es noch keinen richtigen Namen; denn vor der Taufe eines neuen Elements muss es nach altem Brauch zunächst unabhängig bestätigt werden. Das gelang für Uus vor wenigen Monaten am Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung (GSI) in Darmstadt. Damit ist demnächst mit der offiziellen Anerkennung und Namensgebung zu rechnen. Vor 2010 waren schon alle Elemente bis einschließlich 116 sowie die Nummer 118 entdeckt worden. Das Periodensystem ist nun also erstmals in seiner Geschichte vollständig in dem Sinn, dass alle Reihen lückenlos bis zum letzten Platz gefüllt sind. Das gilt zumindest so lange, bis Kernphysiker eventuell noch schwerere Elemente synthetisieren und damit eine weitere Reihe eröffnen

Als Dmitrij Iwanowitsch Mendelejew – ebenfalls ein Russe – und andere die Tabelle in den 1860er Jahren schufen, bildete sie das erste große Schema, in dem sich alle damals bekannten Elemente geordnet nach Masse und chemischen Eigenschaften unterbringen ließen. Allerdings mussten einige Positionen leer bleiben, und Mendelejew prophezeite kühn, dass eines Tages neue Elemente entdeckt würden, die genau dort hineinpassten. Tatsächlich wurden mit der Zeit immer mehr Lücken geschlossen. Später erzeugten Kernphysiker außerdem künstliche Elemente jenseits des Urans und ergänzten so die unterste Reihe – in der Element 117 schließlich den letzten noch freien Platz besetzte.

Mendelejew hätte sicher seine Freude an dem geschlossenen Erscheinungsbild, das seine Tabelle nun bietet. Etwas trübt allerdings seinen Triumph. Es ist ein Makel, der sich bei den letzten Einträgen immer deutlicher gezeigt hat. Fatalerweise droht er das Konstruktionsprinzip selbst, welches dem Schema zu Grunde liegt, in Frage zu stellen – betrifft er doch jene elementare Eigenschaft, der es seinen Namen verdankt: die sich periodisch wiederholenden Muster.

#### AUF EINEN BLICK

##### EINSTEINS FLUCH

- 1** Die **Synthese des Elements 117** hat die letzte Leerstelle im Periodensystem gefüllt. Nun liegt es erstmals vollständig vor, sofern keine weitere Periode hinzukommt.
- 2** Allerdings weichen die Elemente mit den Ordnungszahlen 104 bis 118 in ihren **Eigenschaften** teils erheblich von den anderen Mitgliedern der jeweiligen Gruppe ab.
- 3** Verantwortlich dafür sind **Effekte der speziellen Relativitätstheorie**, die unter anderem dazu führen, dass sich die äußeren Elektronen weiter vom Atomkern entfernen. Das wirkt sich auf Art und Stärke der Bindungen aus, die das Atom eingehen kann.

Mendelejew sagte ja nicht nur die Existenz von bis dahin unbekanntem Elementen voraus, sondern machte, basierend auf der Regelmäßigkeit seines Schemas, auch korrekte Aussagen zu ihren chemischen Eigenschaften. Doch die zuletzt erzeugten superschweren Elemente mit den höchsten Ordnungszahlen – sie entspricht der Anzahl der Protonen im Kern – verhalten sich teils nicht mehr so, wie das auf Grund ihrer Stellung im Periodensystem zu erwarten wäre: Ihre chemischen Wechselwirkungen und speziell die Verbindungen, die sie mit anderen Atomen bilden, weichen von denen der anderen Elemente in derselben Spalte der Tabelle ab.

Der Grund liegt darin, dass einige der Elektronen, welche die schwersten Kerne umkreisen, Geschwindigkeiten erreichen, die gegenüber der Lichtgeschwindigkeit nicht mehr zu vernachlässigen sind. Sie werden »relativistisch«, wie die Physiker sagen; denn sie lassen sich nur noch mit Einsteins spezieller Relativitätstheorie korrekt beschreiben. Dadurch entsprechen auch die chemischen Eigenschaften der betreffenden Atome, die ja von den Elektronen abhängen, nicht mehr der Stellung im Periodensystem. Und so scheint es, dass Mendelejews Werk ausgerechnet im Moment seiner (vorläufigen) Vervollständigung einen Teil seiner Erklärungs- und Voraussagekraft eingebüßt hat.

### Das chemische Verhalten wiederholt sich

Obwohl schon mehr als 1000 Versionen des Periodensystems publiziert wurden – mit vielerlei Variationen in der Anordnung und Anzahl der Einträge – haben sie doch ein entscheidendes Merkmal gemeinsam. Reiht man die Elemente nach steigender Ordnungszahl auf (anfangs wurde stattdessen das Atomgewicht verwendet), so wiederholt sich, leicht modifiziert, in regelmäßigen Abständen das chemische Verhalten. Wenn wir zum Beispiel mit Lithium beginnen und uns um acht Plätze vorwärtsbewegen, erreichen wir Natrium, das ganz ähnliche Eigenschaften aufweist. Beispielsweise sind beide Elemente Metalle und so weich, dass man sie mit einem Messer schneiden kann. Außerdem reagieren sie heftig mit Wasser. Rücken wir wiederum acht Plätze weiter, kommen wir zum Kalium, das ein genauso weiches Metall ist und noch stärker mit Wasser reagiert.

In den frühesten Periodensystemen wie dem von Mendelejew betrug die Länge einer Periode oder Reihe immer acht – mit Ausnahme der ersten, die nur zwei Einträge hatte. Bald wurde jedoch klar, dass sich bei der vierten und fünften Periode die Eigenschaften nicht nach acht, sondern erst nach 18 Elementen wiederholen. Die entsprechenden Reihen sind also breiter als die vorhergehenden; denn sie enthalten einen zusätzlichen Elementblock: die Übergangsmetalle, die in der üblichen Darstellung des Periodensystems in der Mitte sitzen. Die sechste Periode erwies sich dann als noch länger: Sie enthält 32 Elemente, da beginnend mit Lanthan 14 so genannte Lanthanide (heute Lanthanoide) hinzukommen.

Im Jahr 1937 begannen Kernphysiker, neue Elemente zu synthetisieren. Das erste war Technetium. Es füllte eine der vier Lücken in dem damals bekannten System, das von 1

(Wasserstoff) bis 92 (Uran) reichte. Die anderen drei fehlenden Elemente folgten bald; zwei davon wurden künstlich erzeugt (Astat und Promethium) und das dritte (Francium) in der Natur gefunden. Aber noch bevor diese Lücken geschlossen waren, kamen neue Elemente jenseits von Uran hinzu, und damit entstanden weitere Leerstellen.

Der amerikanische Chemiker Glenn T. Seaborg (1912–1999) erkannte, dass Actinium, Thorium und Protactinium zusammen mit Uran sowie den folgenden zehn Elementen einen weiteren Block bilden, der wie die Lanthanoide 14 Elemente enthält; sie werden als Actinide (Actinoide) bezeichnet. Weil die beiden Blöcke mit ihren 14 zusätzlichen Einträgen die betreffenden Reihen noch breiter machen würden, verzeichnet man sie in Standard-Periodensystemen gesondert am unteren Rand.

Wie sich in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts herausstellte, fußt die Periodizität der Elemente auf der Quantenphysik. Die Elektronen der Atome bewegen sich demnach auf Schalen um den Kern, wobei mit jeder neuen Periode eine zusätzliche, weiter außen gelegene Schale hinzukommt. Darin gibt es jeweils eine bestimmte Zahl von Aufenthaltsräumen, die auf Grund des von Wolfgang Pauli (1900–1958) entdeckten Ausschlussprinzips nur bis zu zwei Elektronen aufnehmen können.

Diese so genannten Orbitale zeichnen sich jeweils durch eine charakteristische Form und Größe aus. Elemente der ersten Periode verfügen über nur einen mit s bezeichneten Typ. Dieses Orbital ist kugelsymmetrisch und kann, wie gesagt, maximal zwei Elektronen aufnehmen – eines beim Wasserstoff, zwei beim Helium.

In der zweiten und dritten Schale existiert jeweils ein weiteres, größeres Orbital vom s-Typ. Außerdem kommen drei Orbitale einer neuen, hantelförmigen Sorte namens p hinzu. Wiederum kann jedes davon mit ein oder zwei Elektronen besetzt sein, was maximal sechs ergibt. Insgesamt bieten die zweite und dritte Schale also Platz für jeweils acht Elektronen. Darin liegt der Grund für die Periodizität von acht in den Originalversionen des Periodensystems.

Die Elemente der vierten und fünften Periode enthalten zusätzlich zu den s- und p- noch jeweils fünf d-Orbitale, was zehn weitere Plätze für Elektronen schafft und die Periode auf 18 streckt. Schließlich kommen in den letzten beiden Reihen noch jeweils sieben Orbitale vom f-Typ hinzu, so dass die Länge auf 32 (18 + 14) Elemente anwächst.

Der enge Zusammenhang zwischen dem Aufbau des Periodensystems und der Elektronenstruktur der Atome bedeutet, dass die Vervollständigung der Tabelle nicht nur eine Sache der Ästhetik und der Darstellungsweise auf Papier ist. Vielmehr sind nun für alle sieben Perioden sämtliche Besetzungsmöglichkeiten aller s-, p-, d- und f-Orbitale realisiert. Falls je weitere Elemente synthetisiert werden sollten, stünden sie in einer neuen Reihe des Systems. Dementsprechend käme beim Element 119 eine weitere Elektronenschale hinzu, in der sich nun das äußerste Elektron aufhielte – und zwar wiederum in dem einfachsten Orbitaltyp, dem s-Orbital.







den – gerade einmal sechs Atome beim Element 117 im Jahr 2010 zum Beispiel. Superschwere Kerne sind meist extrem instabil und zerfallen in Sekundenbruchteilen. Unter diesen Umständen ist es unmöglich, ihre chemischen Eigenschaften mit traditioneller »nasser« Chemie zu untersuchen – sie also in gelöster Form mit potenziellen Reaktionspartnern zusammenzubringen und nachzusehen, was passiert. Dennoch ersannen Forscher ausgeklügelte Methoden, um die Chemie dieser Elemente auch an einzelnen Atomen zu studieren.

Bei derartigen Experimente zeigten Seaborgium (106) und Bohrium (107) interessanterweise wieder chemische Eigenschaften, die zu ihrer Stellung im Periodensystem passten. Das brachte die Forscher dazu, die entsprechenden Veröffentlichungen mit launigen Überschriften wie »Oddly Ordinary Seaborgium« (seltsam gewöhnliches Seaborgium) oder »Boring Bohrium« (stinklangweiliges Bohrium) zu versehen. Das Periodengesetz schien nach den Ausreißern Rutherfordium und Dubnium wieder in Kraft zu sein.

