

# Spektrum

DER WISSENSCHAFT



SCHNEEFLOCKEN  
WIE DIE BIZARREN  
KRISTALLE WACHSEN

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC  
AMERICAN

SERIE GEHIRN (TEIL III)

Weniger Risiko  
bei Narkosen

LEBENSMITTELALLERGIEN

Wenn der Körper gegen  
Nahrung rebelliert

NUKLEARTECHNIK

Die Pläne der USA  
für neue Atombomben

## Kosmische Achterbahn

Rasante Schwankungen in der  
Expansion des jungen  
Weltalls als Test  
für die Stringtheorie



7,50 € (DVA) - 8,- € (I) - 14,- € (F)

DC 179E

02  
4 174055 407452



www.spektrum.de

Spektrum  
DER WISSENSCHAFT

2/08

FEBRUAR 2008



Reinhard Breuer  
Chefredakteur

## Immer schneller – aber wohin ?

Über das schnelle Autofahren meinte der Wiener Sarkast Helmut Qualtinger einmal: »Ich weiß zwar nicht, wo ich hin will, aber dafür bin ich schneller dort.« Ob ziellos oder nicht – Geschwindigkeit ist, das lernt jeder Physikstudent, die erste Ableitung des Orts nach der Zeit, und Beschleunigung ist die zweite Ableitung nach der Zeit. Auf Deutsch: Ohne Ortsveränderung gibt es keine Geschwindigkeit, ohne veränderliche Geschwindigkeit keine Beschleunigung. Wer beschleunigt wird, der verspürt eine Kraft, die ihn mitnimmt – das wusste schon Newton.

Aber zusätzlich zur Physik bewegter Materie erlebt jeder Mensch eine soziale Beschleunigung – ein etwas diffuses Phänomen, dessen Sog wir uns gleichwohl unmittelbar ausgesetzt fühlen. Auch Hartmut Rosa partizipiert am erhöhten Tempo der Welt. Kein Wunder, hält er doch einen Lehrstuhl für Soziologie an der Universität Jena, unterrichtet Studenten, betreut Doktoranden, schreibt Anträge und Gutachten, publiziert Fachartikel und Bücher, liest die Werke der Kollegen, reist herum zu Vorträgen und Tagungen, treibt Sport und ist Gastforscher an auswärtigen Hochschulen – ein erfülltes akademisches Leben eben.

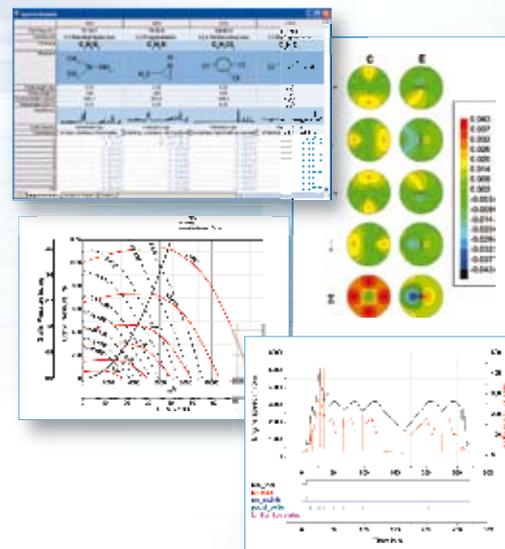
**Kennen gelernt habe ich den 42-jährigen Soziologen** anlässlich eines Vortrags in Heidelberg, natürlich zum Thema soziale Beschleunigung, mit dem er sich seit geraumer Zeit wissenschaftlich auseinandersetzt. Was könnte man dazu noch sagen, dachte ich zuerst, was nicht weit gehend evident ist und schon von Goethe über Rousseau bis zum »Dromologen«, also Geschwindigkeitsforscher Paul Virilio gesagt worden wäre? Hatte dieser französische Philosoph nicht schon vor Jahren etwa mit seinem Buch »Geschwindigkeit und Politik« Wesentliches formuliert?

Aber während Virilio die Geschwindigkeit als Triebfeder von Reichtum und Macht beschreibt, stellt Hartmut Rosa die soziale Beschleunigung ins Zentrum seiner Analyse. Anders als der Franzose rechnet er nicht nur den technischen Tempozuwachs, sondern auch die dramatischen Umwälzungen in der Gesellschaft wie im individuellen Leben zu eigenständigen Dimensionen. Als Antrieb wittert der Soziologe dahinter vor allem die heimliche kulturelle Verheißung der Moderne: durch schnelleres Leben gleichsam ein »ewiges Leben vor dem Tod« zu erlangen.

**Wohin uns die Beschleunigung führt?** Es läuft, wie so oft, auf eine Krise und damit auf ein Entscheidungsproblem hinaus – damit wir auch Qualtinger einmal nachrufen können, wohin uns all die Hast führen soll. Für uns hat Rosa seine Thesen in einem Essay zusammengefasst (S. 82).

Herzlich Ihr

*Reinhard Breuer*



### Highlights in ORIGIN 8 (• neue Funktionen):

- Technische Graphen in Publikationsqualität
- Neue Arbeitsmappen mit mehreren Blättern und Arbeitsmappen-Manager
- Sparklines und Meta-Daten im Spaltenkopf
- Microsoft® Office Integration
- Grafikformate als Design speichern
- Neue Importformate: Axon pCLAMP®, ETAS INCA, imc FAMOS, Bild (BMP, GIF, JPG, uvm...), Kaleidagraph®, Minitab®, National Instruments DIAdem und TDM, netCDF, SigmaPlot®, uvm...
- Analysetemplates mit Autoaktualisieren
- Konsolidierte Reports für Ergebnisse
- X-Funktionen und Kommandofenster
- ActiveX® und COM Support
- Drag&Drop- import, -analyse & -visualize
- ORIGINPRO 8 bietet alle Funktionen von ORIGIN und darüber hinaus erweiterte Analysehilfsmittel für Statistik, 3D-Anpassung, Bild- und Signalverarbeitung.

Weitere Informationen zu ORIGIN:

<http://www.additive-origin.de/sdw>

Kostenfreie Demoversion:

<http://www.additive-origin.de/download>

**ADDITIVE**  
Soft- und Hardware für Technik und Wissenschaft

**ADDITIVE GmbH**  
Max-Planck-Straße 22b · D-61381 Friedrichsdorf/Ts.  
Telefon 06172-5905-(0)30 · Fax 06172-77 613  
E-Mail: [origin@additive-net.de](mailto:origin@additive-net.de)  
[www.additive-net.de](http://www.additive-net.de) • [www.additive-origin.de](http://www.additive-origin.de)



36

ASTRONOMIE & PHYSIK Rätsel Schneekristalle



50

MEDIZIN & BIOLOGIE Wie sicher sind Narkosen?



68

ERDE & UMWELT Entfesselte heiße Flecken

## AKTUELL

### 10 Spektrogramm

Behaarte Zahlenakrobaten · Fliegende Untertassen um Saturn · Entfesselungstrick mit Dreifachbindung · Unsichtbar in Infrarot · Uralter Würgerpilz u. a.

### 13 Bild des Monats

»Kuckuck« im Ameisennest

### 14 Klimaküche Feuerland

Hier steckt ein Schlüssel zum Verständnis der Erderwärmung

### 19 Moralisten in Windeln

Schon Säuglinge können Gut und Böse unterscheiden

### 20 Spintausch im Lasergitter

Erstmals ist es gelungen, Quantenbits gezielt zu manipulieren

### 22 Scheinwerfer für die Nanowelt

Kristallnadel als ferngesteuerte Minitaschenlampe

### 23 Springers Einwüfe

Fernheilung mit Hühnersuppe

## ASTRONOMIE & PHYSIK

### 26 TITEL: Kosmische Achterbahn

Die explosionsartige Expansion des jungen Kosmos wird zum Testfall für die Stringtheorie

### 36 ► Wundersamer Schnee

Wachstum und Vielfalt der Schneeflocken stellen die Forscher auch heute noch vor Rätsel

PHYSIKALISCHE UNTERHALTUNGEN

### 46 Hohlwelttheorie

Abwegig – aber unwiderlegbar!

## WEITERE RUBRIKEN

- 3 Editorial: Immer schneller – aber wohin?
- 8 Leserbrief
- 8 Impressum
- 75 Im Rückblick
- 114 Vorschau

## MEDIZIN & BIOLOGIE

### 50 ► Narkosen sicherer machen

Narkosemittel wirken meist zu diffus. Zielgenaue neue Wirkstoffe sollen Gefahren durch Nebenwirkungen verhindern

### 58 ► Lebensmittelallergien

Nahrung mit ihrer Fülle körperfremder Stoffe muss vom Immunsystem toleriert statt attackiert werden. Muttermilch und gewisse Darmbakterien dienen dabei offenbar als Lernhilfe

### 107 Rezensionen:

- K. Schmidt-Loske – *Die Tierwelt der Maria Sibylla Merian*
- C. Borchard-Tuch et al. – *Expedition in die Wissenschaft*
- J. H. Reichhoff – *StadtNatur*
- F. Pearce – *Wenn die Flüsse versiegen*
- A. Eschbach – *Ausgebrannt*
- O. Niewiadomski – *Geometrie, Kunst und Wissenschaft*

Titelmotiv: Jean-François Podevin

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ► gekennzeichnet; die mit ► markierten Artikel können Sie als Audiodatei im Internet beziehen, siehe: [www.spektrum.de/audio](http://www.spektrum.de/audio)



TITELTHEMA

## Kosmische Achterbahnfahrt

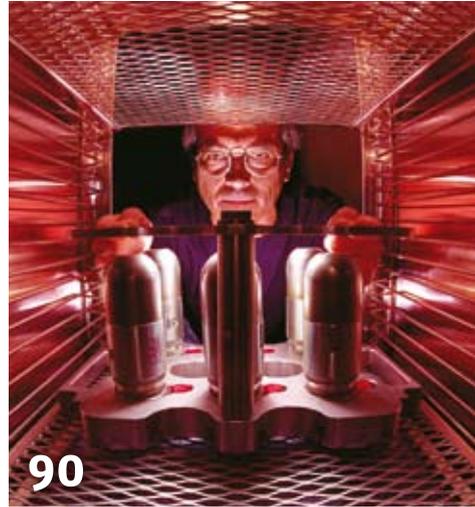
26



82

MENSCH & GEIST

ESSAY: Fatale Beschleunigungsspirale



90

TECHNIK & COMPUTER

USA planen neue Kernwaffen

### ERDE & UMWELT

#### 68 Hotspots auf Wanderschaft

So genannte heiße Flecken, an denen Magma tief aus dem Erdinneren aufsteigt, dienten lange als vermeintlich ortsfeste Fixpunkte zur Rekonstruktion der Plattendrift. Doch nun ist bewiesen: Und sie bewegen sich doch!

### MENSCH & GEIST

#### 76 Liebe deinen Spielpartner wie dich selbst

Viele Teilnehmer unseres Preisausschreibens »Ein romantischer Abend zu zweit« folgten diesem Prinzip – was ihnen zum eigenen Vorteil gereichte

ESSAY

#### 82 Soziale Beschleunigung

Der Soziologe Hartmut Rosa über den Grundantrieb der Moderne

### TECHNIK & COMPUTER

WISSENSCHAFT IM ALLTAG

#### 88 Elektronen mögen's heiß

Energiesparlampen verdrängen allmählich die Glühbirnen

#### 90 ► Wozu Kernwaffen?

Die USA planen den Bau neuer Atombomben – warum?

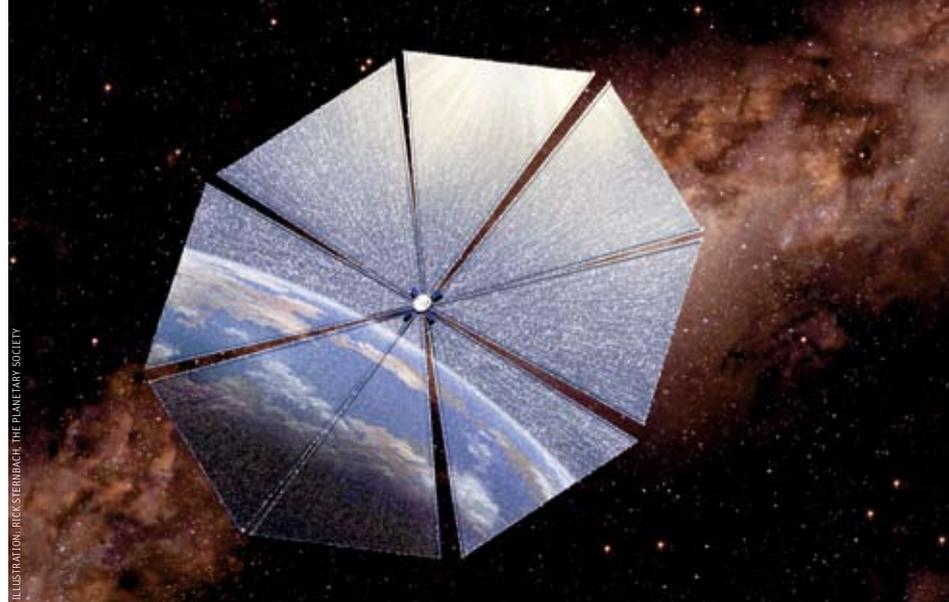
#### 100 Ende der Abrüstung?

Die Nuklearpläne der USA könnten das Wettrüsten wieder anheizen



# Thema der Woche

**e-on**  
Neue Energie



FÜR ABONNENTEN »Vor dem Sonnenwind«

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



ESA / AOE5 MEDIALAB

TIPPS Mit Schülern auf Planck-Mission?

[www.wissenschaft-schulen.de/artikel/914370](http://www.wissenschaft-schulen.de/artikel/914370)

## spektrumdirekt

Die Wissenschaftszeitung im Internet

### Ein Reaktorunglück und die Folgen

Am 26. April 1986 ereignete sich in einem kleinen Ort in der heutigen Ukraine das schlimmste Unglück in der Geschichte der zivilen Nutzung der Kernenergie. Über die Folgen der Havarie von Block 4 des Kernkraftwerks Tschernobyl wird heute noch kontrovers diskutiert

[www.spektrumdirekt.de/tschernobyl](http://www.spektrumdirekt.de/tschernobyl)

### »Wir danken für das Gespräch«

Hier kommen Forscherinnen und Forscher zu Wort: **spektrumdirekt** präsentiert aktuelle Interviews mit Vertretern aller Disziplinen, ob über Krebs oder die Polargebiete, über die Artenvielfalt oder die ersten Europäer

[www.spektrumdirekt.de/interviews](http://www.spektrumdirekt.de/interviews)



FREIGESCHALTET »Ein Vulkan schreibt Weltgeschichte«



[www.epoc-magazin.de/artikel/936534](http://www.epoc-magazin.de/artikel/936534)

## TIPPS

### Lesen Sie doch, was Sie wollen!

Ob Klimawandel oder Hirnforschung, Dinosaurier oder Nanotechnologie, Aids oder Genetik – auf den Spektrum-Themenseiten finden Sie reichlich aktuellen Lesestoff, sortiert nach aktuellen Themen aus der Wissenschaft. Nur wenige Klicks führen Sie zu entsprechenden Online- und Print-Artikeln oder zu unserem Audio-Angebot »Spektrum Talk« [www.spektrum.de/themen](http://www.spektrum.de/themen)

### Mit Schülern auf Planck-Mission?

In diesem Sommer startet die Europäische Weltraumorganisation ihr Weltraumobservatorium Planck. Ihre Schüler wollen wissen, worum es dabei geht? Wir präsentieren unter anderem ein Wissensquiz für die Unter- und Mittelstufe, zum Beispiel als Klassenquiz nach dem Vorbild von »Wer wird Millionär?«

[www.wissenschaft-schulen.de/artikel/914370](http://www.wissenschaft-schulen.de/artikel/914370)

## INTERAKTIV

### Wie viele Universen gibt es?

Sie haben gewählt! In der Märzausgabe von **Spektrum der Wissenschaft** werden wir den Wunschartikel veröffentlichen, der als Favorit aus unserer Online-Umfrage hervorging. Hier stellt Ihnen Chefredakteur Reinhard Breuer die Ergebnisse vor:

[www.spektrum.de/artikel/934898](http://www.spektrum.de/artikel/934898)

### Woher nehmen wir die Energie?

In ihrem Buch »Das Energiedilemma« fragt Jeanne Rubner, ob sich Deutschland den Ausstieg aus der Kernenergie überhaupt leisten kann. Hier lesen Sie unsere Rezension und können das Buch nach unseren 5x5-Kriterien auch selbst bewerten:

[www.spektrumdirekt.de/artikel/936440](http://www.spektrumdirekt.de/artikel/936440)

## FÜR ABONNENTEN

### »Vor dem Sonnenwind«

Majestätisches Gleiten durch unser Planetensystem – eine faszinierende Raumfahrtvision. Obwohl noch nie ein Sonnensegel durchs All kreuzte, tüfteln Forscher bereits an der nächsten Generation dieser futuristischen Antriebe

DIESER ARTIKEL IST FÜR ABONNENTEN FREI ZUGÄNGLICH UNTER

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

## FREIGESCHALTET

### »Ein Vulkan schreibt Weltgeschichte«

Als im April 1815 in Indonesien der Tambora ausbrach, schleuderte er so viel Asche in die Atmosphäre, dass ein Jahr später der Sommer ausfiel: Hunger, Not und Tod waren die Folge – weltweit

DIESEN ARTIKEL FINDEN SIE ALS KOSTENLOSE LESEPROBE VON **EPOC** UNTER

[www.epoc-magazin.de/artikel/936534](http://www.epoc-magazin.de/artikel/936534)

### »Glühende Pein«

»Jetzt bloß nicht rot werden ...« Leider bewirkt dieses Stoßgebet meist genau das Gegenteil! Doch Erröten hat auch Vorteile – und die Angst davor lässt sich überwinden

DIESEN ARTIKEL FINDEN SIE ALS KOSTENLOSE LESEPROBE VON **GEHIRN&GEIST** UNTER

[www.gehirn-und-geist.de/artikel/913146](http://www.gehirn-und-geist.de/artikel/913146)

Alle Publikationen unseres Verlags sind im Handel, im Internet oder direkt über den Verlag erhältlich

[www.spektrum.de](http://www.spektrum.de)  
[service@spektrum.com](mailto:service@spektrum.com)  
Telefon 06221 9126-743

## Spektrum.de

Heftarchiv  
[www.spektrum.de/archiv](http://www.spektrum.de/archiv)

Spektrum Notizen  
[www.spektrum.de/notizen](http://www.spektrum.de/notizen)

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

Spektrum Tagebuch  
[www.spektrum.de/tagebuch](http://www.spektrum.de/tagebuch)

Spektrum zum Hören  
[www.spektrum.de/hoeren](http://www.spektrum.de/hoeren)

Spektrum in die Schulen  
[www.spektrum.de/wis](http://www.spektrum.de/wis)

Der Mathematische Monatskalender  
[www.spektrum.de/monatskalender](http://www.spektrum.de/monatskalender)

Leserbriefe  
[www.spektrum.de/leserbriefe](http://www.spektrum.de/leserbriefe)

Newsletter  
[www.spektrum.de/newsletter](http://www.spektrum.de/newsletter)

DIESE UND WEITERE RUBRIKEN FINDEN SIE AUF DER NAVIGATIONSLEISTE UNSERER HOMEPAGE



## Bio-Erdgas aus Pflanzen.

Bio-Erdgas ergänzt die zuverlässige Versorgung mit Erdgas auf umweltfreundliche Weise. Denn Bio-Erdgas wird aus nachwachsenden Rohstoffen erzeugt und leistet einen Beitrag zur Verminderung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes. Perfekt also für die Energieversorgung der Zukunft. Deshalb arbeiten wir daran, dieses Gas so zu veredeln, dass es in die Leitungen eingespeist werden kann. So können unsere Kunden von dieser innovativen und umweltfreundlichen Versorgung direkt profitieren.

Mehr über das Thema Bio-Erdgas erfahren Sie unter [www.eon.com](http://www.eon.com)

**e.on**  
Neue Energie

## Erhöhte Sehschärfe im Weltraum

Fenster ins Gehirn, Dezember 2007

Beim Lesen dieses Artikels ist mir eine interessante Geschichte eingefallen, die Hoimar von Ditfurth in seinem Buch »Der Geist fiel nicht vom Himmel« (1976) in Kapitel 9 unter »Astronauten sehen mehr« erzählt hat.

Er berichtet davon, dass bei den ersten Gemini-Raumflügen Anfang der 1960er Jahre bei den Astronauten außergewöhnliche Sehleistungen entdeckt wurden.

Demnach konnten die Astronauten aus ihrer Himmelsperspektive Gegenstände wie Schiffe oder große LKWs auf der Erdoberfläche erkennen, was angesichts des Auflösungsvermögens des menschlichen Auges unter Normalbedingungen auf der Erde schlicht unmöglich sein sollte.

Bei Überprüfungen wurde dieses Phänomen dann aber bestätigt – es handelte sich nicht um Halluzinationen, die Sehschärfe der Astronauten war im Weltraum offensichtlich deutlich besser.

In der Erklärung wurde auf eine durch die Schwerelosigkeit verminderte Reibung des Auges in der Augenhöhle hingewiesen, wodurch infolge einer Erhöhung »von Ausmaß und Schnelligkeit« des (im Artikel beschriebenen) Augentremors mehr Netzhautzellen bei der Registrierung des Bildes einbezogen werden, was dann zu der erhöhten Sehschärfe bei den Astronauten führen soll.

Ob diese Erklärung heute noch trägt, ist mir nicht bekannt.

Bernd Vier, Dortmund

## Politik müsste handeln

Bessere Vorhersagen von Waldbränden, November 2007

Die Vorhersagemassnahmen von Waldbränden sind gewiss nützlich und notwendig. Jedoch wäre es ebenso wichtig, den menschlichen Brandstiftern endlich wirkungsvoll entgegenzutreten. Zumindest in den Mittelmeerländern dürften über 90 Prozent der Waldbrände von Brandstiftern gelegt sein. Ziel der meisten Brandstiftungen ist es, Land für Bauten und die Landwirtschaft zu gewinnen.

Es gäbe eine sehr einfache Maßnahme, um diesem Ansinnen entgegenzutreten: Was Waldgebiet respektive raumplanerische Waldzone ist, bleibt Waldgebiet/Waldzone, auch nach einem Waldbrand.



Nach einem Waldbrand müsste stets wieder aufgeforstet werden.

Die sehr häufig korrupten Politiker in den betroffenen Ländern stecken mit den Brandstiftern oft unter einer Decke. Wenn ein entsprechendes Gesetz auf der Stufe der Europäischen Union geschaffen würde, wären die Erfolgsaussichten in der Waldbrandbekämpfung vermutlich um ein Mehrfaches besser.

Maurus Candrian, St. Gallen, Schweiz

## Schwerhörigkeit durch zahnärztliche Bohrer

Patient schmerzfreier, Zahnarzt schwerhörig, Leserbriefe, Dezember 2007

Dr. Hohns Ausführungen bedürfen eines Kommentars und einer Richtigstellung. Es ist unbestritten, dass hohe Frequenzen das Gehör stärker schädigen als tiefe. Das betrifft aber nur Frequenzen, die von einem gesunden Gehör wahrgenommen werden können. Die obere Hörgrenze des menschlichen Ohrs liegt bei 16000 bis 20000 Hz. Im Innenohr wird durch einen rein physikalischen Prozess, die Wanderwelle, eine Frequenzanalyse vorgenommen. Dabei wird die Energie der einzelnen Frequenzanteile eines Schallreizes auf die diesen Tonhöhen zugeordneten Sinneszellen verteilt. Frequenzen, die über

der oberen Hörgrenze liegen, wie die im Leserbrief angesprochenen 36 kHz, erreichen darum gar keine Sinneszellen, die geschädigt werden können. Messungen haben ergeben, dass im Schall, der bei Arbeiten mit dem Turbinenbohrer entsteht, auch Frequenzanteile um 5000 Hz erzeugt werden, die eventuell Schäden erzeugen können. Diese berühren aber kaum den für das Sprachverständnis wichtigen mittleren Frequenzbereich.

Nach neueren Messungen sind heute nicht mehr die Turbinenbohrer, sondern die Absauger die lauterer Lärmquellen.

Prof. Harald Feldmann, Altenberge

## Spektrum

DER WISSENSCHAFT

**Chefredakteur:** Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)  
**Stellvertretende Chefredakteure:** Dr. Inge Hoefler (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser  
**Redaktion:** Thilo Körkel (Online Coordinator), Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe, Dr. Adelheid Stahnke;  
 E-Mail: redaktion@spektrum.com  
**Ständiger Mitarbeiter:** Dr. Michael Springer  
**Schlussredaktion:** Katharina Werle (Ltg.), Christina Peiberg (stv. Ltg.), Sigrid Spies  
**Bildredaktion:** Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe  
**Art Direction:** Karsten Kramarczik  
**Layout:** Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Marc Grove, Anke Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer  
**Redaktionsassistent:** Eva Kahlmann, Ursula Wessels;  
**Redaktionsanschrift:** Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Tel. 06 221 9126-711, Fax 06 221 9126-729  
**Verlag:** Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg;  
 Hausanschrift: Slevogtstraße 3-5, 69126 Heidelberg, Tel. 06 221 9126-600, Fax 06 221 9126-751;  
 Amtsgericht Mannheim, HRB 338114  
**Verlagsleiter:** Dr. Carsten Könneker, Richard Zinken (Online)  
**Geschäftsleitung:** Markus Bossle, Thomas Bleck  
**Herstellung:** Natalie Schäfer, Tel. 06 221 9126-733  
**Marketing:** Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06 221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.com  
**Einzelverkauf:** Anke Walter (Ltg.), Tel. 06 221 9126-744  
**Übersetzer:** An diesem Heft wirkten mit: Dr. Markus Fischer, Doris Gerstner, Petra Jacoby, Dr. Rainer Kayser, Dr. Susanne Lipps-Breda, Dr. Markus Pössel

**Leser- und Bestellservice:** Tel. 06 221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.com  
**Vertrieb und Abonnementverwaltung:** Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de  
 Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn  
**Bezugspreise:** Einzelheft € 7,40/5Fr 14,00; im Abonnement € 79,20 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 66,60. Die Preise beinhalten € 7,20 Versandkosten.  
 Bei Versand ins Ausland fallen € 10,20 Portomehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt.  
 Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70)  
**Anzeigen:** GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls; Anzeigenleitung: Jürgen Ochs, Tel. 0211 6188-358, Fax 0211 6188-400; verantwortlich für Anzeigen: Ute Wellmann, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2481, Fax 0211 887-2686  
**Anzeigenvertretung:** Berlin: Michael Seidel, Friedrichstraße 150, 10117 Berlin, Tel. 030 61686-150, Fax 030 6159005; Hamburg: Matthias Meißner, Brandstwiete 1/6, OG, 20457 Hamburg, Tel. 040 30183-184, Fax 040 30183-283; Düsseldorf: Hans-Joachim Beier, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2053, Fax 0211 887-2099; Frankfurt: Axel Ude-Wagner, Eschersheimer Landstraße 50, 60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 2424-4507, Fax 069 2424-4555; Stuttgart: Andreas Vester, Weraststraße 23, 70182 Stuttgart, Tel. 0711 22475-21, Fax 0711 22475-49; München: Bernd Picker, Josephspitalstraße 15/IV, 80331 München, Tel. 089 545907-18, Fax 089 545907-24  
**Druckunterlagen an:** GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686  
**Anzeigenpreise:** Gültig ist die Preisliste Nr. 29 vom 01.12.2007.

**Gesamtherstellung:** Vogel Druck- und Medienservice GmbH & Co. KG, 97204 Höchberg  
 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 der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH 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: © 2008 (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. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.  
 ISSN 0170-2971  
**SCIENTIFIC AMERICAN**  
 415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111  
 Editor in Chief: John Rennie, Chairman: Brian Napack, President: Steven Yee, Vice President and Managing Director, International: Dean Sanderson, Vice President: Frances Newburg, Circulation Director: Christian Dorbrandt, Vice President and Publisher: Bruce Brandfon  

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


## Klimawandel als komplexes System

Falsche Klimaskeptiker, Kommentar, Januar 2008

»Umwelt« ist nicht nur ein neues wissenschaftliches Thema, sondern erfordert auch meist eine neue wissenschaftliche Denkweise, die gelegentlich als ganzheitlich oder komplex bezeichnet wird. Gerade mit dem Thema »Klimawandel« lässt sich die Komplexität aus wissenschaftlichen, gesellschaftlichen, politischen und wirtschaftlichen Verflechtungen erläutern. Dazu habe ich folgende Argumentationskette zusammengetragen:

**1.** Was sich ändert: Die Menschheit führt der Atmosphäre jährlich zirka 22 Milliarden Tonnen (Gt) zusätzliches Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) zu. Dies entspricht etwa 1 Prozent des atmosphärischen CO<sub>2</sub> von 2200 Gt. In den letzten 100 Jahren ist der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Atmosphäre um etwa 15 Prozent, von unter 330 ppm auf fast 380 ppm, gestiegen.

**2.** Was bleibt: Die Biosphäre tauscht jährlich etwa ein Viertel des gesamten CO<sub>2</sub> mit der Atmosphäre, also etwa 440 Gt und somit das Zwanzigfache des menschlichen Beitrags. Das zusätzliche CO<sub>2</sub> ist damit in erster Näherung vernachlässigbar und dient im Wesentlichen der Assimilation der Pflanzen.

**3.** Was sich dennoch ändert: Die Temperatur der Atmosphäre wird vorwiegend durch Wasserdampf bestimmt. Das IPCC behauptete 1988, dass bereits eine geringe Temperaturerhöhung der Atmosphäre – durch zusätzliches CO<sub>2</sub> – auch mehr Wasserdampf in der Atmosphäre nach sich zieht und in der Folge das gesamte Gleichgewicht destabilisiert.

**4.** Was dennoch bleibt: Die unterjährigen Schwankungen des CO<sub>2</sub>-Gehalts mit den Jahreszeiten ist größer als die langjährigen Zuwächse – und doch folgt jedes Jahr der Winter dem Sommer. Offenbar destabilisiert sich das Klima nicht so leicht. Ein höherer CO<sub>2</sub>-Gehalt führt zu schnellerem Pflanzenwachstum, eine höhere Temperatur zur Ausbreitung der Vegetation und längeren Wachstumsperioden in den nördlichen Breiten, ein höherer Wassergehalt der Atmosphäre ermöglicht Wachstum auch in trockenen Bereichen der Erde ..., wodurch wiederum CO<sub>2</sub> gebunden wird.

**5.** Was sich aber noch ändert: Der er-

höhte Austausch zwischen den Sphären (Atmo-, Hydro-, Litho-, Bio-, Glazio-, Strato-, Ozono- etc.) führt zu Katastrophen wie Wirbelstürmen, Gletscherschmelzen, Überschwemmungen, Dürren und anderen.

**6.** Was aber noch bleibt: Erd- und menschengeschichtlich hat es solche Katastrophen immer wieder gegeben. Auch bleiben viele Änderungen ohne weitere Auswirkungen, weil beispielsweise der Meeresspiegel durch das Schmelzen von Meereis nicht steigt und am Südpol durch mehr Feuchtigkeitsaustausch auch mehr Eis aufgebaut wird. Wüstenstürme tragen Mineralien weit in die Ozeane, sodass dort wiederum das Plankton mehr CO<sub>2</sub> bindet.

**7.** Was sich darüber hinaus ändert: Die Häufung von Klimakatastrophen führt zu humanitären Notständen – Vertreibung, Kriegen, Kulturverlust ...

**8.** Was darüber hinaus bleibt: Die humanitären Notstände bestehen eher auf Grund von politischen, ethnischen, religiösen, wirtschaftlichen Konflikten. Warum sollten die die Anstrengungen auf Umwelt und Klima fokussiert werden, anstatt zunächst am Fortschritt der Zivilisation zu arbeiten? Außerdem zeigen historische Betrachtungen und Berechnungen, dass sich die Menschheit in einer Warmzeit besser ausbreiten kann und die Kultur erblüht ...

**9.** Was sich also ändert: Der Klimawandel ist eine neue technische Herausforderung, die sich in dieser Weise nie zuvor gezeigt hat. Bisher war weder der Einfluss menschlichen Lebens auf das globale Klima so stark noch konnte man technisch den Klimawandel stoppen. Zumindest gehört das Thema damit auf die Tagesordnung für wissenschaftliche Diskussionen und gibt Impulse für das Verständnis der Natur und den technischen Fortschritt.

Skepsis ist eine wichtige Form von wissenschaftlichem Denken, die wir in unserer modernen Orientierung am technisch Machbaren aus den Augen verloren haben – die wir aber zum »ganzheitlichen Denken« und der Erforschung komplexer Systeme beachten müssen.

Prof. Karsten Löhr, Ulm

## Exponent abgestürzt

Dunkle Energie, Dezember 2007

In diesem Beitrag hat sich auf S. 47, rechte Spalte, erste Zeile ein in quantitativer Hinsicht erheblicher Druckfehler eingeschlichen: In der Inflationsphase kurz nach dem Urknall hat sich der Skalenfaktor des Universums nicht um 1050, sondern um 10 hoch 50 (!) vergrößert.