Bei Copernicium (112) war die große Frage, ob es sich eher gruppenkonform wie das über ihm stehende Quecksilber oder stattdessen wie das Edelgas Radon verhalten würde, was relativistische Rechnungen vorhersagten. Um das zu klären, synthetisierten Forschungsgruppen auch einige schwere, instabile Isotope der beiden Vergleichselemente. Der Grund war, dass diese sich auf dieselbe Weise herstellen und untersuchen ließen wie Copernicium. Dadurch waren die Ergebnisse der Experimente besser miteinander vergleichbar, als wenn man die makroskopischen Eigenschaften der häufigeren natürlich vorkommenden Isotope herangezogen hätte.

Bei den Versuchen wurden die frisch synthetisierten Atome auf einer Oberfläche abgeschieden, die auf sehr niedrige Temperaturen abgekühlt und teils mit Gold, teils mit Eis beschichtet war. Wenn sich Copernicium wie Quecksilber verhielte, sollte es mit Gold ein Amalgam bilden. Gliche es eher dem Edelgas Radon, würde es sich stattdessen auf dem Eis niederschlagen. So einfach das Experiment klingt, lieferte es allerdings keine eindeutigen Resultate: Einzelne Laboren erhielten unterschiedliche Ergebnisse, weshalb die Frage weiterhin offen ist.

### Ein gasförmiges Edelmetall?

Bei Element 114, das 2012 den Namen Flerovium erhielt, scheinen sich die relativistischen Effekte dagegen wieder sehr drastisch zu zeigen: Obwohl es in der vierten Hauptgruppe steht und damit dem Blei gleichen sollte, verhält es sich nach ersten Experimenten offenbar eher wie ein Edelmetall. Außerdem ist es diesen Untersuchungen zufolge noch flüchtiger als Quecksilber und liegt bei Raumtemperatur sogar als Gas vor.

Sofern das Periodensystem weiterwächst, dürften die Neuzugänge genaueren Aufschluss über seine Gültigkeit bei superschweren Elementen geben. Praktische Bedeutung hat die Frage für die absehbare Zukunft allerdings nicht. Wenn die Vorhersagekraft bei den höchsten Ordnungszahlen schwin-

det, schmälert das die Nützlichkeit der restlichen Tabelle ja nicht. Und der typische Chemiker dürfte nie mit superschweren Elementen zu tun haben. Da die bisherigen Vertreter nur in winzigen Mengen herstellbar sind und meist in Sekundenbruchteilen schon wieder zerfallen, kann er mit ihnen nichts anfangen.

Allerdings ergibt sich aus dem Schalenmodell des Atomkerns, dass Elemente mit bestimmten »magischen« Zahlen von Protonen und Neutronen, die gefüllten Schalen entsprechen, besonders stabil sein sollten. Den ersten Hinweis auf eine solche Insel der Stabilität, die irgendwo zwischen der Ordnungszahl 114 und 126 vermutet wird, lieferte die Halbwertszeit des schon erwähnten Flerovium-189, das über 114 Protonen und 175 Neutronen verfügt. Sie ist mit immerhin 2,7 Sekunden ungewöhnlich groß. Das doppelt magische Isotop Flerovium-298 mit 184 Neutronen, das sich wie alle neutronenreichen Nuklide mit den herkömmlichen Kernverschmelzungsreaktionen bislang nicht herstellen ließ, sollte noch wesentlich stabiler sein. Ähnliches gilt für die Isotope Unbinilium-304 und Unbihexium-310 der noch unbekanntesten Elemente 120 und 126.

Das führt zu der allgemeineren Frage, wo die Liste der Elemente schließlich definitiv enden wird. Nach einhelliger Expertenmeinung können sich bei einer zu hohen Anzahl von Protonen nämlich keine Atomkerne mehr bilden, nicht einmal für einen flüchtigen Augenblick. Doch wo genau sich die Grenze befindet, darüber gehen die Ansichten auseinander. In Rechnungen mit einem punktförmigen Kern scheint sie bei Element 137 zu liegen. Andere Theoretiker kommen bei Abschätzungen, die das tatsächliche Kernvolumen berücksichtigen, auf eine Ordnungszahl von 172 oder 173 für das schwerstmögliche Element. Damit bliebe noch reichlich Raum für Neuentdeckungen und möglicherweise relativ stabile Kerne, deren Chemie sich untersuchen ließe. Spätestens bei ihnen dürfte die Stellung im Periodensystem dann wirklich keinerlei Rolle mehr spielen. ~

### DER AUTOR



**Eric Scerri** ist Chemiehistoriker und Wissenschaftsphilosoph an der University of California in Los Angeles. Er hat an der University of London promoviert und schon mehrere Bücher über das Periodensystem und die Entdeckung der schwersten Elemente verfasst. Das bislang letzte heißt »A Tale of Seven Elements« und ist 2013 erschienen.

### QUELLEN

**Pykkö, P.:** A Suggested Periodic Table up to  $Z = 172$ , Based on Dirac-Fock Calculations on Atoms and Ions. In: Physical Chemistry Chemical Physics 13, S. 161–168, 2011

**Scerri, E.:** A very Short Introduction to the Periodic Table. Oxford University Press, 2011

**Scerri, E.:** The Periodic Table, its Story and its Significance. Oxford University Press, 2007

Dieser Artikel im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1298020](http://www.spektrum.de/artikel/1298020)

# Schützt die NSA vor sich selbst!

In nie gekanntem Ausmaß sammeln Geheimdienste Informationen. In der allgemeinen Entrüstung gehen die technologischen Aspekte des Skandals unter. Wie gehen wir richtig mit riesigen Datenmengen um?

Von Alex »Sandy« Pentland

In den ersten Jahrzehnten ihres Bestehens hatte die National Security Agency (NSA) eine klar abgegrenzte Hauptaufgabe: die Sowjetunion im Auge zu behalten. Der Feind war eindeutig definiert, man wusste recht genau, wer dazugehörte und wer nicht, und die technischen Mittel beschränkten sich im Wesentlichen auf Spionageflugzeuge, versteckte Mikrofone (Wanzen) und das Abhören von Telefongesprächen.

Spätestens mit den Anschlägen des 11. September 2001 wurde alles ganz anders. An die Stelle eines identifizierbaren Hauptschurken war ein diffuses Netz aus einzelnen Terroristen getreten. Jeder Mensch auf der Welt war im Prinzip verdächtig und damit ein potenzielles Spionageziel. Zugleich musste sich das Handwerkszeug den neuen Kommunikationsmöglichkeiten anpassen. Dem rapide anschwellenden Datenverkehr über das Internet, vor allem mit mobilen Geräten, standen die klassischen Techniken hilflos gegenüber.

Daraufhin verschrieb sich die NSA einer neuen Strategie: alles sammeln. Keith Alexander, bis zum Frühjahr dieses

Jahres Direktor der Agency, hat das in einem viel zitierten Ausspruch so auf den Punkt gebracht: »Wer eine Nadel im Heuhaufen finden will, braucht den ganzen Heuhaufen.« Als Erstes sammelte die NSA Verbindungsdaten von praktisch jedem Telefongespräch innerhalb der USA, wenig später erfasste sie fast vollständig große Datenströme im Internet, aufgeschlüsselt nach Internetadressen außerhalb des eigenen Landes. Nach kurzer Zeit war der Datenstrom derart angeschwollen, dass alle zwei Stunden so viel Material zusammenkommt wie bei einer kompletten Volkszählung.

Diesen gigantischen Heuhaufen lagerte die NSA an der üblichen Stelle: in ihren eigenen, hoch gesicherten Anlagen – mit unbeabsichtigten Nebeneffekten. Für jeden NSA-Analysten waren die persönlichen Daten fast aller Erdbewohner nur einen Tastendruck entfernt. Obendrein hat sich die NSA durch die gewaltige Konzentration an Daten verwundbarer gemacht als je zuvor. Nur durch sie konnte ein externer Mitarbeiter der NSA namens Edward Snowden Tausende geheimer Dateien von einem Server in Hawaii herunterladen,



Die zahlreichen Kuppeln auf dem Luftwaffenstützpunkt Menwith Hill bei Harrowgate (North Yorkshire, England) enthalten die vermutlich größte Horchstation der NSA außerhalb der USA.

nach Hongkong fliegen und die Dokumente der Presse übergeben – aus Gewissensgründen.

Es ist nicht grundsätzlich illegitim, Daten über menschliches Verhalten zu sammeln. Regierungen und Industrieunternehmen sind zum Beispiel auf die Ergebnisse von Volkszählungen angewiesen. Aber dass eine Geheimorganisation Informationen über ganze Bevölkerungen anhäuft, in abgeschotteten Serverfarmen speichert und praktisch ohne jede Kontrolle verarbeitet, geht auch qualitativ über alles bisher Dagewesene hinaus. Kein Wunder, dass Snowdens Enthüllungen eine heftige öffentliche Debatte auslösten.

Bislang konzentrieren sich die Kommentare zu den Datensammelaktivitäten der NSA auf die politischen und die ethischen Aspekte. Die strukturelle und technische Seite der Sache ist dagegen weit weniger beachtet worden. Der regierungsamtliche Umgang mit großen Datenmengen (big data) ist nicht nur juristisch und politisch höchst problematisch, sondern auch unzweckmäßig. Darüber hinaus hinkt er dem technischen Fortschritt weit hinterher. Wie kann das Regierungshandeln mit der Technologie Schritt halten? Darauf gibt es keine einfache Antwort, aber immerhin ein paar elementare Prinzipien, die als Leitlinien dienen können.

### Schritt 1: Viele kleine Heuhaufen statt eines großen

Die Aussage von Keith Alexander ist sachlich falsch. Man braucht nicht den ganzen Heuhaufen, um die Nadel darin zu finden. Es genügt, wenn man jeden Teil desselben inspizieren kann. Daten massenhaft an einer einzigen Stelle zu speichern, ist nicht nur unnötig, sondern sogar gefährlich – für die Ausspäher wie für die Ausgespähten. Regierungen müssen mehr verheerende Lecks befürchten – und jeder Einzelne Verletzungen seiner Privatsphäre in beispiellosem Ausmaß.

Big Data ist in den Händen der Regierung viel zu stark konzentriert worden; das ist die Lehre aus den Snowden-Enthüllungen. Die NSA und vergleichbare Organisationen sollten große Datensammlungen jeweils bei der Organisation

belassen, die sie erstellt hat, unter deren Aufsicht und mit deren jeweils eigener Verschlüsselung. Daten verschiedener Art sollten räumlich getrennt gespeichert werden: Bankdaten in der einen Datenbank, Patientenakten in einer anderen und so weiter. Darüber hinaus sollten generell Informationen über Einzelpersonen getrennt von Daten anderer Art gespeichert und beaufsichtigt werden. Die NSA oder jede andere Stelle, die einen guten, legalen Grund vorweisen kann, wird nach wie vor jeden Teil dieses weit verstreuten Heuhaufens einsehen dürfen; sie wird nur nicht mehr den ganzen Haufen in einer einzigen Serverfarm verfügbar halten.