Außerdem ist es doch etwas unvollständig, Einstein als »Schweizer« Physiker zu titulieren. Er hatte zwar ab 1901 die schweizerische Staatsangehörigkeit, war aber erstens ab Geburt Württemberger, war zweitens in seiner Berliner Zeit informell preußischer Staatsbürger (dank eines seiner Ämter) und drittens wurde ihm 1940 zusätzlich die amerikanische Staatsbürgerschaft zuerkannt. Aktiver Wohnbürger der Schweiz mit eidgenössischem Pass war Einstein von 1901 bis 1911 und nochmal von 1912 bis 1914, also knapp ein Sechstel seines 76-jährigen Lebens.

Dr. Gottfried Beyvers, Ergoldsbach

## Errata

Hell wie tausend Galaxien  
Januar 2008

Am Ende der S. 38 wurde versehentlich eine Zeile gelöscht. Der Satz muss heißen: Grund ist vor allem die in den Jets entstehende Synchrotronstrahlung, die durch Stoßprozesse noch verstärkt wird.

»Wie Frösche um einen Teich«  
Januar 2008

Der heutige Name von Naxos lautet nicht Gardini Naxos, wie versehentlich auf der Karte, S. 86, als auch in der Liste, S. 87, angegeben, sondern Giardini Naxos.

Die Redaktion

## Briefe an die Redaktion ...

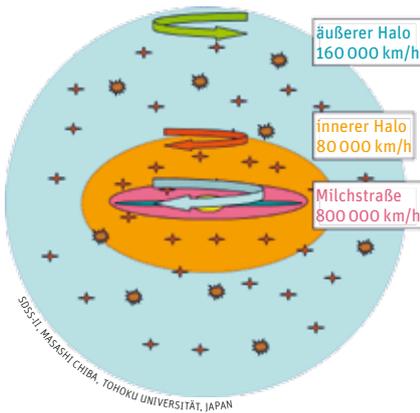
... sind willkommen! Tragen Sie Ihren Leserbrief direkt in das Online-Formular beim jeweiligen Artikel ein (klicken Sie unter [www.spektrum.de](http://www.spektrum.de) auf »Aktuelles Heft« beziehungsweise »Hefetarchiv« und dann auf den Artikel).

Oder schreiben Sie mit Ihrer vollständigen Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft  
Frau Ursula Wessels  
Postfach 10 48 40  
69038 Heidelberg (Deutschland)  
E-Mail: [leserbriefe@spektrum.com](mailto:leserbriefe@spektrum.com)

## ASTRONOMIE

### Gegenverkehr im Milchstraßen-Halo



Die rotierende Scheibe der Milchstraße wird von einer kugelförmigen Hülle umschlossen. Dieser so genannte Halo enthält alte Sonnen, Kugelsternhaufen und Dunkle Materie. In jüngster Zeit gab es Hinweise, dass er aus zwei unterschiedlichen Komponenten besteht. Dazu zählten Untersuchungen des chemischen Aufbaus von Sternen im Halo-Innenen. Sie basierten allerdings nur auf kleinen Stichproben.

Nun haben Astronomen um Daniela Carollo vom Osservatorio Astronomico in Turin die bislang umfangreichste Analyse durchgeführt. Sie beruht auf Daten von mehr als 20 000 Sternen aus der Hülle der

Der Halo der Milchstraße besteht aus zwei Hüllen, die in entgegengesetzter Richtung rotieren.

Milchstraße, die im Rahmen des Sloan Digital Sky Survey vermessen wurden. Die neue Untersuchung ergab eklatante Unterschiede zwischen innen und außen.

So rotieren die Komponenten des inneren Halos im selben Drehsinn wie die galaktische Scheibe, allerdings viel langsamer – mit 80 000 gegenüber 800 000 Kilometern pro Stunde. Die äußeren Sterne dagegen fliegen doppelt so schnell in entgegengesetzter Richtung. Auch die Zusammensetzung ist deutlich verschieden. Die Sterne der inneren Hülle enthalten dreimal so viele schwere Elemente wie die der äußeren. Vermutlich stammen sie von massereichen Galaxien, die gleichsinnig mit der Milchstraße rotierten und von ihr verschluckt wurden. Später gerieten dann kleinere Sternsysteme, die sich in die entgegengesetzte Richtung drehten, in den Einfluss unserer heimatlichen Welteninsel und wurden von deren Gezeitenkräften zerrissen. Ihre Sterne sammelten sich im äußeren Halo.

Nature, Bd. 450, S. 1020

## HAFTMOLEKÜLE

### Auf die Pelle gerückt

Die Haut ist mit bis zu zwei Quadratmeter Fläche das größte Organ des Menschen. Für den Zusammenhalt dieses weitläufigen Zellverbunds sorgen so genannte Cadherine. Diese Proteine heften benachbarte Zellen aneinander. Wie sie das tun,

war bisher allerdings unbekannt. Deshalb haben Forscher um Achilleas Frangakis vom Europäischen Molekularbiologischen Labor in Heidelberg die Struktur der Haut nun mittels Kryoelektronentomografie auf molekularer Ebene analysiert.

Diese noch sehr junge Methode ermöglicht weitaus detailliertere Einblicke in biologische Strukturen unter natürlichen Bedingungen als die normale Lichtmikroskopie. Dabei werden von eingefrorenen Proben aus den verschiedensten Blickwinkeln elektronenmikroskopische Aufnahmen angefertigt und am Computer zu einer dreidimensionalen Ansicht zusammengefügt.

Dank der so erreichten Detailschärfe ließ sich bei Hautzellen die Wechselwirkung zwischen den Cadherinen nun direkt beobachten. Man sieht, wie die Adhäsionsproteine fadenartig aus der Zellmembran herausragen und sich wie bei einem Klettverschluss ineinander verhaken.

Nature, Bd. 450, S. 832



## TARNKAPPE

### Unsichtbar im Infrarot

Objekte sind sichtbar, weil sie Licht reflektieren. Eine perfekte Tarnkappe müsste die elektromagnetischen Wellen somit nur derart um einen Gegenstand herumlenken, dass sie sich dahinter wieder vereinigen. Um Licht auf eine solche gebogene Bahn zu zwingen, braucht man jedoch ein Medium mit negativem Brechungsindex.

So genannte Metamaterialien mit dieser ungewöhnlichen Eigenschaft lassen sich seit einigen Jahren tatsächlich herstellen. Sie bestehen gewöhnlich aus periodisch angeordneten, hufeisenförmigen Metallstücken, die als Schwingkreise wirken. Einen negativen Brechungsindex hat ein solches Metamaterial allerdings nur für Strahlung, deren Wellenlänge kleiner als die Hufeisen ist. Eine Tarnkappe ließ sich deshalb bisher lediglich für Mikrowellen realisieren – und auch das ausschließlich zweidimensional. Dreidimensionale Gitter aus so winzigen Strukturen zu erzeugen, dass sie sichtbares



Licht »rückwärts« brechen, erwies sich als extrem schwierig.

Forscher um Harald Gießen von der Universität Stuttgart haben das nun zumindest für Infrarotstrahlung geschafft. Mit einem speziellen Verfahren auf lithografischer Basis konnten sie nicht nur ein entsprechend kleines zweidimensionales Hufeisengitter erzeugen, sondern es auch in vier Lagen übereinanderschichten. Im Prinzip lassen sich mit ihrer Methode beliebig dicke Schichtstapel im Nanomaßstab produzieren. Statt einer Tarnkappe haben die Stuttgarter Forscher allerdings nützlichere Anwendungen im Sinn – etwa Linsen, die Licht auf einen Fleck fokussieren, der schmaler ist als die halbe Wellenlänge.

Nature Materials, Bd. 7, S. 31

SONNENSYSTEM

## Fliegende Untertassen um Saturn

■ Mehr als ein Dutzend kleiner Monde umkreisen den Saturn innerhalb seines Ringsystems. Der gängigen Theorie zufolge ist ihr Ursprung eng mit der Entstehung der Ringe verbunden: Nach der Kollision kosmischer Eisklumpen oder früher Monde legte sich ein Großteil der kleinen Trümmer in Ringen um den Gasriesen, während die größeren Bruchstücke Satelliten bildeten.

Die Raumsonde Cassini hat die inneren Monde des Saturns nun exakt vermessen. Demnach weisen sie nur eine sehr geringe Dichte auf und sind zudem porös. Das spricht für ihre nachträgliche Entstehung aus kleineren Teilchen. Mit den neuen Daten modellierten Wissenschaftler um Carolyn Porco vom Cassini Imaging Central Laboratory for Operations in Boulder (USA) nun ein Entwicklungsszenario für die Trabanten, das die bisherige Theorie deutlich modifiziert.

Die Trümmerstücke früherer Kollisionen bilden demnach lediglich den Kern der Monde. Bis zu zwei Drittel ihrer Größe dürften die Trabanten erst allmählich hinzugewonnen haben, indem sie umliegendes Material aus den Saturnringen auf-sammelten. Dabei wuchsen sie, bis sie alle Partikel ihrer Umgebung verschluckt hatten – oder so groß geworden waren, dass sie von den Gezeitenkräften des Saturns zerrissen wurden.

Besonders kurios verlief die Entwicklung der Monde Atlas und Pan: Wahrscheinlich lagerten sie erst Material an, nachdem sich die Ringe des Saturns abgeflacht hatten. Am Äquator sind sie deshalb besonders breit und ähneln somit fliegenden Untertassen.

*Science, Bd. 318, S. 1602*



ILLUSTRATION: CEA / ANIMEA

Der kleine Mond Atlas, der den Saturn in dessen Ringsystem umkreist, sieht aus wie eine fliegende Untertasse.

AFFEN

## Behaarte Zahlenakrobaten

■ Die Schimpansendame Ai hat ein Faible für Mathematik. Gemeinsam mit ihrem Lehrer Tetsuro Matsuzawa von der Universität Kioto übt sie seit nunmehr zwei Jahrzehnten Zählen – mit beachtlichem Erfolg: Den Zahlenraum zwischen eins und neun beherrscht sie mittlerweile so perfekt, dass ihr das für ihresgleichen einmalige Kunststück gelang, Mengen nach der Größe zu ordnen und die Anzahl der enthaltenen Objekte korrekt zu beziffern.

Doch wie gut ist das Zahlengedächtnis von Affen wirklich? Selbst Biologen würden spontan sagen: bestimmt schlechter als unseres. Um das zu prüfen, unterzog Matsuzawa nun Universitätsstudenten und Schimpansen einem numerischen Gedächtnistest. Für die Affen traten drei Weibchen mit ihrem fünfjährigen Nachwuchs an – darunter auch Ai mit ihrem Sohn Ayumu. Sie alle hatten zuvor die aufsteigende Reihe der arabischen Ziffern gelernt.

Diese Ziffern erschienen im Versuch durcheinandergewürfelt auf einem berührungsempfindlichen Bildschirm und wurden nach kurzer Zeit verdeckt. Aus dem Gedächtnis mussten die Teilnehmer dann dorthin deuten, wo die Zahlen in der Reihenfolge von 1 bis 9 gestanden hatten. Die jungen Schimpansen lösten die Aufgabe am schnellsten und mit den wenigsten Fehlern. Anders als bei den Studenten und den erwachsenen Affen verschlechterte sich ihre Trefferquote auch nicht, als die Forscher die Zeit zum Einprägen verkürzten. Am besten schnitt Ais Sohn Ayumu ab – er hat sein Zahlentalent wohl von der Mutter geerbt.

*Current Biology, Bd. 17, S. R1004*

**Auch nachdem die ungeordneten Ziffern auf dem Bildschirm verdeckt worden waren, konnten Affen anzeigen, wo sie in der Reihenfolge von 1 bis 9 gestanden hatten.**



TETSURO MATSUZAWA, KIOTO UNIVERSITÄT, JAPAN



TU BRAUNSCHWEIG, PRESSESTELLE

Da der neue molekulare Entfesselungskünstler luftempfindlich ist, betrachten ihn Forscher hier in gelöster Form in einer Handschuhbox unter Schutzgas.

## CHEMIE

## Entfesselungstrick mit Dreifachbindung

■ Bindungen zwischen Kohlenstoffatomen sind sehr stabil. Den einen Partner gegen einen anderen auszutauschen gelang deshalb lange nur auf komplizierten Umwegen. Umso frappierender war vor einiger Zeit die Entdeckung, dass ein solcher Tausch mit einem geeigneten Katalysator in einem einzigen Schritt möglich ist. Was noch mehr verwunderte: Dabei werden statt gewöhnlicher Einfach- sogar die besonders festen Doppelbindungen gebrochen und wieder geknüpft. Diese so genannte Metathese eröffnete ganz neue Synthesen unter schonenden Bedingungen und trug ihren Entdeckern deshalb 2005 den Nobelpreis ein.

Wissenschaftlern um Matthias Tamm von der Technischen Universität Braunschweig ist der gleiche Trick nun mit den noch festeren Dreifachbindungen gelungen – und zwar erstmals bei Raumtemperatur.

Schlüssel zum Erfolg war auch hier die Entwicklung geeigneter, inzwischen zum Patent angemeldeter Katalysatoren. Es handelt sich um Imidazolin-2-iminato-Alkyldinwolfram-Komplexe. Darin ist das Metall über eine Dreifachbindung mit einem Kohlenstoffatom verknüpft. Dadurch kann es den Paartausch zwischen anderen dreifach aneinander gebundenen Kohlenstoffatomen vermitteln, indem es sich ihnen vorübergehend als Bindungspartner zur Verfügung stellt.

Erste Anwendungen hat das Verfahren bereits bei der Synthese pharmakologisch aktiver Wirkstoffe gefunden. Zudem vereinfacht es die Herstellung von Farbstoffen für organische Leuchtdioden, die biegsame Bildschirme aus Plastik ermöglichen sollen. Erprobt wird auch sein Einsatz zur Synthese von Schmetterlingsduftstoffen.

*Angewandte Chemie, Bd. 119, S. 9047*

## INSEKTEN

## Umsturz im Bienenstaat

■ Kapbienen-Königinnen beherrschen die Jungfernzeugung und können so für ihre eigene Nachfolge gezielt Tiere hervorbringen, die identische Kopien von ihnen sind. Dadurch werden sie genetisch unsterblich und sichern ihrer klonalen Abstammungslinie die fortdauernde Herrschaft.

Allerdings nur theoretisch; denn bei den Kapbienen sind auch die Arbeiterinnen zur Jungfernzeugung fähig und bringen ebenfalls Klone von sich hervor. Bei anderen Bienenarten können Arbeiterinnen zwar gelegentlich Eier legen; doch entwickeln sich daraus nur Drohnen, die von eifersüchtigen Mitbewohnerinnen sofort aus der Brut entfernt werden. Da die geklonte Tochter mit ihrer Mutter genetisch identisch ist, wird sie dagegen geduldet. Dieser Domestikennachwuchs aber kann der

Königin den Herrschaftsanspruch streitig machen. Das entdeckten nun Forscher um Madeleine Beekman von der Universität Sydney (Australien), als sie die genetische Abstammung einzelner Kapbienen in sieben Bienenstöcken mit insgesamt 39 Weiselzellen untersuchten – das sind jene speziellen Waben, in denen die künftigen Königinnen aufgezogen werden. Das Ergebnis: Nur 16 Brutstätten enthielten tatsächlich Klone der Herrscherin – achtmal hatten dort hingegen Arbeiterinnen ihre geklonten Töchter untergebracht. In 15 Fällen stammte die Brut sogar von stockfremden Bienen. Diesen gelingt es offenbar problemlos, sich bei einem anderen Bienenvolk einzunisten – und dort ihr eigenes Herrschergeschlecht zu begründen.

*Proceedings of the Royal Society B, Bd. 275, S. 345*

## PALÄONTOLOGIE

## Würgerpilz aus dem Erdmittelalter

■ Dieser Pilz kannte keine Gnade. Er legte seine fadenförmigen Hyphen zu Schlaufen aus. Sobald ein Opfer – in der Regel ein Fadenwurm – hineingeriet, zog sich die Schlinge zu. Doch damit nicht genug: Um sicherzustellen, dass die Beute nicht entwischen konnte, sonderte der Ring ein klebriges Sekret ab. Für den Nematoden gab es nun kein Entrinnen mehr. Langsam begann der Pilz in das Tier hineinzuwuchern – und es dabei ganz allmählich zu verdauen.

Der hinterhältige Räuber lebte schon vor etwa 100 Millionen Jahren. Damit ist er der älteste bekannte Vertreter der fleischfressenden Pilze, die heute mit mehr als 200 Arten auf der Erde vorkommen. Forscher um Alexander Schmidt vom Museum für Naturkunde der Humboldt-Universität in Berlin entdeckten ihn in Bernstein aus dem Südwesten Frankreichs. Darin sind Hyphen zu erkennen, von denen Schlingen abzweigen. Diese haben sich in manchen Fällen zu Ringen geschlossen und abgelöst.



Dieser Ring in einem etwa 100 Millionen Jahre alten Bernstein ist die Schlingfalle eines fleischfressenden Pilzes.

MUSEUM FÜR NATURKUNDE BERLIN UND SCIENCE/AAAS

In ihrer Nähe befinden sich Nematoden als potenzielle Opfer.

Von einigen Hyphen knospen auch seitlich Sporen aus, aus denen teils hefeartige Kolonien hervorgegangen sind. Demnach bildet der Räuber, der einst in einem küstennahen Wald lebte, offenbar ein Übergangsstadium zwischen einer aquatischen Form ähnlich den Hefen zu jenen modernen fleischfressenden Pilzen, die im Boden leben.

*Science, Bd. 318, S. 1741*

**Mitarbeit:** Christoph Marty

## »Kuckuck« im Ameisennest

Auf besonders dreiste Art ahmt ein Schmetterling in Dänemark den Kuckuck nach: Er lässt seinen Nachwuchs von Ameisen großziehen. Die Insekten halten die Raupen für verirrte Larven aus ihrer Kolonie, schleppen sie ins Nest und füttern sie auf Kosten der eigenen Brut. Forscher um David Nash an der Universität Kopenhagen fanden nun die Ursache der Täuschung: Der Ameisenbläuling stattet seinen Nachwuchs mit einer Haut aus, die derjenigen von Larven der Roten Gartenameise chemisch stark ähnelt. So fallen die Insekten auf den Geruch herein. Wie meist in solchen Fällen ist inzwischen aber ein Wetttrüsten zwischen Betrüger und Opfer in Gang gekommen. Wie die Forscher entdeckten, haben vereinzelte Ameisenkolonien angefangen, die chemische Zusammensetzung der Larven-Kutikula abzuwandeln, sodass sie vom Imitat wieder unterscheidbar wird.



DAVID NASH, UNIVERSITÄT KOPENHAGEN

ERDERWÄRMUNG  Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe [www.spektrum.de/audio](http://www.spektrum.de/audio)

## Klimaküche Feuerland

Wo Atlantik und Pazifik aneinandergrenzen und Südamerika fast die Antarktis berührt, steckt ein Schlüssel zum Verständnis der jüngsten Klimaentwicklung. Bei Bohrungen dort fanden sich Hinweise auf eine unerwartet frühe Erwärmung nach dem Ende der letzten Eiszeit.

Von Ingmar Unkel

Der Sturm peitscht das Meer zu immer höheren Wellen auf. Tapfer stemmt sich der »Ocean Tramp«, ein kleiner, zweimastiger Motorsegler, gegen die Naturgewalten und bahnt sich seinen Weg durch den Beagle-Kanal nach Osten. Unter Deck umklammern zehn Wissenschaftler ihre Kaffeetassen, als ob sie daran Halt auf dem schwankenden Boot finden könnten. Es ist November und eigentlich Frühling in Feuerland, der südlichsten Region Südamerikas. Aber das Wetter schlägt hier zu jeder Jahreszeit Kapriolen; Schneeschauer und Sonnenschein wechseln sich fast minütlich ab.

War das schon immer so? Welche Klimabedingungen herrschten hier vor 1000, ja 10000 Jahren? Waren die Verhältnisse am Ende der letzten Eiszeit vielleicht noch ungemütlicher? Genau das möchte die Crew von Klimaforschern aus Schweden und Argentinien herausfinden.

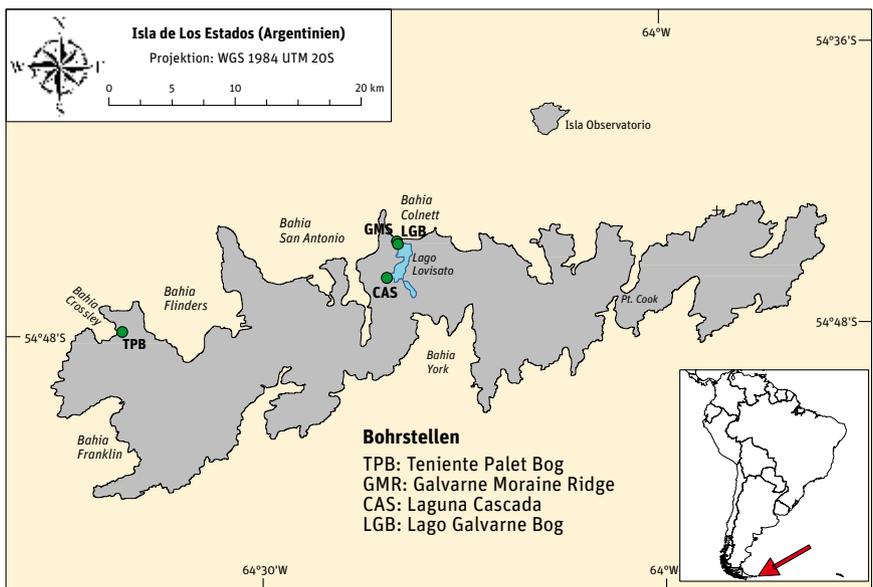
Schon vor 110 Jahren veröffentlichte Otto Nordenskjöld seine »Wissenschaftlichen Ergebnisse der schwedischen Ex-

pedition nach den Magellansländern«. In diesem detaillierten Bericht zur Geografie und Botanik von Feuerland präsentiert der Geologe und Polarforscher die erste rekonstruierte Karte der Südspitze Südamerikas während der letzten Eiszeit. Demnach bedeckten Gletscher damals weite Teile der Anden – dort, wo heute dichter Wald und Fjorde die Landschaft prägen. Die Schelfgebiete südöstlich des heutigen Festlands waren wegen des etwa hundert Meter niedrigeren Meeresspiegels trockengefallen. Heute liegen sie unter Wasser, doch an ihrem Westrand erhebt sich ein zwanzig Kilometer langer und mehrere hundert Meter hoher Berg Rücken, in den die Gletscher der Eiszeit tiefe Täler geschnitten haben. Er bildet eine Insel mit zahlreichen Fjorden: die Isla de los Estados (Staaten-Insel). Dort liegt das Ziel der Forscher an Bord des »Ocean Tramp«.

Aufgebrochen ist das Boot im Hafen von Ushuaia (gesprochen: Uswaja), Argentinien südlichster Stadt. Gut einen Tag später geht es in einer geschützten Bucht auf der Nordseite der Isla de los

Estados vor Anker. Die Insel steht seit 1991 unter Naturschutz. Abgesehen von gelegentlichen Patrouillebesuchen durch die argentinische Marine ist sie unbewohnt. Genau das macht sie so interessant: Hier war die Natur über Jahrtausende ungestört von menschlichen Eingriffen. Für die Forscher heißt das aber zugleich, für die nächsten zwei Wochen auf die Annehmlichkeiten der Zivilisation zu verzichten. Und absolute Wildnis bedeutet auch, dass es keine Wege durch den dichten Wald aus *Nothofagus*-Bäumen gibt. Die Scheinbuchen, wie sie auf Deutsch heißen, bedecken die Insel bis zu einer Höhe von 300 Metern über dem Meer. Inmitten des Waldgebiets liegen vereinzelt idyllische Lichtungen mit Mooren und Seen. Auf sie haben es die Forscher abgesehen.

Vertiefungen im Gelände, in denen sich Wasser sammelt, sodass sich Seen, Sümpfe und Moore bilden, sind hervorragende Klimaarchive. Wenn es im Frühjahr taut, spülen die Schmelzwasserströme Teile des Bodens mit in die Senke. Während der Blütezeit entlassen die Bäu-



Die Staaten-Insel liegt lang gezogen vor der Südspitze Südamerikas (Pfeil). An vier Stellen (grüne Punkte) – drei davon an der Küste und eine im Landesinneren – bohrten schwedische und argentinische Wissenschaftler bis zu zehn Meter tief in Moore und den Boden am Rand von Seen, um Informationen über das Klima gegen Ende der letzten Eiszeit zu gewinnen.



**Oben:** Während der letzten Eiszeit war die Staaten-Insel von mächtigen Gletschern bedeckt, die den schroffen Untergrund abschmirgeln und den Tälern ihre sanfte Form gaben. Heute erstreckt sich bis in eine Höhe von 300 Metern ein dichter Scheinbuchen-Wald.

**Unten:** Die Klimaforscher haben ein Torfmoor ausfindig gemacht, das sie nun beproben wollen. Die gesamte Ausrüstung zum Bohren müssen sie auf den eigenen Schultern vom Boot durch das unwegsame Gelände herschleppen. Es gibt hier weder Straßen noch Lasttiere.



BEIDE FOTOS: KARL LUNG, UNIVERSITÄT LUND



me Pollen in die Luft, von denen ein Teil im See landet oder sich in dem frisch grünenden Torfmoos verfängt. Stürme im Herbst tragen feine Salzwassertröpfchen vom Meer oder Staub von unbewachsenen Landflächen herein. Im Winter sterben die Algen im See ab und sinken zu Boden. Auch das Torfmoos verwelkt und wird langsam zu Humus.

Auf diese Weise wächst Jahr um Jahr die Sedimentschicht – sei es am Boden des Sees oder unter der Moosdecke – um wenige Millimeter. Die Ablagerungen geben Zeugnis von den biologischen, chemischen und physikalischen Bedingungen, unter denen sie entstanden sind. Daraus aber können Klimaforscher die ehemaligen Witterungsverhältnisse erschließen.

»Wir mussten mehrere Tage lang erst einmal weite Teile der Insel kartieren, bis wir schließlich vier viel versprechende Senken ausgemacht hatten«, berichtet Per Möller, Quartärgeologe an der Universität Lund. »Auf Grund ihrer Lage und Größe dürfte in ihnen die Geschichte der Insel bis vor mindestens 10 000 Jahren, also seit dem Ende der letzten Eiszeit, aufgezeichnet sein.«

Um Proben aus den mehrere Meter mächtigen Sedimentarchiven zu gewinnen, müssen die Forscher Bohrkerne ziehen; das geschieht mit purer Muskelkraft, denn großes, schweres Bohrgerät in das unwegsame Gelände zu bringen wäre nur mit hohem Aufwand möglich und entsprechend teuer. Zum Glück sind Torf und Gytta – ein Faulschlamm-sediment, das die Böden vieler solcher Seen bedeckt – so weich, dass zwei kräf-

tige Männer den Bohrkopf, der je nach System zwischen fünf und acht Zentimeter dick ist, bis zu zehn Meter in den Untergrund rammen können. Mit einem speziell konzipierten Mechanismus befördern die Forscher dann – der Reihe nach von oben nach unten – je einen Meter lange Bohrkernsegmente ans Tageslicht.

Noch vor Ort beschreiben Jorge Rabbassa von der Universität Ushuaia und seine Kollegen grob die geologische Beschaffenheit und das Aussehen des Sediments und notieren die Tiefe, aus der es stammt. Dann werden die kostbaren Bohrkernsegmente in Plastikschränken sorgsam verpackt. Die genaue Analyse findet später im Labor statt.

### Unerwartet früher Eisrückzug

Als Erstes wollen die Forscher immer wissen, wie alt die Sedimente in dem Bohrkern sind; denn für die Rekonstruktion des Klimas vergangener Zeiten kommt es auf eine möglichst genaue Datierung an. »Aber gerade das ist in unserem Fall besonders schwierig, weil es im Unterschied zu Eisbohrkernen oder Baumringen keine abzählbaren Jahreslagen gibt«, erläutert Fidel Roig, argentinischer Spezialist für Altersbestimmungen. Meist wird daher eine Radiokarbon-datierung der organischen Bestandteile im Sediment vorgenommen. Aus den Ergebnissen lassen sich mit ausgefeilten Statistikprogrammen Modelle berechnen, die für jede Tiefe des gewonnenen Bohrkerns ein Alter mit einem statistischen Schwankungsbereich liefern.

Die Proben von der Staaten-Insel nehmen die schwedischen Forscher mit in

Schwedische und argentinische Wissenschaftler entnehmen mit einem Kammerbohrer in einem Torfmoor in der Crossley-Bucht im äußersten Nordwesten der Insel Bodenproben (links). Durch den dichten Scheinbuchenwald auf der Staaten-Insel gab es oft kaum ein Durchkommen (unten).



ihr Institut an der Universität Lund, das über ein spezielles Labor für Radiokarbon-datierungen verfügt. Und ein halbes Jahr nachdem die Bohrkernsegmente die Reise um die halbe Welt nach Schweden angetreten haben, sorgen die ersten Ergebnisse für eine Überraschung: Eines der strandnahen Torfmoore auf der Nordseite der Insel, von den Forschern »Lago Galvarne Bog« getauft, hat sich schon vor etwa 16 000 Jahren zu bilden begonnen.

»Das bedeutet, dass die Küstenbereiche der Insel so früh bereits wieder von den Gletschern der Eiszeit befreit waren und dort ein Klima herrschte, das die Entstehung von Mooren zuließ«, erklärt Svante Björck, Kopf der Expedition und Leiter des Quartärgeologischen Instituts der Universität Lund. In Skandinavien hielt sich die Vereisung deutlich länger, nämlich bis vor ungefähr 10 000 Jahren.

Auch andere Klimaarchive in Südamerika und der Antarktis deuten darauf hin, dass das große Tauen am Ende der letzten Eiszeit auf der Südhalbkugel früher einsetzte als im Norden. Die Erwärmung wurde dann vermutlich über die ozeanische Zirkulation nach Norden weitergegeben und befreite schließlich auch Europa aus dem Griff des Eises. Wie schnell laufen solche Prozesse ab? Entwickeln sich die langfristigen Klimaschwankungen auf der Nord- und Südhemisphäre gegenphasig in Form einer so genannten bipolaren Wippe? Oder verlaufen sie parallel, aber mit einer Phasenverschiebung von mehreren hundert oder sogar tausend Jahren?

Das sind Fragen, über die derzeit intensiv geforscht wird. Die Staaten-Insel



Einen Meter lang ist das Bohrkernsegment (oben) vom Torfmoor am Lago Galvarne an der Nordküste der Staaten-Insel. Die Sedimente darin haben sich über einen Zeitraum von 1400 Jahren hinweg abgelagert. Im Bohrkern vom Rand der Laguna Cascada (rechts ein Ausschnitt) erscheint in einer Tiefe von 2,80 Metern eine Lage Sand. Vermutlich haben ihn starke Niederschläge vor etwa 5500 Jahren in den See gespült.



BEEDE FOTOS: KARL LÜJUNG, UNIVERSITÄT LUND

bildet dabei eine der Schlüsselregionen. Vom Atlantik umschlossen, aber nicht weit von Südamerika und der Antarktis entfernt, liegt sie meteorologisch im Bereich des südlichen Westwindgürtels, während sie ozeanisch durch die antarktische Zirkumpolarströmung beeinflusst wird. Dadurch sind in ihren Sediment-

archiven sämtliche Schwankungen und Verlagerungen dieser beiden wichtigen Akteure im globalen Klimageschehen verzeichnet.

Ein zweiter Kern vom flachen Rand eines Sees im Inneren der Insel, der den Namen »Laguna Cascada« (Wasserfall-Lagune) bekommen hatte, war an seiner

Basis ebenfalls rund 16000 Jahre alt. Doch erzählt er eine etwas andere Geschichte als das strandnahe Moor vom Lago Galvarne. Die ältesten Ablagerungen bestehen hier aus hellen Tonen, die an zerriebenes Gestein aus dem Abfluss von Gletschern (»Gletschermilch«) erinnern. Erst nach etwa zwanzig Zenti-

ANZEIGE

# Konzentrierter. Belastbarer. Ausgeglichener.

**Aktivieren Sie Ihre Kraftwerke der Konzentration.** Konzentration ist Ihre Eintrittskarte zu geistiger Fitness – und die können Sie stärken und zur Höchstform bringen. Ihr Gehirn hat das Potenzial, ein Leben lang konzentriert und geistig aktiv zu sein. Die Energie dazu liefern Ihnen Ihre 100 Milliarden Gehirnzellen. Aktivieren Sie Ihre Gehirnzellen – jetzt NEU auch mit **Tebonin® konzent 240 mg**.



**Tebonin®**

Mehr Energie für das Gehirn.  
Bei nachlassender mentaler Leistungsfähigkeit.

**Tebonin® konzent 240 mg** 240 mg/Filmtablette. Für Erwachsene ab 18 Jahren. **Wirkstoff:** Ginkgo-biloba-Blätter-Trockenextrakt. **Anwendungsgebiete:** Zur Behandlung von Beschwerden bei hirnrnorganisch bedingten mentalen Leistungsstörungen im Rahmen eines therapeutischen Gesamtkonzeptes bei Abnahme erworbener mentaler Fähigkeit (demenzielles Syndrom) mit den Hauptbeschwerden: Rückgang der Gedächtnisleistung, Merkfähigkeit, Konzentration und emotionalen Ausgeglichenheit, Schwindelgefühle, Ohrensausen. Bevor die Behandlung mit Ginkgo-Extrakt begonnen wird, sollte geklärt werden, ob die Krankheitsbeschwerden nicht auf einer spezifisch zu behandelnden Grunderkrankung beruhen. Zu Risiken und Nebenwirkungen lesen Sie die Packungsbeilage und fragen Sie Ihren Arzt oder Apotheker. **Dr. Willmar Schwabe Arzneimittel, Karlsruhe.**

Stand: Januar 2008 T/01/08/1

## Stärkt Gedächtnisleistung und Konzentration.

Ginkgo-Spezialextrakt  
EGb 761®

- Pflanzlicher Wirkstoff
- Gut verträglich

NEU



Mit der Natur.  
Für die Menschen.