Dieses Ziel ist nicht einmal besonders schwer zu erreichen. Es genügt, wenn die Telefongesellschaften und die Internetanbieter ihre Daten ab einem gewissen Zeitpunkt nicht mehr herausrücken. Man muss die NSA nicht anweisen, das zu löschen, was sie in ihren Speichern hat (es wäre ohnehin kaum nachzuprüfen, ob sie es wirklich tut); denn schon nach wenigen Monaten sind derartige Daten nur noch von historischem Interesse, desgleichen die zugehörige Software.

Dass die NSA ihre Datensammelei aufgibt, scheint derzeit kaum vorstellbar – und sie wird es mit großer Sicherheit nur tun, wenn ein Gesetz oder eine Anordnung des amerikani-

#### AUF EINEN BLICK

##### DATENKRANKEN IN DIE SCHRANKEN WEISEN

- 1 Firmen und Behörden haben ein legitimes **Interesse an Daten** über menschliches Verhalten ebenso wie Einzelpersonen an der Erhaltung ihrer Privatsphäre.
- 2 Zwei Verfahren helfen gegen den **Missbrauch** großer Datenmengen: Daten nicht in einer einzigen großen Sammlung (»Heuhaufen«) zusammenführen; und überwachbare Protokolle zum Datenverkehr und zu Zugriffsberechtigungen etablieren.
- 3 Angesichts des rapiden technischen Fortschritts können alle derartigen **Maßnahmen nur vorläufig** sein.



ISTOCKPHOTO / KEVIN JAW WAKEFIELD

schen Präsidenten sie dazu zwingt –; aber es wäre in ihrem eigenen Interesse. Wahrscheinlich weiß die NSA das selbst; zumindest wurde sie von hoher Stelle auf ihre Verwundbarkeit hingewiesen. Auf dem letztjährigen Aspen Security Forum, einer hochrangig besetzten Sicherheitstagung, benannte Ashton B. Carter, damals stellvertretender Verteidigungsminister, die Gründe, warum Snowden überhaupt solche Mengen an Daten an die Öffentlichkeit bringen konnte. »Dieses Versagen geht auf zwei Praktiken zurück, die wir abschaffen müssen ... Eine sehr große Menge an Information war an einer einzigen Stelle konzentriert. Das ist ein Fehler.« Und zweitens »gab es eine Einzelperson, die sehr weit gehende Rechte hatte, diese Information abzurufen und zu transportieren. Das sollte auch nicht sein.« Datenbanken, die auf verschiedenen Computersystemen mit je eigener Verschlüsselung liegen, würden nicht nur eine Aktion wie die von Snowden enorm erschweren, sondern auch einen Angriff von außen. In jedem Fall würde eine Attacke allenfalls einen begrenzten Teil des gesamten Datenbestands treffen. Selbst autoritäre Regierungen sollten ein Interesse daran haben, ihre Daten in kleinen Portionen über das Land zu streuen; das erschwert Staatsstreich von Seiten des eigenen Regierungsapparats.

So weit die Perspektive der Regierung; aber wie kann die verstreute Lagerung von Daten die Privatsphäre des Einzelnen schützen? Die Antwort lautet: indem sie die Muster der Kommunikation zwischen Datenbanken und Abfragern sichtbar und nachverfolgbar macht. Jede Art der Datenanalyse, sei es die Suche nach einer Einzelperson oder eine statistische Auswertung, löst ein charakteristisches Muster von Anfragen an Datenbanken und deren Antworten aus. Diese »Signatur« kann ein Beobachter des Internetverkehrs erkennen und daraus zumindest gewisse Schlüsse ziehen – ohne über den Inhalt dieser Kommunikationen etwas zu erfahren.

Telefonverbindungsdaten werden gelegentlich als Metadaten bezeichnet: Daten über Daten, wobei die eigentlichen Daten, die Inhalte der Gespräche, im Verborgenen bleiben. Wenn also die NSA von ihren externen Partnern solche Metadaten über, sagen wir, eine namentlich benannte Person einholt, dann besteht das dadurch ausgelöste Frage-und-Antwort-Spiel aus »Metadaten über Metadaten«.

Eine Analogie mag hilfreich sein. In alten Zeiten, als Angehörige eines Betriebs noch auf echtem Papier schriftlich miteinander verkehrten, konnte das Muster der internen Kommunikation dem Büroboten auffallen, ohne dass er den Inhalt der internen Briefe kennen musste. Ähnliches gilt für jeden, der nur beobachtet, wer wem wann eine E-Mail schreibt. Wenn zum Beispiel ein Mensch im Personalbüro bemerkt, dass die Finanzbuchhaltung ungewöhnlich viele Daten über krankheitsbedingte Fehlzeiten abrufen kann er die Kollegen dort zur Rede stellen.

Wird in entsprechender Weise die Übermittlung großer Datenmengen übers Internet so organisiert, dass dabei Metadaten über Metadaten anfallen, bleibt das Treiben der NSA zumindest nicht unbemerkt. Telefongesellschaften können



»Computerspionage verboten«:

Es gibt Möglichkeiten zur Durchsetzung einer solchen Vorschrift.

nachvollziehen, nach wem sie ausgeforscht werden. Unabhängige Beobachter, insbesondere die Presse, würden mit Hilfe dieser Daten die Rolle eines Wachhunds der NSA übernehmen. Mit Metadaten über Metadaten kann man der NSA mit ihren eigenen Waffen begegnen.

### Schritt 2: Geschützte Verbindungen etablieren

Das Sammeln zu unterbinden, ist die eine Maßnahme zur Rettung der Privatsphäre in der allgemeinen Datenflut. Gar nicht erst Gelegenheit zum Sammeln zu geben, lautet die andere, und die ist nicht weniger wichtig. Es geht darum, unsere persönlichen Informationen im Speicher und bei der Übertragung durch Verschlüsselung abzusichern. Ohne einen derartigen Schutz lassen sich Daten mit Leichtigkeit absaugen, ohne dass jemand es merkt. Das gilt umso mehr, als wir verstärkt mit kriminellen oder sogar militärisch ausgeführten Attacken im Internet zu rechnen haben.

Jeder, der mit persönlichen Daten umgeht – der Inhaber selbst, eine Behörde oder eine private Firma –, sollte einige elementare Sicherheitsregeln befolgen. Ein Datenaustausch darf nur zwischen Systemen mit vergleichbaren Sicherheitsstandards stattfinden. Jede Datenübertragung muss verlässliche Absender- und Empfängererkennungen enthalten, so dass man Start und Ziel jedes Datenpakets nachvollziehen kann. Es muss möglich sein, diese Metadaten zu überwachen und bei Auffälligkeiten beim Verursacher nachzuforschen, ähnlich wie schon heute spezialisierte Software zur Betrugsbekämpfung alle Kreditkartentransaktionen nachverfolgt.

Ein erfolgreiches Beispiel sind die so genannten Vertrauensnetze (trust networks). Die in einem solchen Netz zusammengeschlossenen Computer versehen jedes Stück Daten mit einer Nutzungsberechtigung und prüfen diese Berechtigung jedes Mal nach, wenn jemand darauf zugreifen will. Dabei ist gesetzlich festgelegt, was mit den Daten getan wer-

den darf und was nicht – und welche Folgen eine Missachtung dieser Vorschriften hat. Indem das Netz über die Herkunft jeder Datei und die Legitimation des Anfordernden Buch führt – und diese Buchführung gegen Manipulationen absichert –, ist jederzeit von außen und per Software überprüfbar, ob die Vorschriften eingehalten wurden.

Langlebige Vertrauensnetze haben erwiesen, dass das Konzept sicher und robust ist. Das bekannteste Beispiel ist das Netz der Society for Worldwide Interbank Financial Telecommunication (SWIFT), mit deren Hilfe einige zehntausend Banken und andere Institutionen ihren internationalen Zahlungsverkehr abwickeln. Bemerkenswerterweise hat es nie einen kriminellen Einbruch in das SWIFT-Netz gegeben (jedenfalls soweit wir wissen). Allerdings hat die Struktur des SWIFT-Netzes seine Betreiber nicht daran gehindert, im Gefolge des 11. September Überweisungsdaten freiwillig an amerikanische Behörden herauszugeben.

Der Serienbankräuber Willie Sutton (1901–1980), berühmt geworden für die überaus fantasievolle Ausführung seiner Verbrechen, soll auf die Frage, warum er Banken ausgeraubt habe, die sprichwörtlich gewordene Antwort gegeben haben: »Weil da das Geld ist.« Heute ist das Geld bei SWIFT. Das Netz bewegt täglich Geldbeträge in Billionenhöhe. Dank seiner eingebauten Metadaten-Überwachung, automatischer Überprüfungssysteme und strenger Haftungsregeln hat es nicht nur die Bankräuber ferngehalten, sondern stellt auch jeden Tag aufs Neue sicher, dass das Geld an der vorgesehenen Stelle ankommt.

Durch die sinkenden Preise für Rechenleistung sind die einst komplexen und teuren Vertrauensnetze mittlerweile in der Reichweite von kleineren Organisationen oder sogar Privatleuten. Meine Forschungsgruppe am Massachusetts Institute of Technology hat gemeinsam mit dem gemeinnützigen Institute for Data Driven Design in Boston ein Vertrauensnetz für Verbraucher namens openPDS (open Personal Data Store) entwickelt. Hinter der Software, die wir zusammen mit etlichen Partnern aus Industrie und Verwaltung testen, steckt die Idee, Datensicherheit in der Qualität von SWIFT zu demokratisieren, so dass Firmen, Behörden und Einzelpersonen unbedenklich höchstpersönliche Informationen austauschen können, bis hin zu Bank- und Patientendaten. Regierungen einzelner Bundesstaaten erproben diese Architektur sowohl für den internen Datenverkehr als auch für Analysen durch externe Firmen. Sobald Vertrauensnetze größere Verbreitung und damit größere Akzeptanz finden, wird jeder Einzelne seine Daten an Organisationen weiterreichen können, ohne massenhaftes Abzapfen oder eine andere Art von Missbrauch fürchten zu müssen.

### Schritt 3: Nie das Experimentieren aufgeben

Der letzte und vielleicht wichtigste Punkt ist das Eingeständnis, dass wir nicht alle Antworten haben. Mehr noch: Die eine, endgültige Antwort gibt es nicht. Wir wissen nur eines mit Sicherheit: Sowie sich die Technologie wandelt, müssen dies auch die Regelwerke tun. Das gegenwärtige digitale Zeit-

alter ist etwas vollkommen Neues; da hilft es nichts, sich auf die Tradition oder derzeit gültige Verfahren zu berufen. Vielmehr müssen wir ständig neue Ideen in der echten Welt erproben, um – vielleicht – eine zu finden, die funktioniert.