Dr. Willmar Schwabe Arzneimittel

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

# ALS ABONNENT HABEN SIE VIELE VORTEILE!



1. Sie sparen gegenüber dem Einzelkauf und zahlen pro Heft nur € 6,60 statt € 7,40. Als Schüler, Student oder Azubi zahlen Sie sogar nur € 5,55.
2. Sie haben online freien Zugang zu allen Spektrum-Ausgaben seit 1993 mit derzeit über 6000 Artikeln.
3. Unter [www.spektrum-plus.de](http://www.spektrum-plus.de) finden Sie jeden Monat einen kostenlosen Zusatzartikel, der nicht im Heft erscheint.
4. Sie erhalten für Ihre Bestellung ein Dankeschön Ihrer Wahl.
5. Sie können die Online-Wissenschaftszeitung »spektrumdirekt« günstiger beziehen.
6. Auf dieser Seite und unter [www.spektrum-plus.de](http://www.spektrum-plus.de) finden Sie unser Produkt des Monats, das Sie als Abonnent mit Preisvorteil bestellen können.



Zum Bestellen einfach nebenstehende Karte ausfüllen und abschicken oder

per Telefon: 06221 9126-743

per Fax: 06221 9126-751

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

oder per Internet:

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

## ABONNIEREN ODER VERSCHENKEN

Wenn Sie **Spektrum der Wissenschaft** selbst abonnieren oder verschenken, bedanken wir uns bei Ihnen mit einem Präsent. Wenn Sie ein Geschenkabonno bestellen, verschicken wir das erste Heft zusammen mit einer Grußkarte in Ihrem Namen.



**Buch »Was macht das Licht wenn's dunkel ist?«**  
Hier beantworten Experten Fragen, die wir schon immer einmal stellen wollten.

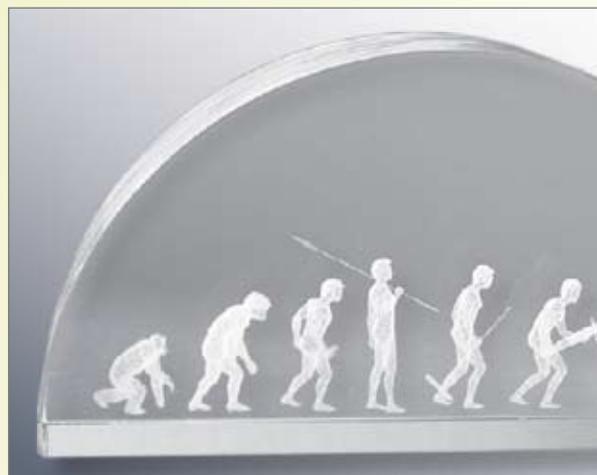
## LESER WERBEN LESER

Sie haben uns einen neuen Abonnenten vermittelt?  
Dann haben Sie sich eine Dankesprämie verdient!



**Dynamo-LED-Radio**  
Keine Batterien.  
Niemals defekte Glühbirnen. Die Taschenlampe LED-Radio funktioniert immer. Sie lädt sogar Ihr Handy auf und hat auch noch ein Scan-Radio eingebaut.

## PRODUKT DES MONATS



meter Bohrlänge, was rund 350 Jahren entspricht, wird der Ton dunkler, enthält also mehr organisches Material. Erst zu diesem Zeitpunkt war es demnach so warm, dass Pflanzen in größerer Zahl gediehen. »Offenbar konnten sich kleine, lokale Gletscher in den Bergen der Insel noch etwas länger halten als an der Küste, wo sich schon die ersten Torfmoore bildeten«, meint Björck.

Das Forscherteam aus Schweden und Argentinien wird noch eine ganze Weile an den Kernen von der Isla de los Estados zu arbeiten haben. Ziel ist, die einzelnen Pflanzenarten im Torfmoor zu bestimmen und den Grad ihrer Zerset-

zung, die Humifizierung, zu ermitteln. Hinzu kommen Untersuchungen der Überreste von Kieselalgen, so genannten Diatomeen. Diese Analysen geben Aufschluss darüber, wie sich die Umweltbedingungen veränderten – ob es wärmer oder kühler, trockener oder feuchter wurde.

»Die chemische Zusammensetzung der Sedimente untersuchen wir mit unserem nagelneuen Röntgenfluoreszenz-Scanner«, freut sich Barbara Wohlfarth von der Universität Stockholm; »denn zahlreiche Elemente, wie beispielsweise Titan, Eisen, Magnesium oder Brom, liefern in Abhängigkeit von ihrer Konzent-

ration wertvolle Informationen über die Klimaentwicklung.«

Als Nordenskjöld Feuerland bereiste, dürfte er jedenfalls kaum geadht haben, welche Bedeutung diese unwirtschaftlichen Gefilde dereinst für die Klimaforschung erlangen und mit welcher ausgeklügelten Methoden Forscher mehr als 100 Jahre später auf seinen Spuren wandeln würden.

**Ingmar Unkel**, promovierter Paläoklimatologe an der Universität Lund, ist an der Auswertung der Bohrproben von der Staaten-Insel beteiligt. Die Reportage über die Expedition dorthin, an der er nicht selbst teilgenommen hat, beruht auf Schilderungen seiner Kollegen.

**ETHIK**  Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe [www.spektrum.de/audio](http://www.spektrum.de/audio)

## Moralisten in Windeln

Gut oder böse? Schon Kinder im Säuglingsalter können diese Frage beantworten – zumindest in einfachen Fällen. Das ergaben jüngste Experimente von Entwicklungspsychologen.

Von Malte Jessl

Die Frage nach der Moral gehört traditionell ins Reich der Philosophie und der Religion. Die Wissenschaft hatte lange wenig dazu beizutragen. Doch das hat sich in letzter Zeit geändert. Soziobiologen erklären inzwischen, wie der Egoismus der Gene ethische Verhaltensweisen wie eheliche Treue oder Hilfsbereitschaft in der Familie hervorbringt. Spieltheoretiker untersuchen mit Computerexperimenten die Entstehung von Altruismus. Und Evolutionspsychologen gehen der Frage nach, inwieweit moralische Maßstäbe angeboren oder erlernt sind.

Dabei mehren sich die Anzeichen dafür, dass ethisches Verhalten keineswegs nur eine Sache der Erziehung ist. Offenbar kommen Säuglinge bereits mit einem moralischen Kompass zur Welt. Bevor sie auch nur sprechen können, haben sie nicht nur ein Gefühl dafür, was gut oder böse ist, sondern können auch die Handlungen anderer ethisch bewerten.

Sehr eindrucksvoll zeigen das jüngste Experimente der Psychologin J. Kiley Hamlin von der Yale-Universität in New Haven (Connecticut). Darin offenbarten sechs und zehn Monate alte Säuglinge eine klare Vorliebe für künstliche Wesen,

die sie bei kooperativem Verhalten beobachtet hatten (*Nature*, Bd. 450, S. 557). Als solche Wesen dienten einfache geometrische Holzfiguren – Kreise, Quadrate und Dreiecke. So wurden störende Einflüsse durch Äußerlichkeiten vermieden. Aufgeklebte große »Augen« vermittelten einen menschlichen Eindruck.

Die Wissenschaftlerin und ihre Mitarbeiter führten den Säuglingen Szenen vor, in denen eine der drei Figuren mehrfach vergeblich versuchte, einen Hügel zu erklimmen. Teils erschien danach eine zweite Figur, die den erfolglosen Kletterer hinaufschob. Teils trat aber auch ein anderes Wesen auf, das sich ihm beim Aufstiegsversuch entgegenstellte. Anschließend durften die Säuglinge nach einer der Figuren greifen. Zielsicher entschieden sie sich ganz überwiegend – die sechsmonatigen Kinder sogar ausnahmslos – für den Helfer.

Nun folgte eine andere Szene. Der Kletterer stand in der Mitte zwischen Helfer und Bösewicht und ging auf einen von beiden zu. Die Forscher registrierten, wohin die Säuglinge blickten; denn die Kleinen richten ihre Aufmerksamkeit, wie schon länger bekannt ist, bevorzugt auf unerwartete Ereignisse. Tatsächlich ruhten die Blicke der zehntonatigen



Das Baby greift zu der Figur, die sich in einer Spielszene zuvor hilfsbereit verhielt, und nicht zu derjenigen, die böswillig war.

Kinder deutlich länger auf der Szene, in der sich der Kletterer dem Bösewicht zuwandte. Offenbar waren sie von diesem Verhalten überrascht. Die sechsmonatigen Säuglinge blickten dagegen auf beide Szenen gleich lang. Das bestätigt Befunde, wonach Kinder in diesem Alter noch nicht fähig sind, sich in andere hineinzuversetzen. Über soziale Urteilsfähigkeit verfügen sie jedoch bereits.

Aber bevorzugten die jungen Probanden wirklich die »gute« Figur oder hatten sie nur eine Abneigung gegen die »böse«? Um dies zu klären, untersuchten Hamlin und ihre Mitarbeiter eine andere Gruppe von Kindern. Diese sahen eine Szene, in der zusätzlich zu den bekannten Figuren ein neutraler Beobachter auftrat, der sich nicht ins Geschehen einmischte. Wieder gab es anschließend den schon bekannten Beliebtheitsstest. Hatten die Kinder die Wahl zwischen neutraler Figur und Hel-

fer, entschieden sie sich für Letzteren. Gegenüber dem Bösewicht bevorzugten sie dagegen den neutralen Beobachter. »Viele Aspekte der Moral kann ein Säugling noch nicht erfassen. Aber die Fähigkeit, soziales Verhalten zu bewerten, könnte die notwendige Basis für ein Moralsystem sein«, resümiert Hamlin.

Ihre Experimente sind freilich nicht die ersten Hinweise auf einen angeborenen Sinn für das Gute bei Kindern. So hat der Psychologe Felix Warneken vom Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig schon bei Kleinkindern altruistisches Verhalten in Form spontaner Hilfsbereitschaft gegenüber Fremden nachgewiesen. In verschiedenen Experimenten ließ er sie beobachten, wie ein unbekannter Erwachsener versuchte,

nach einem unerreichbaren Objekt – etwa einem Stift – zu greifen. Auch ohne Aussicht auf Belohnung eilten die Kinder den Fremden bereitwillig zu Hilfe. Die meisten konnten noch nicht sprechen und waren daher vermutlich auch noch kaum durch Erziehung geprägt. »Wir sollten uns von der Idee verabschieden, dass wir als Egoisten auf die Welt kommen und allein durch Kultur und Erziehung zu hilfsbereiten Wesen heranwachsen«, meint der Psychologe.

Wenn Moral eine genetische Komponente hat, muss sie ein Ergebnis der Evolution sein. Tatsächlich scheinen ethische Prinzipien weit in die Stammesgeschichte des Menschen zurückzureichen. Warneken fand altruistisches Verhalten nämlich auch bei Schimpansen: Sie brachten im

Experiment fremden Menschen gleichfalls ohne jede Belohnung für diese unerreichbare Gegenstände. Die Affen brauchten nur länger, um die Situation zu erfassen. Ebenso zeigten sie sich gegenüber Artgenossen uneigennützig: Sie öffneten anderen Schimpansen Türen, sodass diese an Futter herankamen, ohne selbst einen unmittelbaren Vorteil davon zu haben. Ob Affen auch das Verhalten anderer Individuen moralisch bewerten können, wurde dagegen noch nicht untersucht.

Wenn aber der Mensch von Natur aus gut ist, wie kommt dann das Böse in die Welt? Auch darauf gibt es wissenschaftliche Antworten, aber die würden hier zu weit führen.

**Malte Jessl** ist freier Journalist in Wiesbaden.

## QUANTENCOMPUTER

# Spintausch im Lasergitter

Ein möglicher Typ von Quantencomputer speichert Informationen im Spin neutraler Atome. Gefangen in einem Lasergitter, fungieren diese als Quantenbits. Nun ist es Wissenschaftlern erstmals gelungen, die gespeicherte Quanteninformation gezielt zu manipulieren.

Von Robert Gast

Ist der Transistor ein Auslaufmodell? Schon bald wird der Grundbaustein der heutigen Elektronik an die Grenzen der Miniaturisierung stoßen, sodass die Leistung moderner Computer erstmals seit deren Erfindung stagnieren könnte. Einen möglichen Ausweg weist die Quantenphysik: jenes Reich von Kleinstteilchen, deren Verhalten in vielerlei Hinsicht dem gesunden Menschenverstand widerspricht und schon Albert Einstein unheimlich war. Der Vater der modernen Physik hätte sich deshalb wohl nie träu-

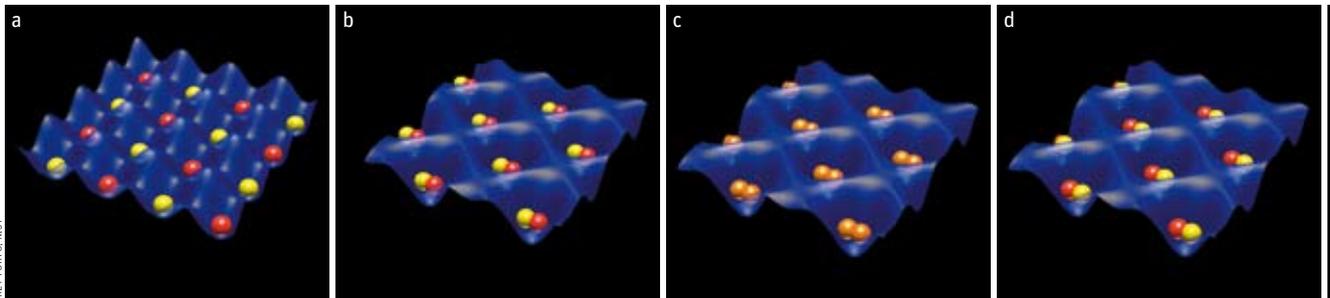
men lassen, was jetzt gelungen ist: auf der Basis quantenmechanischer Symmetriegetze neutrale Rubidiumatome so zu manipulieren, dass sie Information in ihrem Spin speichern und in einer hypothetischen künftigen Rechenmaschine dann in Rekordzeit verarbeiten können. Dem 1955 verstorbenen Nobelpreisträger wäre derlei wohl als Spuk erschienen.

Dabei ist ein Computer, der Informationen in einzelnen Atomen, Elektronen oder gar Photonen speichert, längst keine Utopie mehr. Erste, noch sehr simple Versionen können schon einfache mathematische Rechnungen durchführen. Ein

ausgereiftes Exemplar ließe seine heutigen Vorgänger so plump erscheinen wie einen Abakus im Vergleich zum Taschenrechner – so gewaltig wäre der Leistungszuwachs bei manchen Aufgaben. Zum Beispiel könnte ein aus nur hundert Atomen bestehender Quantencomputer binnen weniger Minuten Verschlüsselungskodes knacken, für die Netzwerke heutiger Superrechner mehrere Jahre brauchen.

Auch diese Wundermaschinen operieren mit Bits, welche die Werte null und eins annehmen können. In diesem Fall heißen sie freilich Quanten- oder Qbits. Physikalisch lassen sie sich auf vielerlei Arten realisieren: etwa über die Polarisation von Photonen oder eben den Spin von Elektronen und Atomen. »Spin nach oben« steht dann beispielsweise für den Binärwert 1, »Spin nach unten« für 0.

Anders als ihre klassischen Pendanten befolgen die Qbits allerdings die Regeln der Quantenmechanik. Wie Schrödingers berühmte Katze, die in ihrer Box tot und lebendig zur gleichen Zeit ist, kann ein System mit zwei beobachtbaren Zuständen (»Observablen«) demnach auch



THEY PHOTO, NEST

in einer Überlagerung davon vorliegen. Erst bei einer Messung muss es sich für einen von beiden entscheiden. Welcher das sein wird, lässt sich nicht vorhersagen.

Dieser Überlagerung verdankt der Quantencomputer sein hohes Rechen-tempo; denn sie verleiht ihm die Fähigkeit, viele Operationen parallel, also gleichzeitig auszuführen. Während ein herkömmlicher Prozessor aus  $n$  Bits nur  $n$  Binärziffern aufnehmen und verarbeiten kann, sind es bei einem aus Qbits  $2^n$ . Gibt man einem solchen Quantenprozessor einen Befehl, führt er ihn mit allen überlagerten Zuständen gleichzeitig aus.

Dazu müssen die beteiligten Qbits allerdings »verschränkt« sein – auch dies ein quantenmechanisches Konzept, mit dem sich Einstein nicht anfreunden mochte. Es bedeutet, dass Teilchen in einem gemeinsamen Überlagerungszustand vorliegen und sich selbst dann noch gegenseitig beeinflussen, wenn sie beliebig weit voneinander entfernt sind.

### Empfindliche Verschränkung

Viele Teilchen gezielt zu verschränken ist allerdings sehr schwierig. Zudem muss man die quantenmechanische Kopplung über lange Zeit aufrechterhalten, um Informationen speichern und bei Bedarf abrufen zu können. Das stellt sogar eine noch größere Herausforderung dar; denn schon die kleinste äußere Störung hebt die Verschränkung auf. Eine Möglichkeit, das System davor zu bewahren, ist, in extremer Kälte zu arbeiten – bei Temperaturen, die nur wenig über dem absoluten Nullpunkt liegen. Dann sind alle potenziell störenden thermischen Bewegungen praktisch eingefroren. Aus diesem Grund kühlte eine Physikergruppe um William Phillips vom National Institute of Standards and Technology (NIST) für ihre eingangs erwähnten Versuche die Rubidiumatome auf extrem tiefe Temperaturen.

Aber wie lässt sich mit solchen Atomen rechnen? Dass sie mit ihrem

Spin Binärziffern darstellen können, reicht nicht. Es müssen Schaltelemente hinzukommen, die logische Verknüpfungen zwischen den einzelnen Qbits herstellen. Ein einfaches Beispiel wäre ein so genanntes SWAP-Gatter, das die Werte zweier Bits vertauscht.

Just dafür fanden die NIST-Forscher nun erstmals eine Realisierung mit neutralen Atomen. Das Team um Phillips bediente sich dazu eines Verfahrens zum Einsperren von Rubidiumatomen in einem optischen Gitter, das Innsbrucker Forscher schon vor einigen Jahren erdacht hatten. Dabei werden drei Paare gegenläufig ausgerichteter Laserstrahlen senkrecht zueinander orientiert. Indem sie interferieren, bilden sie ein netzartiges Muster in Form eines Maschendrahts. Im Innern der Maschen ist die Lichtintensität jeweils am geringsten. In diese Minima werden die ultrakalten Atome gedrängt und darin festgehalten. Dem Innsbrucker Team war es bereits gelungen, in jeder Masche des optischen Gitters genau ein Atom zu fangen.

Die NIST-Gruppe ging nun einen Schritt weiter. Durch Modifikation der Laseranordnung sorgte sie dafür, dass die Potenzialmulden zunächst zwei eng benachbarte Minima enthielten. Dadurch konnten sie jeweils gleich zwei Rubidiumatome aufnehmen, die durch eine kleine Energiebarriere getrennt waren. Diese Doppelmulde verschmolzen die Wissenschaftler dann zu einem einzelnen Potenzialtopf und beobachteten die Wechselwirkung der beiden Teilchen.

Dabei stellten sie Faszinierendes fest: Die zwei Atome tauschten augenblicklich ihren Spin aus. Dieser Wechsel, der sich im Mikrosekundentakt wiederholte, fand allerdings nur statt, wenn die beiden Teilchen vor der erzwungenen Interaktion mittels Radiowellenbestrahlung in entgegengesetzte Spinzustände versetzt worden waren. Letztlich beruht er auf quantenmechanischen Symmetrieprinzipien, die damit zusammenhängen, dass die ver-

**Die Autoren sperrten Rubidiumatome in ein optisches Gitter** und verpassten ihnen entgegengesetzte Spins (rot und gelb; a). Dann ließ eine gezielte Änderung des Gitters zwei benachbarte Teilchen jeweils in eine gemeinsame Potenzialmulde rutschen (b). Dort tauschten die beiden periodisch ihren Spin aus (b–d). Dabei nahmen sie jeweils vorübergehend einen gemeinsamen Überlagerungszustand mit undefiniertem Spin (orange) ein, der sie »verschränkte« (c). Das System könnte in einem Quantencomputer als SWAP-Gatter dienen, das die Werte zweier Qbits vertauscht.

## Leistungsstark:

# 3,25%



+ 25 Euro  
Gutschrift!

## Das hochverzinsteste Extra-Konto

- Hohe 3,25 %<sup>1</sup> Zinsen p. a. ab dem ersten Euro
- Kostenlos + täglich verfügbar
- Für Einmalzahlungen und regelmäßige Sparbeträge
- Bis 15.03.2008: 25 Euro Gutschrift ab 2.500 Euro Starteinlage für das erste Extra-Konto



<sup>1</sup> Zins variabel, zuletzt geändert am 15.08.2007.

Direkt eröffnen:

**0180 2 / 88 10 00**

(Festnetz der Dt. Telekom – 0,06 Euro pro Anruf, ggf. abweichende Mobilartef)

[www.ing-diba.de/extra](http://www.ing-diba.de/extra)

Die neue Generation Bank

**ING**  **DiBa**

wendete spezielle Sorte von Rubidiumatomen (nämlich Isotope der Masse 87) so genannte Bosonen sind. Darunter versteht man Teilchen mit ganzzahligem Spin, die im Unterschied zu solchen mit halbzahligem Spin – den Fermionen – zu mehreren ein und denselben Quantenzustand einnehmen können.

Die Spinoszillation schlägt gewissermaßen zwei Fliegen mit einer Klappe. Zum einen realisiert sie ein SWAP-Gatter auf der Basis neutraler Atome. Zum anderen sorgt sie für die Verschränkung der Qbits im optischen Gitter. Würde man die Atome gerade nach einer halben Periodendauer durch Rückkehr zur Doppelmulde wieder trennen, befänden sie sich in dem für den Quantencomputer unerlässlichen gemeinsamen Überlagerungszustand, der auch nach der Trennung fortbestünde.

### Computer der Zukunft

Auf analoge Weise sollten sich mit ultrakalten neutralen Atomen weitere Schaltelemente für Qbits verwirklichen lassen. Phillips und seine Kollegen wollen zunächst jedoch ihr experimentelles Set-up verbessern: Bislang enthält ein Drittel der Doppelmulden lediglich ein Teilchen. Außerdem kann der Spintausch derzeit nur für alle im Gitter gefangenen Atompaare gemeinsam durchgeführt werden.

Ein noch grundlegendes Problem beim Quantencomputer bleibt von all diesen Überlegungen unberührt: Man kann nicht bestimmen, welcher der vielen gleichzeitig existierenden Zustände des Gesamtsystems bei einer Messung zu Tage tritt. Führt ein Quantencomputer also eine Operation für alle verschiedenen Bitkombinationen parallel durch, wird nur eines der vielen möglichen Resultate ausgegeben. Die restlichen Ergebnisse »vergisst« der Rechner. Für die meisten heutigen Anwendungen wäre ein Quantencomputer somit bis zur Entdeckung eines geeigneten Auslesemechanismus nicht wirklich schneller als seine klassischen Gegenstücke.

In Anbetracht all dieser Probleme sollten wir den Transistor doch noch nicht abschreiben. Vermutlich wird er auch im Computer der Zukunft jene Aufgaben übernehmen, für welche die aufwändige Quantenrechnung nicht benötigt wird.

**Robert Gast** arbeitet als freier Wissenschaftsjournalist in Heidelberg.

### MIKROSKOPIE

☞ Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe [www.spektrum.de/audio](http://www.spektrum.de/audio)

# Scheinwerfer für die Nanowelt

Aus einer Kristallnadel konnten Forscher eine ferngesteuerte Lichtquelle basteln, die so winzig ist, dass sich Details von Nanostrukturen damit ausleuchten lassen.

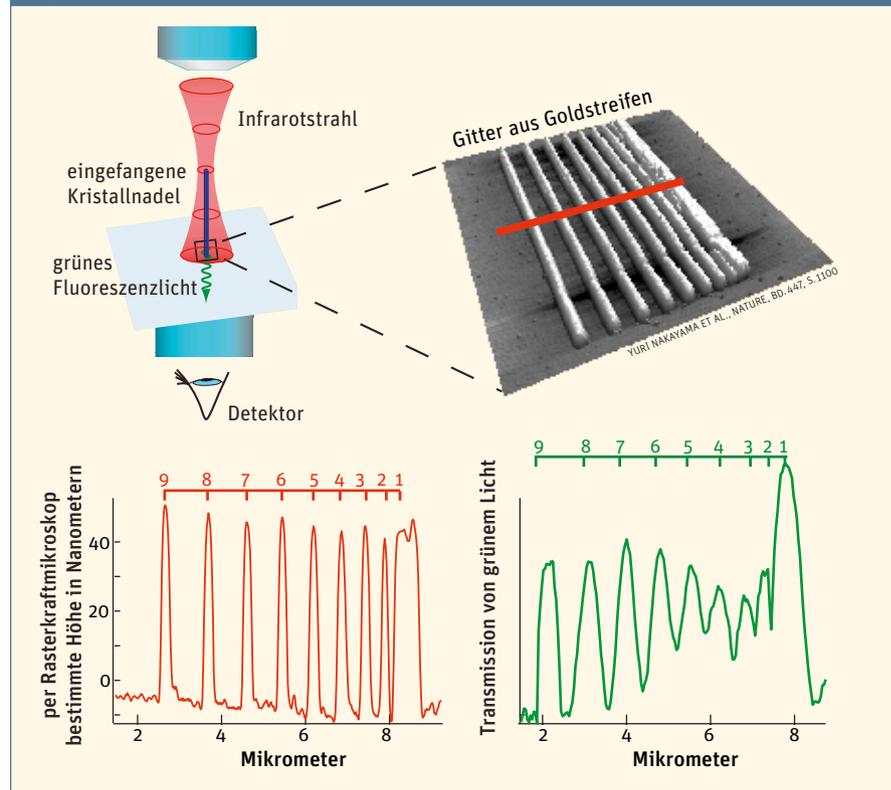
Von Stefan Maier

Um das Leben des berühmten Wissenschaftlers Jan Benes zu retten, wird in Richard Fleischers Film »Die phantastische Reise« (1965) ein Raumschiff samt Besatzung auf Stecknadelkopfgröße geschrumpft und in die Blutbahn des Patienten injiziert. Dort kämpfen Stephen Boyd und Raquel Welch mit der Mikrobiologie des Körpers, um einen lebensbedrohenden Thrombus zu entfernen. Dabei geraten wiederholt Erythrozyten, Fresszellen, Antikörper und all die anderen Teilchen, die sich im Blut tummeln, in den Lichtkegel der Scheinwerfer des Miniraumschiffs.

Auch Peidong Yang und seine Kollegen in Berkeley (Kalifornien) wollen mit

Hilfe winziger Strahlungsquellen die Oberflächen mikroskopisch kleiner Objekte beleuchten – allerdings ohne den Boden wissenschaftlicher Tatsachen zu verlassen. Dazu hat das Team aus Chemikern, Physikern und Werkstoffkundlern eine winzige Kristallnadel zur Minitaschenlampe umfunktioniert. Sie wird von einem Infrarotlaser zur Aussendung von sichtbarem Licht angeregt. Doch damit nicht genug: Der Laserstrahl hält als optische Pinzette die Nadel gleichzeitig fest; wird er bewegt, so wandert sie brav in seinem Brennpunkt mit. Auf diese Weise konnte Yongs Gruppe mit ihrem ferngesteuerten Minischeinwerfer Nanostrukturen auf einer Glasoberfläche abrastern und hochaufgelöste Bilder davon erzeugen (*Nature*, Bd. 447, S. 1098).

## EINE KRISTALLNADEL ALS MINITASCHENLAMPE



Schon seit mehr als zwei Jahrzehnten suchen Wissenschaftler nach Wegen, Strukturen mit Abmessungen unterhalb eines Mikrometers im optischen Spektralbereich aufzunehmen. Für sichtbares Licht existiert allerdings wie bei allen Wellenerscheinungen eine Beugungsgrenze, sodass es sich mittels Linsen nicht auf Durchmesser unterhalb seiner Wellenlänge fokussieren lässt. Um Nanostrukturen damit abzubilden, muss man daher Umwege einschlagen.

Einen solchen beschreitet die so genannte Nahfeldmikroskopie. Dabei wird das zu untersuchende Objekt wie bei einem Rasterkraftmikroskop mit einer winzigen Spitze abgetastet. Darin befindet sich in diesem Fall aber ein Loch. Dieses ist nur wenige Dutzend Nanometer breit und mit einer Glasfaser gekoppelt. Durch die Öffnung lässt sich so Licht auf einen Punkt konzentrieren, der die Beugungsgrenze deutlich unterschreitet. Auf diese Weise gelingt es, durch Abstrahieren einer Oberfläche mit der Spitze ein Bild von ihr zu erzeugen, dessen Auflösung praktisch nur vom Durchmesser des Lochs abhängt.

Edward Syngge hat dieses Verfahren schon 1928 Albert Einstein vorgeschlagen, der es jedoch als unrealistisch verwarf. Trotz dieses prominenten Verdikts

**Von einem Infrarotlaserstrahl** festgehalten und zur Aussendung von grünem Licht angeregt, bildet eine Kristallnadel aus Kaliumniobat einen winzigen Scheinwerfer, der Details im Nanomaßstab sichtbar machen kann (links oben). Zum Beweis wurde die Nadel quer über ein Gitter aus 200 Nanometer breiten Goldstreifen mit abnehmendem Abstand (rechts oben) bewegt (rote Linie). Die Intensitätskurve des hindurchgelassenen Lichts (rechts unten) entsprach fast genau dem per Rasterkraftmikroskop gemessenen Höhenprofil (links unten).

konnte die Idee Mitte der 1980er Jahre schließlich verwirklicht werden. Inzwischen finden sich Nahfeldmikroskope in Forschungslabors in aller Welt. Allerdings ist die praktische Anwendung äußerst kompliziert: Die Spitzen zerbrechen oft, und in wässriger Umgebung funktioniert die Rasterung nicht oder nur mit beträchtlichem Mehraufwand. Biologische Untersuchungen – etwa von Zellmembranen – konnten von dem Sprung in der optischen Auflösung deshalb bisher nicht profitieren.

Aus diesem Grund schlug Yangs Gruppe einen anderen Weg ein. Zum einen verkleinerten die Forscher die Lichtquelle selbst auf Dimensionen unterhalb eines Mikrometers. Zum anderen ist ihr Minischeinwerfer nicht mechanisch mit der Außenwelt verbunden, sondern im Brennpunkt eines Laserstrahls gefangen. Dadurch lässt er sich auch innerhalb einer Flüssigkeit leicht dirigieren.

Bei ihrer Konstruktion mussten die Forscher vor allem ein Problem lösen: Es galt, ein Material zu finden, das nicht nur mühelos zu einem winzigen Stab verarbeitet werden kann, sondern auch mit hoher Effizienz infrarotes in sichtbares Licht umwandelt. Dieser Vorgang ist ziemlich kompliziert und findet nur unter ganz besonderen Bedingungen statt. Vereinfacht gesprochen, werden zwei Photonen des Infrarotlaserstrahls zu einem einzelnen Lichtquant umgewandelt, das ungefähr die doppelte Frequenz hat und damit im optischen Spektralbereich liegt. Nur ein Material, das über passende Energieniveaus verfügt, kann diese Umwandlung vermitteln.

Nach intensiver Suche fand die Gruppe in Kaliumniobat einen Werkstoff, der das mit hoher Effizienz leistet. Er ist zudem chemisch beständig, mechanisch stabil, ungiftig und durchlässig für sichtbares Licht. Überdies kann man auf recht einfache Art aus einer wässrigen Lösung nadelartige Kristalle daraus herstellen. Die von Yangs Team verwendeten Exemplare waren im Mittel gut einen Mikrometer lang und nur etwa hundert Nanometer dick.

Wie Versuche ergaben, hatten sie weitere günstige und speziell für die Anwendung als Minischeinwerfer wichtige Eigenschaften. So orientierten sie sich parallel zur Achse des Laserstrahls. Außerdem wirkten sie als Wellenleiter, der das im Innern erzeugte sichtbare Licht nicht seitlich austreten ließ, sondern zu



## Das kostenlose Direkt-Depot

- Kostenlose Depotführung
- Günstige Transaktionspreise für börslichen + außerbörslichen Handel
- 3,25 %<sup>1</sup> Zinsen p. a. auf dem Verrechnungskonto
- Bis 15.03.2008: 25 Euro Gutschrift ab 2.500 Euro Depotwert für das erste Direkt-Depot



<sup>1</sup> Zins variabel, zuletzt geändert am 15.08.2007.