Auf den Druck ausländischer Regierungen, der eigenen Bürger und der Internetfirmen hin hat das Weiße Haus dem Sammeleifer der NSA bereits gewisse Grenzen gesetzt. Mit dem Ziel, verlorenes Vertrauen wiederaufzubauen, versuchen Suchmaschinenanbieter wie Google gerichtlich die Erlaubnis zu erstreiten, Suchanfragen der NSA zu veröffentlichen – Metadaten über Metadaten. Am 22. Mai hat das Repräsentantenhaus das Gesetz »USA Freedom Act« verabschiedet. Es verbietet die massenhafte Erfassung von Telefon- und Internetverbindungsdaten durch die Regierung, erlaubt den Telekommunikationsanbietern, zumindest die Anzahl der an die NSA übermittelten Datensätze zu veröffentlichen, und schreibt den Geheimdiensten vor, die Anzahl der empfangenen Datensätze zu melden. Die Beratung in der zweiten Parlamentskammer, dem Senat, steht zum Zeitpunkt der Drucklegung noch aus.

Das sind alles Schritte in die richtige Richtung. Aber ebenso wie alles, was wir jetzt tun könnten, handelt es sich nur um sehr vorläufige Reparaturen für ein langlebiges Problem. Die Innovation im Regierungshandeln muss mit dem technischen Fortschritt Schritt halten – eine sehr anspruchsvolle Aufgabe. Am Ende wird dem Staat nicht anderes übrig bleiben, als ständig herumzuexperimentieren: in kleinen Projekten zu erproben, was funktioniert, und hinterher die Spreu vom Weizen zu trennen. ~

#### DER AUTOR



**Alex »Sandy« Pentland** ist Chef des Human Dynamics Laboratory am Massachusetts Institute of Technology und einer der Leiter der Initiativen des Weltwirtschaftsforums zu den Themen »big data« und »personal data«. Seine Forschungen befassen sich sowohl mit allgegenwärtigen Computern in der persönlichen Umgebung (siehe seinen Artikel »Intelligente Zimmer« in Spektrum der Wissenschaft 6/1996, S. 44) als auch mit den Bedrohungen der Privatsphäre durch massives Datensammeln.

#### LITERATURTIPP

**Pentland, A.:** Social Physics. How Good Ideas Spread – the Lessons from a New Science. Penguin Press, 2014  
*Ein weiteres Hauptarbeitsgebiet des Autors: physikalische Modelle für die Soziologie*

#### WEBLINKS

Personal Data: The Emergence of a New Asset Class. World Economic Forum, Januar 2011  
[www.weforum.org/reports/personal-data-emergence-new-asset-class](http://www.weforum.org/reports/personal-data-emergence-new-asset-class)

Diesen Artikel und weiterführende Informationen finden Sie im Internet: [www.spektrum.de/artikel/1257687](http://www.spektrum.de/artikel/1257687)



Verena Winiwarter, Hans-Rudolf Bork

**Geschichte unserer Umwelt**

**Sechzig Reisen durch die Zeit**

Primus, Darmstadt 2014

192 S., € 39,95

ÖKOLOGIE

## Riskantes Spiel mit der Umwelt

Seit es Menschen gibt, verändern sie ihre Umgebung – was manchmal zu unkontrollierbaren Entwicklungen führt.

Es muss ein entsetzlicher Anblick gewesen sein, wenn der Cuyahoga River in Cleveland (USA) wieder einmal in Flammen stand. Der Fluss wurde seit dem 19. Jahrhundert so stark durch Öl und Industrieabfälle verschmutzt, dass sich auf seiner Oberfläche immer wieder brennbare Schichten bildeten. Doch erst der Brand von 1969, über den das Nachrichtenmagazin »Time« berichtete, schreckte die Öffentlichkeit auf – wohl auch deshalb, weil sich die Region damals bereits im industriellen Niedergang befand. In den Jahrzehnten zuvor, als die Industrie noch florierte, drangen die wiederkehrenden Feuer nicht ins kollektive Bewusstsein, schreiben Verena Winiwarter und Hans-Rudolf Bork – denn die öffentliche Wahrnehmung sei stets interessengeleitet. Winiwarter ist Professorin für Umweltgeschichte an der Universität Klagenfurt; Bork arbeitet als Professor für Ökosystemforschung an der Universität Kiel.

Reaktorunfälle, Havarien von Bohrinseln und Tankern, der weltweite Rückgang der biologischen Artenvielfalt und natürlich die Veränderung des Klimas zeigen: Heute sind die ökologischen Risiken nicht kleiner geworden. Ein Teil des Problems liegt darin, dass die Weltbevölkerung inzwischen auf über sieben Milliarden Menschen angewachsen ist – so viele wie nie zuvor. Winiwarter und Bork durchleuchten diese Entwicklung und hinterfragen, welche Gefahren sie birgt. Anhand von 60 Beispielen aus der Geschichte berichten sie von den Wech-

selwirkungen zwischen Mensch und Natur und zeigen, wann und wo ökologische »Risikospiralen« drohen. So bezeichnen die Autoren es, wenn zunächst erfolgreiche menschliche Eingriffe in die Natur – die etwa vor den Gefahren von Naturgewalten schützen – unerwartete Nebenwirkungen zeitigen, die weitere Eingriffe notwendig machen.

So führen die Autoren das Leben an der Nordseeküste an, wo die Sturmfluten den Bewohnern umfangreiche Schutzmaßnahmen abverlangen. Durch Errichten von Deichen gelang es zwar, das Meer zu bändigen – allerdings um den Preis, dass Pufferflächen verschwanden, die das Wasser zuvor überschwemmen konnte, wodurch die Fluten in Flussmündungen nun stärker ausfallen als zuvor. Auch führten Versuche, dem Meer durch Trockenlegungen Siedlungsraum abzugewinnen, oft zum Absinken des Lands und zur Gefahr schwerer Überschwemmungen.

Ein drastisches Beispiel dafür, wie verheerend sich das Einschleppen nichtheimischer Arten auswirken kann, bietet Australien. Europäische Siedler setzten hier im 19. Jahrhundert Kaninchen aus, um sie zu jagen. Mangels natürlicher Feinde vermehrten sich die Tiere so stark, dass selbst der massenhafte Abschuss die Population nicht mehr ernsthaft dezimieren konnte. Füchse, die ebenfalls für die Jagd eingesetzt wurden, fressen Kaninchen zwar, stellen aber auch für heimische Arten eine Gefahr dar. Zur Plage wurde weiterhin die giftige Aga-Kröte, die man einst auf dem Kontinent ansiedelte, um den Zuckerrohrkäfer *Lepidoderma albobirtum* zu bekämpfen.

Indien wiederum gibt ein Exempel dafür ab, welche ökologischen Probleme aus dem Kolonialismus resultieren konnten. Hier verschärften die Briten im 19. Jahrhundert die Besteuerung der Bauern. Daraufhin drohte diesen die Verschuldung, weshalb sie nur noch Pflanzen anbauten, die höchste Erträge versprachen. Auch suchten sie die Anbaufläche zu vergrößern, indem sie Waldflächen rodeten, was den Nährstoff- und Wasserhaushalt der Böden negativ beeinflusste. Der Grundwasserspiegel sank, und die einstmals fruchtbare Landschaft verödete.

Die Autoren gehen auf zahlreiche weitere Beispiele ein, etwa das Schrumpfen des Aralsees durch unbedachte Wasserentnahme aus den Flüssen Amudarja und Syrdarya oder den flächendeckenden Herbizideinsatz im Vietnamkrieg und seine ökologischen Folgen. Ihr Buch präsentiert sich überzeugend,



Die giftige Aga-Kröte hat mehrere Tierarten in Australien drastisch dezimiert.

DREAMSTIME / PUPPI ZELENENNY



kompakt und allgemein verständlich. Mehr als 200 Abbildungen, Grafiken und Karten veranschaulichen den Text, Infokästen vermitteln Detailwissen. Als nützliche Hilfen erweisen sich das ausführliche Inhaltsverzeichnis, das umfangreiche Register sowie die Weltkarten, auf denen die im Buch behandelten Regionen gekennzeichnet sind.

Es bleibt die Frage, wie die aus der Geschichte gewonnenen Erfahrungen dazu dienen können, ökologische Katastrophen künftig zu vermeiden. Winiwarter und Bork leiten daraus eine Um-

weltethik ab, der zufolge natürliche Ökosysteme als höchst fragil gelten müssen. Durch entsprechend behutsame menschliche Eingriffe, so die Autoren, ließe sich die Gefahr von Risikospiralen mindern. Keinesfalls sollte das Bewusstsein von ökologischen, gesellschaftspolitischen und wirtschaftlichen Zusammenhängen nur auf so genanntem »Expertenwissen« basieren. Denn dieses werde durch Auftraggeber und Eigeninteressen gelenkt oder sei – bei Wissenschaftlern – sehr speziell. Die Autoren plädieren für die Berücksichti-

gung möglichst aller Wissensaspekte zu einem Thema, also das Einbeziehen einer großen Zahl von Personen, die Wissen und Erfahrungen zu einem Problem beisteuern können. Das schließt etwa indigene Bevölkerungsgruppen ein. Auch sprechen sich Winiwarter und Bork dafür aus, einen »Rat für nachhaltige Entwicklung« zu schaffen, vergleichbar dem UN-Sicherheitsrat.

---

**Martin Schneider**

Der Rezensent ist Wissenschaftshistoriker und Dozent in der Erwachsenenbildung.



Wolfgang Kundt, Ole Marggraf

**Physikalische Mythen auf dem Prüfstand**

Eine Sammlung begründeter Alternativtheorien

von Geophysik über Kosmologie bis Teilchenphysik

Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg 2014

445 S., € 79,99

## ALTERNATIVTHEORIEN

# Ewige Wahrheiten gibt es nicht

Der Astrophysiker Wolfgang Kundt stellt naturwissenschaftliche Außenseiterhypothesen vor und geht dabei weit über sein Fachgebiet hinaus. Seine Ansätze sind aber solide begründet und oft diskussionswürdig.

Auf den ersten Blick ist das ein unmögliches Buch. Wie kann ein Einzelner es wagen, zu praktisch allen Fachgebieten – von der Geophysik bis zur Kosmologie, von der Biologie bis zur Interpretation der Quantentheorie – eigene Ideen zu präsentieren, die dem naturwissenschaftlichen Mainstream widersprechen? Die Ära der Universalgelehrten vom Schlag Leonardo da Vinci (1452–1519) ist doch längst Geschichte. Moderne Naturforschung wird von hoch spezialisierten Teams betrieben, die oft nicht einmal die Arbeiten von Kollegen innerhalb ihres engeren Fachbereichs beurteilen können. Also liegt der simple Schluss nahe: Kundt spinnt.

Bei näherer Betrachtung erweist sich das Urteil aber als vorschnell. Wer sich auf einzelne Kapitel einlässt, begegnet

einer naturwissenschaftlich begründeten Argumentation, welche die jeweils vorherrschende Lehrmeinung in Zweifel zieht und alternative Erklärungen vorstellt. In keinem einzigen Fall muten Kundts Überlegungen pseudowissenschaftlich an; allerdings beruft er sich oft auf Arbeiten anderer, die heute wenig Beachtung finden.