Jetzt Depotgebühren sparen:

**0180 2 / 88 10 00**

(Festnetz der Dt. Telekom – 0,06 Euro pro Anruf, ggf. abweichende Mobiltarife)

[www.ing-diba.de/wertpapier](http://www.ing-diba.de/wertpapier)

Die neue Generation Bank

**ING DiBa**

## Springers Einwürfe

### Fernheilung mit Hühnersuppe

Über die Lücke zwischen Wissen und Weisheit

**Wir saßen nach dem Abendessen** bei guten Bekannten beisammen. Angeregte Gespräche liefen kreuz und quer. Die meisten am Tisch waren im Grenzbereich zwischen Natur- und Humanwissenschaften tätig. Besonders interessiert lauschten wir einem amerikanischen Linguisten, der bei Noam Chomsky studiert hatte und uns mit Anekdoten über seinen berühmten Lehrer glänzend unterhielt.

Alle im Kreis verstanden sich gut, denn unser Englisch reichte aus, um witzige Anspielungen zu verstehen und gelegentlich selbst einen mehr oder weniger gelungenen Scherz anzubringen. Vor allem glaubten wir uns stillschweigend einig, dass unsere unernsten Sprachspiele auf einer festen gemeinsamen Basis ruhten: Jeder versuchte auf seine Weise im jeweiligen Beruf die Natur, andere Menschen und sich selbst mit den rationalen Mitteln seiner Wissenschaft zu verstehen. Doch dann erzählte die Frau des Linguisten, wie sehr sie ihren neuen Lehrer bewunderte, einen indianischen Schamanen.

Schlagartig änderte sich das Gesprächsklima: Es wurde ernst. Wir alle wandten uns der Frau zu und begannen mit einer seltsamen Mischung von Vorsicht und Neugier nachzufragen. Welche Erfahrungen und Einsichten ihr der Schamane denn vermitteln konnte? Sie berichtete von Nächten im indianischen Schwitzzelt, wo man bei großer Hitze, eintönigem Singen und schmerzhafter Körperhaltung allmählich in Trance verfalle und auf ungeahnte Weise mit dem wahren Ich konfrontiert werde. Auch stelle der Schamane die Aufgabe, allein eine Nacht in freier Natur zu verbringen, selbst Nahrung zu suchen und der inneren Stimme zu lauschen.

Sofort überschlugen wir uns im Bemühen, diese Erzählungen zu verstehen, das heißt auf natürliche Weise zu erklären. Ja gewiss, so eine Nacht unter freiem Himmel könne eine unvergessliche Erfahrung sein, und die Wirkung meditativer Praktiken auf die Hirnfunktion sei mit bildgebenden Verfahren zweifelsfrei nachweisbar.

**Doch diese Art Verständnis** stieß auf wenig Gegenliebe, sondern provozierte nur immer extremere Berichte. Sie stehe mit einer anderen Schamanenschülerin in so engem Kontakt, erzählte die Frau des Linguisten, dass ihrer beider Körper praktisch eins seien. Einmal habe sie dieser Freundin per Handy beschrieben, wie unwohl sie sich gerade fühle. Die habe daraufhin als bewährtes Gegenmittel Hühnersuppe gemacht und diese selbst gegessen, worauf das Unwohlsein sofort verschwunden sei.

Unsere Kommentare zu dieser Heilung durch telepathischen Suppengenuss waren schon weiter hergeholt. Der Mathematiker erwähnte den britischen Biologen Rupert Sheldrake, der ja behauptete, es gebe fernwirkende und formbildende »morphogenetische« Felder, und eine Psychologin zitierte Untersuchungen, denen zufolge man sich positive Erlebnisse besser merke und negative leichter vergesse.

Das alles bewiese ihr nur, erwiderte die Schamanin, wie Recht ihr Lehrer habe, wenn er sage: Wissen und Weisheit klaffen immer mehr auseinander, bis am Ende die Wissenden die Welt zu Grunde richten und die Weisen verhungern. – Einige versuchten daraufhin zugleich tiefsinnig zu nicken und skeptisch den Kopf zu schütteln. Da ist sicher was dran, sagte jemand, und ein anderer: Mehr Weisheit könnte bestimmt nicht schaden.

Der Abend endete kleinlaut. Er hatte uns eingebildeten Wissensarbeitern demonstriert, dass unsere Schulweisheit sich nicht träumen ließe, was für Dinge zwischen Himmel und Erde in einen von außen unauffälligen Menschenkopf hineinpasse. Wie sich zeigte, ist gegen esoterische Behauptungen im anekdotischen Gespräch kein Kraut gewachsen. Da hätten wir mit offen kritischen Einwänden statt halbherziger Verständnisversuche sicher auch auf verlorenem Posten gestanden.



Michael Springer

den Enden des Stäbchens führte und dort gebündelt abstrahlte.

Damit war der Weg frei für einen Demonstrationsversuch (Kasten S. 22/23). Als Testobjekt diente ein Glasplättchen mit parallel darauf angeordneten 200 Nanometer breiten Goldstreifen, die von links nach rechts immer dichter aufeinanderfolgten: Ihr Abstand nahm von 1 auf 0,2 Mikrometer ab. Auf das Plättchen tropften die Forscher etwas Wasser, dem sie einige ihrer Nanostäbchen aus Kaliumniobat zufügten. Darüber kam ein Deckglas. Auf dieses richteten Yang und seine Kollegen senkrecht von oben ihren Infrarotlaserstrahl und fingen damit eines der Nanostäbchen im Wasser ein. Danach führten sie es durch langsames Verschieben des Brennpunkts über das Goldgitter hinweg. Ein Detektor darunter registrierte das hindurchtretende sichtbare Licht.

Tatsächlich entstand bei dem Versuch ein scharfes, getreues Abbild des Gitters. Das bewies der Vergleich mit einer zuvor angefertigten Rasterelektronenmikroskopischen Aufnahme.

#### Zellen im Flutlicht

Allerdings erreicht der ferngesteuerte Nanoscheinwerfer noch nicht die Auflösung der besten Nahfeldmikroskope. Der Grund ist, dass das Stäbchen im Brennpunkt des Laserstrahls nicht völlig stillsteht, sondern wegen der Brownschen Bewegung hin- und herzappelt – vor allem in senkrechter Richtung. Die Forscher wollen daher als Nächstes die Qualität ihrer optischen Pinzette verbessern. Ein weiteres Ziel besteht darin, die Nanostäbchen zum Ende hin spitz zulaufen zu lassen, um den Lichtfleck noch zu verkleinern. Erst nach diesen und anderen Verbesserungen dürfte der Minischeinwerfer für den praktischen Einsatz in der Mikroskopie reif sein.

In Gedanken geht Yang allerdings schon viel weiter. Er sagt voraus, dass mittels holografischer optischer Fallen mit mehreren Brennpunkten bald ganze Netze von Mikroscheinwerfern die Oberflächen biologischer Zellen abtasten und damit etwa Informationen über die Dynamik der Zellmembran liefern. Das wäre ein Vorstoß in die Nanowelt, der 1965 sicher genauso fantastisch angemutet hätte wie die Reise von Boyd und Welch durch den Blutkreislauf noch heute.

**Stefan Maier** ist Professor für Physik am Imperial College in London.

TITELTHEMA: KOSMOLOGIE



JEAN-FRANÇOIS PODEVIN

# Universen auf der kosmischen Achterbahn

Die kosmische Inflation ist möglicherweise das lang gesuchte Schlüsselexperiment der Stringtheorie. Astronomische Beobachtungen könnten nun bei der Beantwortung einer entscheidenden Frage helfen: Ist unser Universum tatsächlich nur eines von vielen?

Von Cliff Burgess  
und Fernando Quevedo

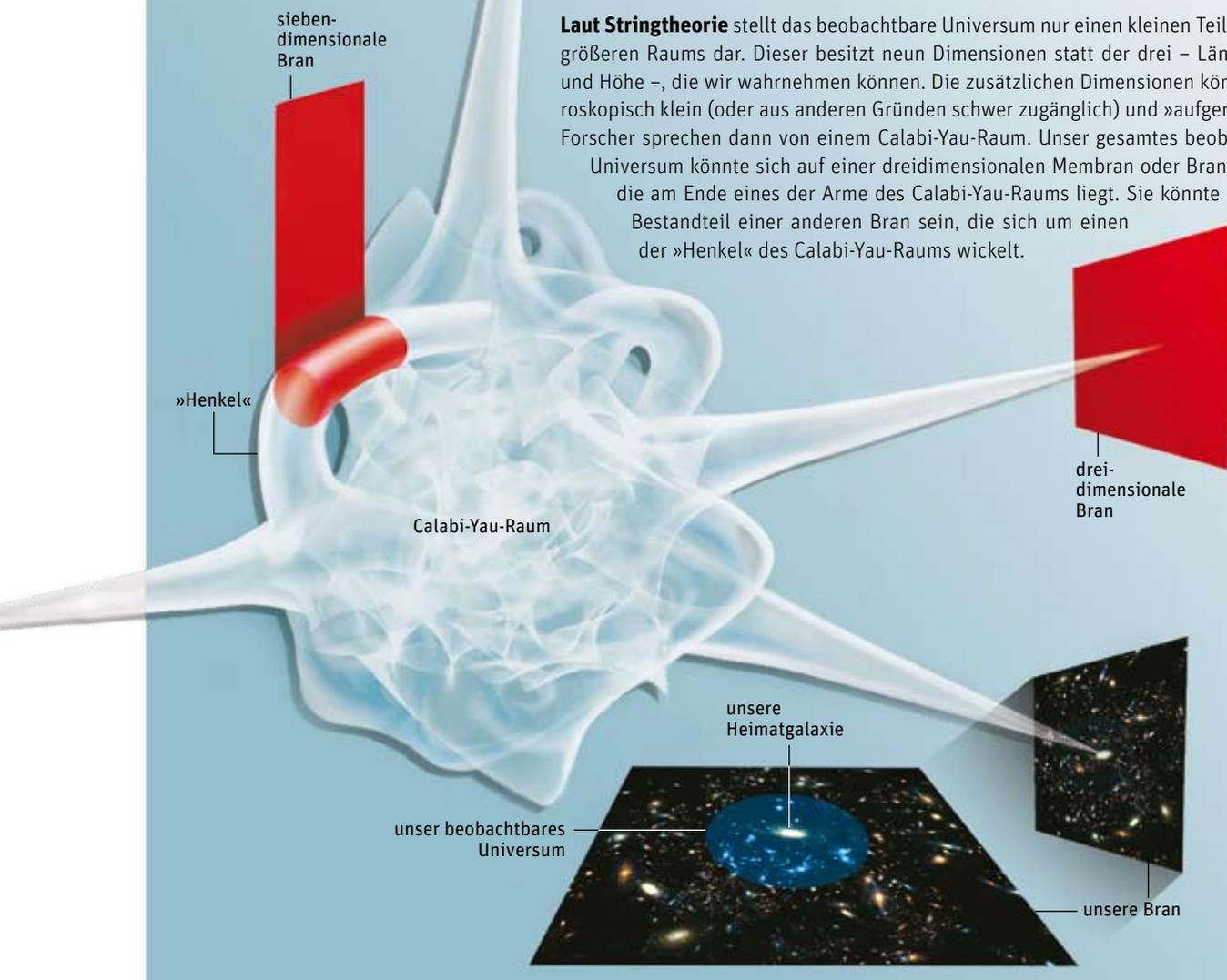
**E**igentlich könnten Kosmologen ganz zufrieden mit »ihrem« Universum sein. Es besitzt einen Radius von beachtlichen 46 Milliarden Lichtjahren, und Trilliarden von Sternen bevölkern ihn. Offensichtlich aber genügt ihnen nicht einmal das. Denn in der Kosmologie des 21. Jahrhunderts dürfte folgende Vorstellung eine wichtige Rolle spielen: die nämlich, dass unser bekanntes Universum – die Summe all dessen, was wir beobachten (können) – möglicherweise nur eine winzige Region in einem ungleich größeren Raum ist.

Denn als Nebeneffekt bringen kosmologische Theorien häufig verschiedene Arten von Paralleluniversen hervor, die zusammen mit dem unseren ein großes »Multiversum« bilden (siehe »Parallel-Universen« von Max Tegmark, Spektrum der Wissenschaft 8/2003, S. 34). Freilich besteht kaum Hoffnung, solche anderen Universen jemals direkt beobachten zu können – sei es, weil sie zu weit entfernt sind oder auf andere Weise von unserem Kosmos isoliert sind.

Obwohl sie jenseits unseres Universums existieren, könnten einige der Paralleluniversen aber dennoch mit ihm in Wechselwirkung treten. Dann könnten wir die entsprechenden Effekte direkt nachweisen. Dies folgern Kosmologen aus der Stringtheorie, die als führende Kandidatin einer vereinheitlichten Beschreibung der grundlegenden Kräfte in der Natur gilt. Die fundamentalen »Strings« oder Fäden, die ihr den Namen gaben, sind extrem klein. Doch aus den Gesetzen, denen ihr Verhalten folgt, sagen Stringtheoretiker auch die Existenz membranartiger Objekte voraus, die sehr große Ausdehnungen erreichen können. Solche »Branen« sind in der Lage, sehr

Universen können sich möglicherweise kreuz und quer durch zusätzliche Raumdimensionen bewegen. Unter Umständen expandieren sie dabei sogar. Die Dynamik dieses Prozesses ähnelt dabei der einer kosmischen Achterbahnfahrt: Dem langsamen Erklimmen einer sanften Steigung folgt der rasante Sturz in die Tiefe.

## VIELE UNIVERSEN IN EINEM



**Laut Stringtheorie** stellt das beobachtbare Universum nur einen kleinen Teil eines viel größeren Raums dar. Dieser besitzt neun Dimensionen statt der drei – Länge, Breite und Höhe –, die wir wahrnehmen können. Die zusätzlichen Dimensionen könnten mikroskopisch klein (oder aus anderen Gründen schwer zugänglich) und »aufgerollt« sein. Forscher sprechen dann von einem Calabi-Yau-Raum. Unser gesamtes beobachtbares Universum könnte sich auf einer dreidimensionalen Membran oder Bran befinden, die am Ende eines der Arme des Calabi-Yau-Raums liegt. Sie könnte aber auch Bestandteil einer anderen Bran sein, die sich um einen der »Henkel« des Calabi-Yau-Raums wickelt.

vielfältige Formen anzunehmen. Insbesondere könnte unser Universum als Ganzes eine dreidimensionale Bran sein, die in einen neundimensionalen Raum eingebettet ist. Verformungen dieses höherdimensionalen Raums und Zusammenstöße zwischen verschiedenen Universen wiederum könnten einige der von Astronomen beobachteten Eigenschaften unseres Kosmos erklären.

In letzter Zeit jedoch hat die Stringtheorie, so könnte man sagen, eine schlechte Presse. Eine ganze Reihe von konkreten Einwänden wäre zu nennen, auf die wir hier aber nicht eingehen können. Der wichtigste von ihnen und legitimer Grund zur Sorge ist, dass wir sie bislang keinen experimentellen Tests unterziehen können. Mit diesem Problem steht sie indessen nicht allein da. Es ist Ausdruck der nicht nur die Stringtheorie betreffenden Schwierigkeit, physikalische Modelle auf extrem kleinen Größenskalen zu testen. Damit

kämpft zum Beispiel auch die Schleifen-Quantengravitation (siehe »Quanten der Raumzeit« von Lee Smolin, Spektrum der Wissenschaft 3/2004, S. 54). Stringtheoretiker suchen aber weiter nach Wegen, wie sich ihre Theorie doch noch überprüfen lässt. Viel versprechend ist der Ansatz, mit ihrer Hilfe einige der noch rätselhaften Eigenschaften des Kosmos zu erklären. Die wichtigste davon betrifft die Frage, wie sich das Tempo der kosmischen Expansion im Lauf der Zeit verändert.

Die Erkenntnis, dass dieses Tempo fortwährend zunimmt, wird in diesem Jahr genau zehn Jahre alt. Verantwortlich für die Beschleunigung ist ein noch unbekannter kosmischer Mechanismus, der als Dunkle Energie bezeichnet wird. Aber auch zu einer Zeit, lange bevor Atome (oder gar Galaxien) entstanden waren, hatte es bereits eine Phase gegeben, in der das Universum binnen kürzester Zeit extrem stark expandierte. Kurz nach die-

ser frühen Inflationsphase war die Temperatur des Universums milliardenfach höher als jede jemals auf der Erde gemessene Temperatur. Und so finden sich Kosmologen und Elementarteilchenphysiker nun im gleichen Boot wieder und versuchen gemeinsam, die fundamentalen Gesetze der Physik unter diesen Bedingungen zu ermitteln und unser Verständnis des frühen Universums noch einmal gründlich auf Basis der Stringtheorie zu überdenken.

### Winzige Schwankungen, zu astronomischer Größe aufgebläht

Die Idee der kosmischen Inflation war entwickelt worden, um eine Reihe einfacher, aber doch verwirrender Eigenschaften unseres Kosmos zu erklären. Viele davon betreffen die kosmische Hintergrundstrahlung, ein Überbleibsel aus der heißen Frühzeit unseres Universums. Diese Strahlung verrät uns unter anderem, dass das frühe Universum überraschenderweise überall die gleichen Eigenschaften besaß. Zwar existieren durchaus Mechanismen, die zum Ausgleich aller Unregelmäßigkeiten hätten führen können (beispielsweise könnte Materie von einem Ort zum anderen strömen), doch keiner von ihnen hätte genügend Zeit zur Verfügung gehabt, um ausreichend wirksam zu werden. Die Homogenität musste also anders erklärt werden.