Damit ist Wolfgang Kundt der interessante Fall eines ernst zu nehmenden Forschers, der als – mittlerweile emeritierter – Physikprofessor der Universität Bonn zahlreiche Fachpublikationen im Bereich Astrophysik vorweisen kann, es sich aber in den Kopf gesetzt hat, den wissenschaftlichen Mainstream vielfach in Frage zu stellen. Dabei assistiert ihm sein Fachkollege Ole Marggraf als Koautor.

Wegen der fortgeschrittenen Spezialisierung heutiger Wissenschaftler ist es allerdings für einen Rezensenten praktisch unmöglich, jeden der 85 (!) Alternativvorschläge inhaltlich zu bewerten. Darum hier nur die folgenden drei Stichproben.

Mit einer Alternativtheorie zum so genannten Tunguska-Ereignis hat Kundt unter Geophysikern Zustimmung gefunden. Die große Explosion in Sibirien anno 1908 wird für gewöhnlich einem Asteroideneinschlag zugeschrieben. Kundt greift einen früheren Erklärungsversuch sowjetischer Wissenschaftler auf und begründet, warum es sich eher um ein tektonisches Ereignis gehandelt haben könnte, nämlich um einen starken Erdgasausbruch.

Von Schwarzen Löchern hält Kundt offensichtlich nicht viel. Er bezweifelt, dass sich im Zentrum der Milchstraße und anderer Galaxien ein supermassereiches Schwarzes Loch aufhält. Stattdessen vermutet er dort bloß eine extrem heiße Materiescheibe, für deren Existenz er nicht weniger als 15 Gründe anführt. Dass diese tatsächlich die Existenz eines Schwarzen Lochs bündig widerlegen, davon bin ich nicht überzeugt, zumal der stärkste Grund für dessen Vorhandensein doch wohl bestehen bleibt: Eine derart hohe Masse auf so kleinem Raum kann keine ausgedehnte Scheibe sein.

Sogar das kosmologische Standardmodell zieht Kundt in Zweifel. Er hält den Urknall keineswegs für eine ausge-



Axel Bojanowski

**Die Erde hat ein Leck und andere rätselhafte Phänomene unseres Planeten**

DVA, München 2014. 186 S., € 16,99

In seinem neuen Buch greift Wissenschaftsjournalist Axel Bojanowski spannende Themen aus den Geowissenschaften auf und präsentiert in 37 kurzen Kapiteln ein breites Spektrum an Forschungsergebnissen. Leicht verständlich, populär und unterhaltsam berichtet er von Mikroben tief in der Erdkruste, erzählt über außergewöhnliche, vom Wind verursachte Tsunamis oder über versinkende Kontinente. Fesselnd leitet er von Kapitel zu Kapitel über, so dass sich das Buch in einem Schwung lesen lässt. Ganz ohne Drama kommt Bojanowski dabei allerdings nicht aus, und so macht er Blitze zu »unterschätzten Starkstromfackeln«, warnt vor dem Ausbruch von »Supervulkanen« oder lässt »Feuerraketen« aus dem Boden schießen. Solche Bilder sind zwar nicht aus der Luft gegriffen, wie der Autor überzeugend belegt, muten aber für manchen Geschmack wohl etwas überspitzt an. Nichtsdestoweniger ist das Buch interessant und bietet Lesern, die nicht vom Fach sind, sicher auch die eine oder andere Überraschung.

TIM HAARMANN



Michael Brooks

**Freie Radikale – Warum Wissenschaftler sich nicht an Regeln halten**

Aus dem Englischen von Carl Freytag. Springer Spektrum, Berlin und Heidelberg 2014. 398 S., € 19,99

Forscher sind auch nur Menschen, lautet die Botschaft dieses Buchs. Sie verlassen sich auf Intuition statt auf Argumente, hegen gefährliche Leidenschaften, betrügen und tragen persönliche Grabenkämpfe aus. Der Autor vertritt jedoch die These, dass diese »wissenschaftliche Anarchie«, wie er sie nennt, dem Erkenntnisgewinn nützt. Er belegt das am Beispiel zahlreicher bedeutender Wissenschaftler; viele von ihnen hat er interviewt und überdies zahlreiche Studien ausgewertet. Gerade die am meisten herausragenden Ergebnisse, so sein Fazit, würden oft durch unorthodoxes Verhalten erzielt. Um den Leser auf diese Erkenntnis zu stoßen, hätten wohl auch weniger Seiten genügt. Dennoch bleibt die Lektüre auf Grund des gut lesbaren Schreibstils und abwechslungsreicher Anekdoten durchweg interessant. In manchen Kapiteln allerdings häufen sich Grammatik- und Rechtschreibfehler.

FENJA SCHMIDT



John Haywood

**Wikinger – Der ultimative Karriereführer**

Aus dem Englischen von Jörg Fündling. Primus, Darmstadt 2014. 232 S., € 19,95

Die Wikinger kommen! Dieser Spruch lockt heute Massen in die Museen – im frühen Mittelalter sorgte er für Angst und Schrecken. Schließlich kündete er vom Herannahen raubender und mordender Horden. In seinem unterhaltsamen, nicht ganz ernst gemeinten »Karriereführer« schreibt Wissenschaftsautor John Haywood, was man tun muss, um als ruhmreicher Wikingerkrieger zu bestehen. Dabei verknüpft er archäologische Erkenntnisse mit modernen Rekonstruktionen. Er konfrontiert seine Leser mit der Gedankenwelt der Nordmänner und gibt praktische Tipps – etwa, wie man ein Schwert bekommt und was man damit anstellen kann. Doch preist er nicht nur die Verlockungen erfolgreicher Raubzüge, sondern warnt auch vor den Fallstricken des Wikingerdaseins. So gehörte es zum Selbstverständnis der Krieger, Bier und Met in Unmaßen zu trinken. Allein der damit verbundene Alkoholkonsum würde bei den meisten heute Lebenden eine erfolgreiche Wikingerkarriere verhindern. Haywood gelingt es, ein fundiertes und zugleich lebendiges Bild der Nordmänner zu zeichnen.

THOMAS BROCK



Veiko Krauß

**Gene, Zufall, Selektion – Populäre Vorstellungen zur Evolution und der Stand des Wissens**

Springer Spektrum, Berlin und Heidelberg 2014. 204 S., € 24,99

Der Genetiker und Evolutionsbiologe Veiko Krauß befasst sich mit Schlüsselkonzepten der Evolutionstheorie. Er erläutert die Begriffe »Gen« und »Fitness«, stellt Mutationen als treibende Kraft der Evolution dar und zeigt, warum Selektion und genetische Drift zwar unvermeidbare Faktoren der Evolution, aber nicht ihre Ursachen sind. Dabei entlarvt er zahlreiche verbreitete Vorstellungen als unzutreffend, etwa die von »egoistischen Genen«. Zudem geht er auf die – keineswegs beendete – Evolution des Menschen ein. Das Buch vermittelt profundes Wissen und umreißt die schwierige Materie sehr gut. Besonders interessant sind die Abschnitte über springende Gensequenzen. Allerdings ist der Text sehr fachnah und alles andere als leicht zu verstehen.

FRANK SCHUBERT

machte Sache und bezweifelt, dass die kosmische Hintergrundstrahlung tatsächlich als dessen Nachglühen zu deuten sei. Damit freilich bewegt er sich weit außerhalb des Mainstreams und sympathisiert mit Minderheitenpositionen, die er mit dem Standardmodell auf eine Stufe stellt.

So spaziert dieser skeptische Einzelgänger an den Rändern des heutigen Weltbilds entlang und bleibt andächtig

an dem einen oder anderen Denkmal stehen, das an fast vergessene Hypothesen gemahnt. Auf diese Weise erinnert er daran, dass auch ein etabliertes Weltmodell nicht der Weisheit letzter Schluss sein muss. Ewige Wahrheiten gibt es in der Naturforschung nicht.

**Michael Springer**

Der Rezensent ist Physiker und ständiger Mitarbeiter bei »Spektrum der Wissenschaft«.



Karl-Ludwig Kley

### **Deutschland braucht Chemie**

*Warum Wachstum und Wohlstand nur mit einer starken Chemieindustrie machbar sind*

DVA, München 2014

144 S., € 16,99

CHEMISCHE INDUSTRIE

## Vertrauen wiedergewinnen

**Wir müssen weg vom Vorurteil der »bösen Chemie«, ist der Autor dieses Buchs überzeugt.**

Deutschland exportiert mehr chemische Güter als jedes andere Land, und seine Chemieindustrie belegt mit einem Umsatz von 188 Milliarden Euro (2013) den Spitzenplatz in Europa. Die Branche bietet mehr als 430000 Menschen Arbeit und gehört zu den forschungstärksten Industriezweigen – gaben heimische Chemieunternehmen 2012 doch knapp zehn Milliarden Euro für Forschung und Entwicklung aus. Jedes sechste Chemiepatent wird in Deutschland angemeldet, und bereits 28-mal erhielten deutsche Forscher den Chemienobelpreis – zuletzt Gerhard Ertl im Jahr 2007 für seine Studien zu chemischen Verfahren auf festen Oberflächen. Ob Aspirin, Ammoniaksynthese, Mineräldünger, Backpulver, Kohleverflüssigung, Polymerchemie oder Flüssigkristalle: Chemie aus Deutschland verändert seit 200 Jahren die Welt. So ließe sich ohne die bahnbrechende Erfindung des Haber-Bosch-Verfahrens

die Weltbevölkerung heute überhaupt nicht ernähren.

Trotzdem misstrauen viele Menschen der Chemie. Denn Katastrophen brennen sich nachhaltiger in die Erinnerung ein als die Segnungen einer Technologie. Ereignisse wie der Dioxin-Unfall im italienischen Seveso 1976, die Chemiekatastrophe im indischen Bhopal 1984 oder der Sandoz-Großbrand 1986 in der Schweiz haben ihre Spuren im kollektiven Gedächtnis der Menschen hinterlassen. Noch im Jahr 2008 assoziierten mehr als ein Drittel der Befragten in einer Studie den Begriff »Chemie« mit dem Wort »Unfall«. Derart zerstörtes Vertrauen ist nur schwer zurückzugewinnen.

Genau darum bemüht sich Karl-Ludwig Kley in diesem Buch. Er plädiert dafür, die Chemiebranche nicht pauschal zu verdammen. Dabei äußert er sich als direkt Beteiligter: Kley ist seit April 2007 Vorstandschef der Darmstädter



# GEHIRN UND GEIST



Katja Gaschler, Anna Buchheim (Hrsg.)

## **Kinder brauchen Nähe**

**Sichere Bindungen aufbauen und erhalten**

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. Dabei ist eine sichere Bindung 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“ vertiefte Einblicke in Themen wie kindliche Schlafprobleme, Schreibabys, Trotzverhalten und Scheidungskinder. Pädagogen, Psychologen und Psychotherapeuten zeigen in wissenschaftlich fundierten und gleichzeitig unterhaltsamen Beiträgen, wie prägend die Qualität der Bindungen eines Kindes für seine Entwicklung ist.

2012. 160 Seiten, 27 Abb., kart.  
€ 19,99 (D) / € 20,60 (A)  
ISBN 978-3-7945-2872-1

**Jetzt bestellen!**

Internet: [www.schattauer.de/shop](http://www.schattauer.de/shop)  
E-Mail: [order@schattauer-shop.de](mailto:order@schattauer-shop.de)



Chemiefirma Merck, dem Weltmarktführer für Flüssigkristalle, zudem amtiert er seit 2012 als Präsident des Verbands der Chemischen Industrie. Wie man bereits am Titel des Buchs ablesen kann, gelingt es ihm nicht immer, diese Rollen abzuschütteln. Manchmal betreibt er offensichtlich Verbands- und Industriepolitik, beispielsweise wenn er fordert, man solle die Wirtschaft den Markt gestalten lassen.

Zwar fordert Kley offene Debatten über Chancen und Risiken verschiedener Techniken, etwa der Einführung gentechnisch veränderter Pflanzen oder Tiere in Deutschland, der unterirdischen Speicherung von Kohlendioxid oder der Förderung von Schiefergas. Er scheint sich aber nur schwer damit abfinden zu können, wenn eine Mehrheit gegen die Einführung dieser Techniken votiert, weil sie gravierende Umweltschäden fürchten lassen. Auch die begrenzte Verfügbarkeit von Rohstoffen unterschlägt er meines Erachtens allzu geflissentlich.

Andererseits ist sein Appell, doch bitte einen sachlicheren Blick auf das

MEHR WISSEN BEI **Spektrum.de**



Mehr Rezensionen finden Sie unter:  
[www.spektrum.de/rezensionen](http://www.spektrum.de/rezensionen)

Fachgebiet Chemie zu werfen, zu loben. Wie andere Wissenschaften braucht auch die Chemie eine Kultur der Offenheit und des Vertrauens. Zu Recht bemängelt Kley, die Industrie werde als etwas Unnatürliches wahrgenommen. Dabei ignorierten viele, dass die Natur selbst pure Chemie ist. Er verweist darauf, dass Kochen und Backen zu den vermutlich ältesten chemischen Arbeiten gehören und die Küche ein regel-

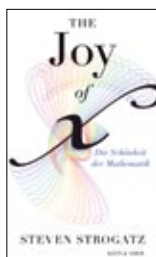
rechtes Chemielabor ist. Jede lebende Zelle sei eine kleine biochemische Fabrik und unser Erbmolekül, die DNA, nichts anderes als eine Chemikalie.

In der deutschen Chemieindustrie habe zudem ein Umdenken eingesetzt, betont Kley. Die Zahl der Chemieunfälle in deutschen Unternehmen sei kontinuierlich zurückgegangen. Und habe es in den 1960er Jahren im Rhein noch dramatische Fischsterben gegeben, geziehen dort nun wieder Lachse.

Ohne die Chemieindustrie und -forschung, so schreibt der Autor, wäre Deutschland schwerlich zu einer führenden Industrienation aufgestiegen. Bei der Frage, wohin das Land künftig steuern soll, führe daher kein Weg an der Chemiebranche vorbei. Was wir deshalb brauchten, sei die Abkehr vom pauschalen Freund-Feind-Denken. Dafür möchte er mit seinem Buch den Weg bereiten.

#### Gerhard Samulat

Der Rezensent ist Diplomphysiker und Journalist für Wissenschaft und Technik in Wiesbaden.



Steven Strogatz

#### **The Joy of x**

#### **Die Schönheit der Mathematik**

Aus dem Englischen von Susanne Kuhlmann-Krieg

Kein & Aber, Zürich und Berlin 2014

336 S., € 24,90

#### MATHEMATIK

## Plädoyer in eigener Sache

Der Mathematiker Steven Strogatz versucht zu erklären, warum sein Fachgebiet schön und nützlich ist.

In den zurückliegenden Jahren sind zahlreiche Bücher veröffentlicht worden, die das Ziel verfolgen, Mathematik populärer zu machen. Das vorliegende Werk schließt sich dem an. Der Autor ist Professor für angewandte Mathematik an der Cornell University (New York). Im Jahr 2010 verfasste er für die »New

York Times« 15 Beiträge, in denen er für mehr Freude an der Mathematik warb. »The Joy of x« versammelt und ergänzt diese Beiträge. Die englische Originalausgabe erschien 2012 und jetzt nun auch die deutsche Übersetzung. Strogatz erhielt für sein Buch den Euler-Book-Prize 2014 der Mathematical As-

sociation of America (MAA), was den Umsatz sicher fördern wird. Erfreulicherweise ist mit dem Kauf des Bands die Lizenz zum kostenlosen Herunterladen der E-Book-Version verbunden.

Der Verlag wirbt auf der Umschlagseite mit einem Zitat von Ranga Yogeshwar: »Nach der Lektüre von »The Joy of x« werden Sie eine neue Lust entdecken!« Das mag im Einzelfall zutreffen, aber sicher nicht bei allen Lesern. So können mathematisch Vorgebildete dem Werk nur wenig Neues entnehmen, auch wenn die zahlreichen Literaturhinweise und Links mit fast 60 Seiten Umfang sehr üppig ausfallen.

Die spannendsten Beiträge sind jene, die auf dem rückseitigen Umschlag in Frageform angekündigt werden: Wie dreht man am klügsten seine Matratze? Nach wie vielen Dates sollte man sich entscheiden? Wie schafft man es im Google-Ranking nach ganz vorne? Was war der Grund für die Heftigkeit des Ersten Weltkriegs?

Strogatz strahlt durchgehend Begeisterung für sein Fach aus und versucht so, die Aufmerksamkeit seiner Leser einzufangen. Der Übersetzerin ist ein gut lesbarer Text gelungen, der den Stoff korrekt vermittelt – abgesehen von einem Fehlgriff, nämlich der Verwechslung von »Kehrwertbildung« mit »Umkehrfunktion«. Die Ersetzung des im Deutschen jedermann verständlichen Worts »Quadratzahlen« durch »perfekte Quadratzahlen« (im Original vermutlich »perfect squares«) irritiert allerdings ein wenig.

Das Werk umfasst 30 nahezu unabhängig voneinander lesbare, etwa gleich lange Artikel. Sie sind sechs Oberthemen zugeordnet: Zahlen, Beziehungen, Formen, Veränderliches, Daten, Grenzgänger. Zahlreiche Grafiken fördern das Verständnis, allerdings sind sie nur schwarz-weiß. Spätestens beim Thema Fraktale vermisst man farbige Abbildungen.

Der Autor bemüht sich darum, den Lesern einen praktischen Nutzen zu vermitteln. So widmet er sich im Beitrag »Lust auf x« der Verwendung von Variablen, erklärt einen Kopfrechentrick für Quadratzahlen und verdeutlicht mit Hilfe der Gleichung  $(1-x) \cdot (1+x) = 1-x^2$ , warum ein Verlust von 50 Prozent und

ein anschließender Gewinn von 50 Prozent insgesamt einen Verlust von 25 Prozent ergeben. Ein anderer Beitrag befasst sich mit dem Lösen der quadratischen Gleichung  $ax^2 + bx + c = 0$  und erläutert hierbei den genialen Ansatz des choresmischen Mathematikers Abu Jafar Mohammed ibn Musa Al-Khwarizmi (8./9. Jahrhundert), des Vaters der Algebra.

Mitunter erweisen sich Strogatz' Ausführungen aber als wenig greifbar – etwa, wenn er in die Welt der komplexen Zahlen einführt. Hier demonstriert er, dass die Multiplikation mit der imaginären Einheit  $i$  eine Drehung um 90 Grad in der Zahlenebene bewirkt, und setzt dann mit folgendem Absatz fort:

»Aus genau diesem Grund haben Elektroingenieure ein Faible für komplexe Zahlen. Über eine Möglichkeit zu verfügen, eine Rotation um 90° derart kompakt darzustellen, ist höchst nützlich, wenn man mit Wechselströmen und -spannungen oder mit elektrischen und magnetischen Feldern arbeitet, denn hierbei hat man es oftmals mit Schwingungen oder Wellen zu tun, die um einen Viertelkreis (sprich 90°) phasenverschoben sind. Ja, komplexe Zahlen sind für alle Ingenieure unentbehr-

lich. In der Luftfahrt haben sie die ersten Berechnungen zum Auftrieb eines Flugzeugflügels ermöglicht. Hoch- und Tiefbauingenieure oder Maschinenbauer verwenden sie routinemäßig, um das Schwingungsverhalten von Überführungen, Hochhäusern oder von Autos zu berechnen, die über unebene Straßen holpern.«

Das mag beeindruckend klingen, hilft den meisten Lesern aber nicht wirklich weiter. Auch der Hinweis, dass man beim Lösen von quadratischen Gleichungen im Komplexen auf Fraktale stoßen kann, ist wohl nur bedingt nützlich.

Am Ende bleibt ein durchwachsender Eindruck. Zwar präsentiert das Buch zahlreiche interessante und ansprechende Beispiele, um die Bedeutung der Mathematik in unserer Alltagswelt zu verdeutlichen. Doch hält der Autor das nicht konsequent durch. Und mathematisch Interessierte werden bei der Lektüre wohl feststellen, dass sie mehr erwartet haben, als das Werk bietet.

#### Heinz Klaus Strick

Der Rezensent ist Mathematiker und ehemaliger Leiter des Landrat-Lucas-Gymnasiums in Leverkusen-Opladen.

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

## Ein wissenschaftliches Abenteuer nach dem wir besser verstehen, wer – und was – wir sind

Eine hervorragend geschriebene Gesamtgeschichte der Erde und des Menschen.  
»Eine neue, ungewöhnliche Art, die Geschichte des Lebens, des Universums und von fast Allem zu erzählen [...] enorm unterhaltsam!« The Guardian

304 Seiten, gebunden, € (D) 21,99

Ein Buch von S. FISCHER





Florian Neukirchen, Gunnar Ries

### **Die Welt der Rohstoffe**

*Lagerstätten, Förderung und wirtschaftliche Aspekte*

Springer, Berlin und Heidelberg 2014

350 S., € 39,99

ERDE UND UMWELT

## (Fast) alles über Rohstoffe

Zwei Mineralogen liefern einen umfangreichen Abriss über Erze, Sande, Gesteine & Co.

Der Mensch nutzt ein breites Spektrum von Rohstoffen – nicht nur fossile Energieträger und Metalle, auch Sand, Natursteine oder Salze. Woher kommen sie? Wie sind sie entstanden, wie sucht man am effizientesten nach ihnen, und wie lassen sie sich umweltschonend abbauen und verfügbar machen? Diesen Fragen widmet sich das vorliegende Buch von Florian Neukirchen und Gunnar Ries. Der Untertitel »Lagerstätten, Förderung und wirtschaftliche Aspekte« umreißt die Schwerpunkte des Werks; inhaltlich geht es weit darüber hinaus. Neukirchen und Ries beleuchten auch die ökologischen und sozialen Probleme, die mit dem Erkunden, Erschließen und Ausbeuten von Lagerstätten einhergehen. Zudem behandeln sie die Prozesse, mit denen sich die Rohmaterialien in nutzbare Produkte überführen lassen. Beide Autoren sind Mineralogen mit internationaler Erfahrung; sie haben zahlreiche Publikationen für Fachleute wie Laien verfasst.

Nach einer Einführung, die Definitionen und Grundlagen liefert, widmet sich das Buch schwerpunktmäßig der »Welt der Metalle«. Drei weitere Kapitel gliedern die wichtigsten Lagerstättentypen nach Entstehungsprozessen. Ein kurzer Abschnitt ist den organischen Rohstoffen Kohle, Erdöl und Erdgas vorbehalten. Erfreulicherweise geht er auf hochaktuelle Themen wie den Abbau von Teersanden und Gashydraten sowie das Fracking ein. Gerade letzteres

Thema haben die Medien in den zurückliegenden Jahren emotional stark aufgeladen, und es ist oft schwer, hier wertneutrale Informationen zu bekommen. Diese liefern die Autoren, indem sie industrielle Methoden und Verfahren beim Fracking erläutern. Dabei stellen sie in unvoreingenommener Weise die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten den ökologischen und ökonomischen Risiken gegenüber. Den Abschluss des Buchs bildet das Thema »Industriemineralien, Steine und Erden«. Hier erfährt der Leser unter anderem, dass sich Diamanten zu weit mehr als für Schmuck eignen.

### **Aus dem Russischen entlehnt**

Das Werk ist aufwändig und zugleich übersichtlich gestaltet. Zahlreiche Abbildungen, Fotos und Tabellen ergänzen den Text. Exakt 100 Textkästen erklären Grundlagen, liefern Hintergrundwissen oder heben Besonderheiten hervor. Zusätzliche Infoboxen enthalten Begriffserklärungen oder weiterführende Informationen. Als hilfreich erweist sich, dass jedes Kapitel eine eigene Farbe besitzt, die sich an den Seitenrändern, im Inhaltsverzeichnis und in den Infoboxen wiederfindet. Die Herkunftserklärungen der Namen und Begriffe sind oft sehr aufschlussreich. Dass beispielsweise der Name des Hellglimmers Muskovit so viel wie »Moskauer Glas« bedeutet, weiß sicher nicht jeder. In vielen geowissenschaftlichen Fachausdrücken finden sich alte Bergmanns-

begriffe wieder, wie aus den Erklärungen hervorgeht.

Den Autoren ist es gelungen, einen umfangreichen Themenkomplex auf gut 300 Seiten zusammenzufassen und dabei aus mehreren Perspektiven zu beleuchten. Und dies auf dem aktuellen Stand des Wissens, wie etwa die Beschreibung der Dolomitbildung verdeutlicht, aus der hervorgeht, wie sehr sich die wissenschaftliche Auffassung dazu in den letzten Jahren verändert hat. Allerdings macht die hohe Informationsdichte das Werk eher zum Nachschlagewerk als zum Lesebuch. Wer trotzdem noch mehr wissen möchte, findet umfangreiche Literaturlisten zur weiterführenden Recherche vor.

Nicht immer führt das Bemühen der Autoren, komplexe Begriffe und Prozesse knapp und zugleich verständlich zu erklären, zu einem optimalen Resultat. So enthält eine Infobox folgende Definition: »Diskordanz nennt man eine Grenzfläche, an der Sedimente flach über verkipperten und teilweise erodierten älteren Gesteinen liegen.« Das ist zwar nicht falsch, der Begriff »flach« aber unglücklich gewählt. Als Diskordanz bezeichnen Geowissenschaftler den winkligen Kontakt zweier geologischer Einheiten, wobei diese nicht notwendigerweise flach gelagert sein müssen. Ein anderer Glossareintrag definiert den Begriff »Metamorphose« (Umbildung von Gesteinen) und lässt dabei außen vor, dass Druck und Temperatur bei dem Prozess die tragende Rolle spielen. So kann sich ein Laie nur schwer vorstellen, wie diese Umwandlung abläuft.

Wer nach gut lesbarem, leicht verständlichem Stoff sucht, wird von dem Buch wohl eher enttäuscht sein. Wer jedoch an einer dichten Informationssammlung interessiert ist, die die Welt der Rohstoffe aus mehreren Perspektiven beleuchtet und solide Grundlagen für tiefer gehende Recherchen liefert, ist mit diesem Werk gut beraten.

### **Wolf Rottke**

Der Rezensent ist promovierter Geologe und mit Softwareentwicklung im Bereich geologische Beckenmodellierung befasst.



## Wundervogel Phönix

»Wer die Tagesblätter durchblättert, der wird auf eine Phrase stoßen, die dem Echterdinger Unglück des Grafen Zeppelin ihre Neubelebung zu verdanken scheint: die

Wendung vom Phönix, der verjüngt aus der Asche wiederersteht (1908 *verunglückte ein Luftschiff Zeppelins, doch eine Spendenaktion sicherte die Weiterentwicklung; Anm. der Red.*). Ihr Ursprung geht zurück auf eine unter dem Namen Physiologus bekannte Schrift, die in frühchristlicher Zeit in Alexandrien entstand. Es heißt dort: »In Indien gibt es einen Vogel, der Phönix heißt. Nach

500 Jahren geht er in die Wälder des Libanon und füllt seine Flügel mit wohlriechenden Kräutern. Darauf kündigt er sich dem Priester von Heliopolis an, der dann den Altar mit Holz von der Weinrebe füllt. Der Vogel verbrennt sich selbst. Am folgenden Tag untersucht der Priester den Altar und findet einen Wurm in der Asche; am zweiten Tag bekommt dieser Flügel; am dritten entwickelt er sich zu

dem ursprünglichen Phönix«. In der Auslegung wird der Phönix mit Christus verglichen. Diese Sage steht schon bei Herodot, in ägyptischen Denkmälern, bei Plinius und Ovid. Verbreitung aber hat sie durch den Physiologus erfahren, der, als erstes christliches Lehrbuch der Zoologie, nicht nur ins Lateinische, sondern auch in die Sprachen des Morgenlands übersetzt wurde.« Kosmos 9/1914, S. 362

## Sieg der Glühlampe

»Der bedeutsame Erfolg des Jahres 1913 auf beleuchtungstechnischem Gebiete ist zweifellos die Halbwattlampe, die hochkerzige Glühlampe für Lichtstärken von 600 bis 3000 Kerzen, die nur einen spezifischen Effektverbrauch von ½ Watt für die Kerze hat. Dieser geringe Stromverbrauch ermöglicht es der modernen Glühlampe, als billige Starklichtquelle mit der Bogenleuchte in Wettbewerb zu treten. Die Abbildungen gestatten einen Vergleich zwischen der Straßenbeleuchtung durch Bogenlampen und durch Glühlicht, wobei besonders die größere Gleichmäßigkeit der Beleuchtung durch Glühlampen auffällt.« Prometheus 1295, S. 751, 1914



Mitternächtlicher Lampentest in Dresden: Effektbogenlampe (links); hochkerzige Glühlampe (rechts).

## Elektronische Krankenschwester

»Das System der elektronischen Monitoren hat im Operationssaal seit geraumer Zeit Anwendung gefunden. Andere Monitorsysteme finden ihren Ausdruck in dem, was man heute als »Elektronische Krankenschwester« bezeichnet. Von dem einzelnen Krankenbett im Krankenhaus werden durch das Monitorsystem der Puls, die Schlagfolge und der Schlagrhythmus des Herzens an den Zentralbeobachtungsraum weitergeleitet; außerdem die Atmungshäufigkeit, das Elektrokardiogramm und das Enzephalogramm. Es ist anzunehmen, daß die »Elektronische Krankenschwester« dazu verhelfen wird, nicht nur Menschenleben zu retten, sondern auch Betriebskosten zu sparen und das Personal zu verringern.« Elektronik 8/1964, S. 234

## Selbsteilender Draht

»Elektrische Leitungsdrähte, bei denen beschädigte Stellen verheilen, wurden in den Vereinigten Staaten für Raumflugkörper entwickelt. Sie sollen verhindern, daß durch Vibrationen, Strahlungseinwirkungen oder schnellen Temperaturwechsel Störungen oder Drahtbrüche auftreten. Die Seele dieser Drähte besteht aus einer Legierung von Zinn, Magnesium und Aluminium. Bricht der Draht, beginnen feine Haarkristalle aus beiden Bruchstellen zu sprießen und eine neue Kontaktbrücke zu bilden.« Elektronik 8/1964, S. 253



## Rätsel um Stonehenge gelüftet

»Auf dem öden Hochland von Salisbury im Süden Englands stehen eine große Zahl riesiger behauener Steine, welche die Phantasie der Gelehrten beschäftigen. Hundert Meter außerhalb des Ringwalles steht ein Stein,

der Hele genannt wird. Im Zentrum liegt ein Stein, der als Altar bezeichnet wird. Wenn man zur Sommersonnenwende auf diesem steht, so sieht man die Sonne nahe der »Hele« aufgehen. Aus dieser Tatsache schlossen schon

die ersten Untersucher, daß die Anlage der Erkennung der Jahreszeiten diene. Diese Theorie konnte nun von Hawkins bestätigt werden. Die Beziehungen der Gestirne zu sämtlichen Steinen wurden geprüft. Fixsterne

und Planeten ließen keinen Zusammenhang erkennen. Hingegen ergaben sich 10 Korrelationen zur Sonne bei einem Fehler von  $\pm 1^\circ$  und 14 zum Mond bei  $\pm 1,5^\circ$  Genauigkeit.« Naturwissenschaftliche Rundschau 8/1964, S. 309

# WOFÜR HAT MAN FREUNDE?

VON ALTER S. REISS

»Hör sofort mit dem Spiel auf!«, schimpfte Steve, und Brendan wandte sich überrascht und verletzt seinem Vater zu.

Der Ausbruch tat Steve sofort leid. Das Unglück, das seinem Sohn geschah, ließ sich nicht anschreien. Brendan war erst zwölf – alt genug, um zu begreifen, was vorging, aber zu jung, um ..., einfach noch zu jung. Er sah übermüdet aus: Ringe unter den Augen, eine Haut wie Papier. Er sah aus wie ein Sterbender.

»Entschuldige«, sagte Steve. »Nur ... mach eine kleine Pause, mir zuliebe, okay?«

»Okay«, sagte Brendan. »Ich sag schnell meinen Freunden Bescheid.« Und er schaute wieder auf den Bildschirm und murmelte Entschuldigungen in sein Headset.

Freunde, dachte Steve. Als ob der Junge echte Freunde hätte – das waren alles nur Leute im Netz. Ich hätte strenger sein sollen, mit der Schule, mit dem Feriencamp und so. Jetzt ist es dafür zu spät.

Er seufzte und versuchte, sich zu konzentrieren. Seine Aufgabe war es, für Brendan ein Vater zu sein, solange dessen Leben noch dauerte.

»Fertig. Was ist das, Dad? Was druckst du da aus?«

Der Drucker klickte und summete, während er seine Aufgabe beendete. Das beste System auf dem Markt – Lasersintern für vier Metalle, außerdem insgesamt 14 Elemente für nichtmetallische Zusammensetzungen. Wäre besser gewesen, die Zeit mit dem Jungen zu verbringen statt mit seinem Spielzeug. »Bots«, sagte er. Er nahm die vom Drucker produzierte Kapsel heraus und reichte sie dem Jungen. »Da, nimm.«

Brendan schnitt ein Gesicht, doch er nahm die Kapsel und würgte sie mit Wasser hinunter. Er hatte schon eine Menge Pillen schlucken müssen, seit das Problem aufgetaucht war, aber wehleidig, nein, das war er nie gewesen.

Während Steve die Software aktivierte, schwammen die Bots schon in Brendans Blutkreislauf, und der Junge lehnte sich neugierig über seine Schulter. »Ich finde, es hilft, wenn man zuschaut«, sagte Steve. Er hatte in einem Ratgeber gelesen: Man soll den Kindern zeigen, was los ist. Und das fand er vernünftig. Der Schirm zeigte ein Gewirr von Formen, die sich unterschiedlich schnell bewegten. »Siehst du, das ist dein Blut«, sagte er.

»Und das da sind die Krebszellen?«

Steve zuckte zusammen; er wollte nicht, dass Brendan das Wort gebrauch-

te. »Nein«, sagte er, »die rot umrandeten sind die roten Blutkörperchen. Und das Gelbe da ist ein weißes Blutkörperchen. Einige von denen sind die ... Einige funktionieren nicht richtig.«

»Das da zum Beispiel?«

»Ja«, sagte Steve. »Die Dinger, die so aussehen, als hätten sie Haare, das sind die bösen Zellen. Und jetzt schau!« Er drückte ein paar Knöpfe; der Bot bewegte sich auf die Zelle zu, in sie hinein – und sie zerfiel.

»Cool.« Brendan rutschte neben ihn und übernahm die Tastatur.

»Könnten wir Chemotherapie anwenden, würde das Knochenmark aufhören, sie zu produzieren, diese ...«

»Aber das geht nicht«, sagte Brendan, »wegen meiner Leber. Und wir haben andere Sachen versucht, ohne Erfolg. Also werde ich sie abschießen.«

Steve schüttelte den Kopf. Er kämpfte mit den Tränen. Was im Ratgeber vernünftig klang, war in der Praxis nicht so einfach. »Es sind zu viele, Junge. Weit über zehn Millionen. Aber ein paar kannst du erwischen. Zeig's ihnen.«

»Danke, Papa«, sagte Brendan und setzte sich bequemer hin. »Vielleicht wollen mir ja ein paar von meinen Freunden helfen – sind diese Bots vernetzt?«



»Ich bin mir nicht sicher«, sagte Steve. Er möchte am liebsten bleiben. Zwar konnte er nichts tun, aber er würde gerne jede noch verbleibende Minute mit seinem Sohn verbringen. Bloß: Ihre Versicherung war zwar ein ziemlicher Mist, aber wenn er jetzt auch noch seinen Job verlor, war sie ganz futsch. »Du, ich muss zur Arbeit. Wenn du ein besseres Muster findest, kannst du es ausdrucken.«

»Danke«, sagte Brendan, aber er hörte schon nicht mehr zu. Er hatte nur das Spiel gewechselt – aber das Buch, das Steve gelesen hatte, empfahl das als ersten Schritt. Außerdem brachte es den Jungen auf andere Gedanken.

Als Steve heimkam, zerschoss Brendan noch immer bössartige Lymphozyten. Vielleicht war es ein Fehler gewesen, ihm Hoffnung zu machen, er könnte die Leukämie Zelle für Zelle besiegen. Dem Ratgeber zufolge würde Brendan frustriert aufgeben, zornig werden und weitermachen – und schließlich das Ausmaß des Problems einsehen.

»Na, wie läuft's?«, fragte Steve.

»Oh, das bin gerade gar nicht ich«, erklärte sein Sohn, lehnte sich zurück und schenkte seinem Vater ein halbes Lächeln. »Seit sie Bonuspunkte für die Brutstellen bekommen ...«

»Das Knochenmark?«

»Ja, das kranke Knochenmark. Ich habe für jeden Treffer einen Extrabonus eingerichtet.«

Steve versuchte zu verstehen. »Du hast über zehn Millionen Krebszellen in deinem Blut.«

»Die sind Geschichte«, sagte Brendan. »Es gibt da einen Kerl in Fidschi, der hat sogar deinen Drucker neu konfiguriert. Ich hab jetzt Bots im Spiel mit stärkeren Waffen. Manche können sogar Nanominen absetzen. Die Steuerung ist jetzt Open Source und wird immer effektiver. Meine Freunde haben außerdem die Schnittstelle verbessert und den Link dazu in die sozialen Netze gestellt. Es gibt eine Bestenliste, und das Spiel ist gerade ein ziemlicher Hype.«

Das Spiel? Diese ganze Euphorie schien Steve absurd, doch andererseits ... »Fühlst du dich besser?«, fragte er und betrachtete Brendan genauer. Der sah immer noch übermüdet drein, aber seine Augen blickten klarer, und vielleicht hatte seine Haut sogar ein wenig Farbe bekommen.

»Ja, aber dieser Typ ... Papa, du erdrückst mich! Papa, lass das doch! Verflixt, jemand klaut mir meine Killerpunkte!« 🕒

## DER AUTOR

**Alter S. Reiss** ist Archäologe und Wissenschaftsredakteur. Seine Geschichten sind unter anderem in »Fantasy & Science Fiction«, »Strange Horizons« und »Daily Science Fiction« erschienen.

Wohin mögen die Entwicklungen unserer Zeit dereinst führen? Sciencefiction-Autoren spekulieren über mögliche Antworten. Ihre Geschichten aus der »Nature«-Reihe »Futures« erscheinen hier erstmals in deutscher Sprache.

© Nature Publishing Group

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

Nature 509, S. 254, 8. Mai 2014

# Die Krise der Super- symmetrie

Gemäß einer von theoretischen Physikern favorisierten Erweiterung des Standardmodells existiert zu jedem bisher bekannten Teilchen ein verborgener Superpartner. Doch falls der Large Hadron Collider, die gigantische Teilchenschleuder bei Genf, nicht bald überzeugende Indizien findet, droht nicht nur der Supersymmetrie, sondern der gesamten Physik eine Grundlagenkrise.

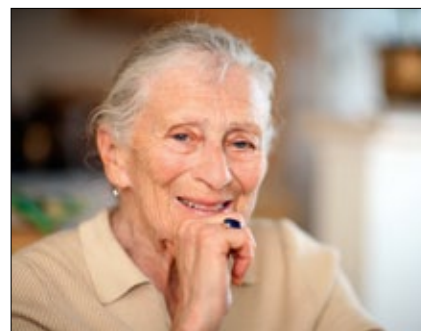
SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

## 100 Jahre Schrecken

Kurz nach Beginn des Ersten Weltkriegs sah sich Deutschland einem bedrohlichen Munitionsmangel gegenüber. Als Ausweg schlug der spätere Nobelpreisträger Fritz Haber den Einsatz von Chemiewaffen vor. Es war der Auftakt zu einer besonders grausamen Art der Kriegsführung, die noch heute praktiziert wird.

## Statistik mangelhaft

Angeblich entscheidet eine einzige Zahl, der  $p$ -Wert, darüber, ob ein Studienergebnis bemerkenswert («signifikant») ist. Doch so war das Konzept von seinen Schöpfern nie gemeint – und wird obendrein oft falsch angewandt. Das mag erklären, warum so viele Ergebnisse in den Sozialwissenschaften nicht reproduzierbar sind.



FOTOLIA / KONSTANTIN SUTYAGIN

## Licht- und Schattenseiten der menschlichen Langlebigkeit

Unsere Lebenserwartung ist im Vergleich zu anderen Primaten hoch. Das liegt unter anderem an Genen, die den Schutz gegen Krankheitserreger stärken. Doch fördern gerade diese Abwehrprozesse später die typischen Alterskrankheiten.



FIL FLIBURN / WEST TEXAS WEATHER MODIFICATION ASSOCIATION

## Den Regen beschwören

Nach wie vor steht der Beweis aus, dass der Mensch in der Lage ist, das Wetter zu manipulieren. Laut neuesten wissenschaftlichen Erkenntnissen könnte es jedoch tatsächlich funktionieren – doch nur in gewissem Umfang.

## 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)

# DAS GANZE SPEKTRUM. AUF IHREM BILDSCHIRM.

MIT DEM  
SPEKTRUM DER  
WISSENSCHAFT-  
**DIGITAL-  
ABO**



Das Digitalabo von *Spektrum der Wissenschaft* kostet im Jahr € 60,- (ermäßigt € 48,-). Abonnenten können nicht nur die aktuelle Ausgabe direkt als PDF abrufen, sondern haben auch Zugriff auf das komplette E-Paper-Heftarchiv!

So einfach erreichen Sie uns:

**Telefon: 06221 9126-743**  
**[www.spektrum.de/digitalabo](http://www.spektrum.de/digitalabo)**

Fax: 06221 9126-751 | E-Mail: [service@spektrum.com](mailto:service@spektrum.com)

Oder QR-Code  
per Smartphone  
scannen und  
Angebot sichern!





**AcademiaNet** ist ein einzigartiger Service für Entscheidungsträger aus Wissenschaft und Industrie ebenso wie für Journalisten und Veranstalter von Tagungen und Kongressen. Hier finden Sie hoch qualifizierte Akademikerinnen, die neben ihren hervorragenden fachlichen Qualifikationen auch noch Führungserfahrung und Managementfähigkeiten vorweisen können.

**AcademiaNet**, das europäische Rechercheportal für herausragende Wissenschaftlerinnen, bietet:

- Profile hoch qualifizierter Akademikerinnen aller Fachrichtungen – ausgewählt von Vertretern renommierter Wissenschaftsorganisationen und Industrieverbände
- Individuelle Suchmöglichkeiten nach Fachrichtungen, Arbeitsgebieten und weiteren Kriterien
- Aktuelle redaktionelle Beiträge zum Thema »Frauen in der Wissenschaft«

Robert Bosch **Stiftung**

**Spektrum**  
DER WISSENSCHAFT

**nature**

Eine Initiative der Robert Bosch Stiftung in Zusammenarbeit mit Spektrum der Wissenschaft und der nature publishing group

[www.academia-net.de](http://www.academia-net.de)