Dies gelang Alan H. Guth, derzeit am Massachusetts Institute of Technology, in den frühen 1980er Jahren. Er erkannte, dass eine Phase äußerst schneller kosmischer Expansion zu einem homogenen Universum führte. Diese beschleunigte Expansion verdünnte alle vorhandene Materie und glättete etwaige Dichteschwankungen (siehe »Das inflationäre Universum« von Alan H. Guth und Paul J. Steinhardt, Spektrum der Wissenschaft 7/1984, S. 80 sowie »Das selbstreproduzierende inflationäre Universum« von Andrej Linde, 1/1995, S. 32).

Sie führte zwar nicht zu einer perfekten Homogenität. Doch auch dies ist eine wichtige Vorhersage der Theorie. Denn die Energiedichte des Raums unterlag während der Inflationsphase so genannten Quantenfluktuationen. Durch die Inflation wurden solche winzigen Schwankungen zu astronomischer Größe aufgebläht und spiegelten sich schließlich auch in der Verteilung der Energiedichte im späteren Universum. Und tatsächlich: Bei der Vermessung der kosmischen Hintergrundstrahlung traten die von der Inflationstheorie vorhergesagten Schwankungen zu Tage. Vorhersage und Beobachtung stimmen sogar mit geradezu spektakulärer Genauigkeit überein. Dieser Erfolg machte das Inflationsmodell zum vielversprechendsten Kandidaten für die Beschreibung der frühesten Geschichte unseres Kosmos. Satellitenmissionen wie das Planck-Observatorium, das die Europäische Weltraumbehörde Esa noch in diesem Jahr ins All befördern will, werden zeigen, ob sich auch weitere Vorhersagen der Inflationstheorie bestätigen lassen.

Ziemlich undurchsichtig ist bislang allerdings die Frage, warum ein mit herkömmlicher Materie gefülltes Universum überhaupt in eine inflationäre Phase übergehen soll. Die fundamentalen Gesetze der Physik legen eine plötzlich beschleunigte Expansion jedenfalls nicht nahe. Diese ließe sich nur durch eine Energie mit sehr ungewöhnlichen Eigenschaften antreiben. Ihre Dichte muss positiv sein und sogar während der stürmischen Expansion des Universums mehr oder weniger konstant bleiben; andererseits aber muss die Energiedichte dann schlagartig abnehmen, damit die Inflationsphase auch wieder ein Ende findet.

Doch wie kann die Energiedichte – von welchem physikalischen Objekt auch immer – während der Expansion konstant bleiben, wenn die Expansion doch zwangsläufig mit einer Verdünnung einhergeht? Auch dafür haben Stringtheoretiker eine Lösung. Ein den gesamten Raum erfüllendes Skalarfeld könnte als Energiequelle dienen. Ein Skalarfeld wird an jedem Ort im Raum durch eine einzige Zahl beschrieben, nämlich durch seine Stärke an genau diesem Ort. (Etwas komplizierter sind Vektorfelder wie etwa Magnetfelder. Sie besitzen an jedem Ort im Raum sowohl eine Feldstärke als auch eine Richtung. Weitere Beispiele finden Sie in jedem Wetterbericht: Temperatur und Druck sind Skalarfelder, während die Windgeschwindigkeit ein Vektorfeld ist.)

Das Skalarfeld, das die Inflation antrieb, bezeichnet man auch als Inflatonfeld oder schlicht Inflaton. Offensichtlich hat es die kosmische Expansion über einen langen Zeitraum hinweg beschleunigt, bevor die Beschleunigung abrupt endete. Diese Dynamik entspricht der einer Achterbahnfahrt: Zunächst erklimmt die Achterbahn langsam eine sanfte Steigung (»langsam« ist dabei relativ – dieser Teil der Entwicklung verlief für menschliche Verhältnisse sehr schnell). Ist der Gipfel erreicht, endet die Inflation: Die Bahn saust mit atemberaubender Geschwindigkeit abwärts, wobei potenzielle Energie in Bewegungsenergie und letztendlich in Wärme umgewandelt wird.

Die theoretische Beschreibung einer solchen kosmischen Achterbahnfahrt ist allerdings nicht einfach. Während der vergangenen 25 Jahre gab es eine ganze Reihe von Vorschlägen, doch keiner davon ist aus heutiger Sicht wirklich überzeugend. Eine wesentliche Schwierigkeit besteht darin, dass wir schlicht nicht wissen, welche Prozesse bei den enorm

## STRING-VOKABULAR

### Stringtheorie

eine (unbewiesene) vereinheitlichte Theorie aller physikalischen Kräfte und Teilchen

### Inflation

eine Phase sehr stark beschleunigter Expansion des frühen Universums

### beobachtbares Universum

alles, was wir mit Hilfe von Teleskopen sehen können, auch »unser Universum« genannt

### andere Universen

unbeobachtbare Regionen der Raumzeit, die möglicherweise über eigene physikalische Gesetze verfügen

### Calabi-Yau-Raum

eine Geometrie, mit deren Hilfe die sechs zusätzlichen Dimensionen des Raums beschrieben werden

### Bran

Kurzform von »Membran«. Branen sind, abhängig von der Zahl ihrer bis zu neun Dimensionen, punktförmige (0 Dimensionen), fadenförmige (1), flächige (2) Objekte und so weiter. An einer räumlichen D3-Bran kann ein ganzes Universum »kleben«

### Feld

eine Energieform, die den Raum erfüllt

### Skalarfeld

ein Feld, das an jedem Ort durch einen einzigen Zahlenwert definiert ist. Beispiele: Temperatur, Inflatonfeld

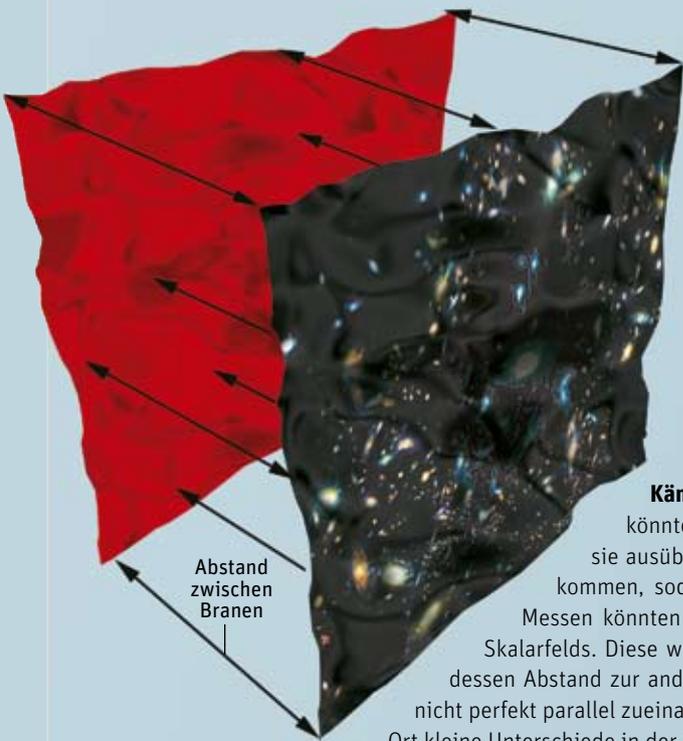
### Moduli

spezielle Skalarfelder. Sie beschreiben Ausdehnung und Form der zusätzlichen Raumdimensionen

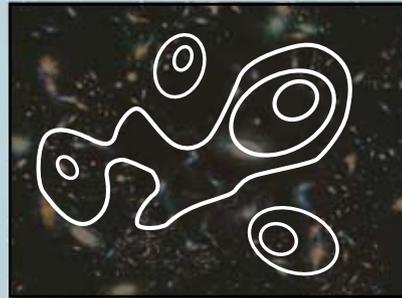
### Annihilation

beschreibt den Prozess, bei dem Materie und Antimaterie beziehungsweise Branen und Antibranen sich gegenseitig vernichten und dabei zerstrahlen

SKALARFELDER: UNTER DEM EINFLUSS DER BRANEN



schematische Darstellung der Abstände zwischen den Branen (Skalarfeld)



**Kämen andere Universen** unserem eigenen nahe, könnten wir dies bemerken. Zwar würde die Kraft, die sie ausüben, aus einer uns nicht zugänglichen Richtung kommen, sodass wir sie gar nicht als Kraft wahrnehmen. Messen könnten wir jedoch die Stärke eines entsprechenden Skalarfelds. Diese würde an jedem Ort davon abhängen, wie groß dessen Abstand zur anderen Bran ist. Weil die Branen wahrscheinlich nicht perfekt parallel zueinander ausgerichtet sind, würden sich von Ort zu Ort kleine Unterschiede in der Stärke des Skalarfelds finden lassen.

**Die Energie**, die in einem solchen Feld steckt, könnte der Antrieb der kosmischen Inflation sein, die unser Universum in seiner Frühzeit binnen kürzester Zeit gewaltig aufblähte. Den winzigen Effekten, wie sie von der Stringtheorie beschrieben werden, hätte die Inflation zu astronomischen Dimensionen verholfen. (Eine erneute Beschleunigung der kosmischen Expansion, angetrieben durch die Dunkle Energie, scheint auch seit einigen Milliarden Jahren stattzufinden.)

**So müsste sich die Energiedichte** eines Skalarfelds verhalten, das die Inflation erklären könnte: Zunächst nahezu konstant im Zeitverlauf, nimmt sie plötzlich abrupt ab.

In Kürze

- ▶ Die Stringtheorie als Kandidatin für eine **fundamentale Theorie der Natur** lässt sich bislang nicht experimentell überprüfen. Die kosmische Inflation, die das atemberaubende Wachstum des Universums nach dem Urknall beschreibt, lässt sich bislang nicht aus fundamentalen physikalischen Gesetzen ableiten. Eine Verbindung beider Theorien löst diese Probleme möglicherweise.
- ▶ Der Stringtheorie zufolge besitzt der Raum neun Dimensionen, durch die sich **zahlreiche Paralleluniversen** bewegen. Stoßen zwei von ihnen zusammen oder verformen sich die zusätzlichen Raumdimensionen, könnte dies unser eigenes Universum zu beschleunigter Expansion anregen.

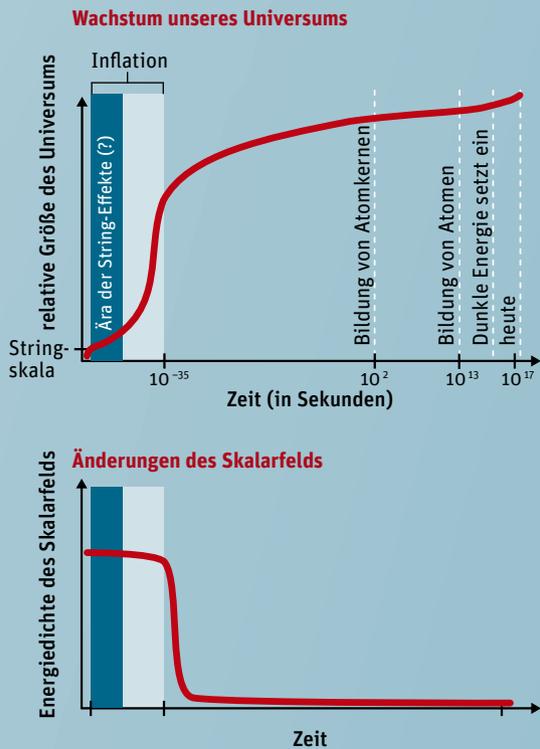
hohen Energien vor sich gehen, die bei der Inflation wahrscheinlich mit im Spiel sind.

Als sich die Idee der Inflation in den 1980er Jahren allmählich durchzusetzen begann, lotete aber auch ein ganz anderes Forschungsgebiet diesen Energiebereich aus. Laut der Stringtheorie sind alle Elementarteilchen in Wirklichkeit winzige eindimensionale Objekte, ähnlich extrem kleinen Gummibändern. Sie führt alle bekannten (und eine ganze Reihe noch nicht nachgewiesener) Elementarteilchen auf unterschiedliche Arten von Schwingungen solcher Strings zurück. Zwei Arten von Strings werden dabei unterschieden: Einige laufen in sich selbst zurück, bilden also winzige Schlaufen. Offene Strings hingegen haben zwei freie Enden. Das Schönste an der Theorie der schwingenden Strings: Aus ihr ergibt sich als ganz natürliche Konsequenz auch die Existenz der Gravitation. Anders als in anderen Elementarteilchentheorien muss man hierzu keinerlei weitere Annahmen treffen.

Trifft das Bild zu, das die Stringtheorie von der Wirklichkeit zeichnet, ist der Raum allerdings nicht mehr, was wir uns gemeinhin darunter vorstellen. Ihr zufolge besitzt er genau neun Dimensionen – gegenüber den drei üblichen Dimensionen Länge, Breite und Höhe. Nimmt man die Zeit hinzu, gelangt man zu einer Raumzeit mit zehn Dimensionen. Für uns sind die Extradimensionen des Raums un-

sichtbar, was daran liegen könnte, dass sie sehr klein sind. Das ist ähnlich einem winzigen Riss im Asphalt eines Parkplatzes. Durch ihn gewinnt dessen zweidimensionale Fläche zwar eine dritte Dimension. Doch wenn der Riss klein genug ist, wird uns die entstandene »Tiefe« des Parkplatzes gar nicht auffallen. Natürlich wissen auch Stringtheoretiker nicht, wie man sich neun Dimensionen bildlich vorstellen soll. Doch wenn uns die Geschichte der Physik eines lehrt, ist es dies: Die Wirklichkeit nimmt keine Rücksicht darauf, ob wir uns von ihr ein Bild machen können.

Neben Strings beschreibt die Stringtheorie auch Dirichlet-Branen. Solche D-Branen ähneln soliden, ausgedehnten Flächen, die durch den Raum treiben. Sie sind zugleich klebrig und rutschig: Die Enden offener Strings bleiben auf einer D-Bran haften, können sich aber immerhin frei auf ihr herumbewegen. Elementarteilchen wie beispielsweise Elektronen sind offene Strings und haften folglich an einer Bran. Nur einige wenige und bislang hypothetische Teilchen wie das Graviton (das die Gravitationskraft überträgt) sind geschlossene Strings oder Schlaufen. Weil sie keine freien Enden besitzen, kleben sie auch nicht fest und können sich daher frei durch die Extradimensionen bewegen. Die Unterscheidung der zwei String-Arten liefert eine zweite Erklärung dafür, dass uns die zusätzlichen Dimen-



MELISSA THOMAS

sionen verborgen bleiben: Unsere Messinstrumente bestehen vielleicht vollständig aus Elementarteilchen, die auf einer Bran gefangen sind. Stimmt dies, könnten wir eines Tages aber trotzdem ein Tor in die Extradimensionen aufstoßen: indem wir mit Hilfe künftiger Instrumente auch Gravitonen vermessen, die nicht an die Bran gebunden sind.

### Leben wir auf einer Branwelt?

D-Branen können mehrere Dimensionen besitzen bis hin zur Höchstzahl von neun. Eine nulldimensionale D-Bran oder D0-Bran ist eine bestimmte Art von Teilchen, eine D1-Bran ist eine bestimmte Art von Faden (auch diese werden als Strings bezeichnet, damit sind aber nicht die fundamentalen Strings der Theorie gemeint), eine D2-Bran ist eine Art Membran oder Wand, eine D3-Bran ist ein Volumen mit Höhe, Tiefe und Breite, und so weiter. Auf einer D3-Bran könnte sogar das gesamte beobachtbare Universum kleben, Physiker sprechen dann von einer Branwelt.

Branen bewegen sich mühsam durch die zusätzlichen Dimensionen. Irgendwo dort draußen im höherdimensionalen Raum könnten daher weitere Branwelten umhertreiben. Jede von ihnen würde für die auf ihnen gefangenen Beobachter jeweils ein ganzes Universum darstellen. In einiger Hinsicht verhalten sie sich zudem wie Teilchen: Sie können zusam-

menstoßen, sich gegenseitig vernichten und sogar Systeme bilden, in denen sich Branen gegenseitig umkreisen.

Doch so reizvoll diese Vorstellungen auch sein mögen, der Prüfstein jeder Theorie bleibt das Experiment. Nach einem Schlüsselexperiment, das beweist, ob die Welt aus Strings besteht oder nicht, suchen die Forscher jedoch seit mittlerweile zwanzig Jahren. Zwar wird in diesen Monaten am Forschungszentrum Cern nahe Genf der weltweit größte Beschleuniger LHC in Betrieb genommen. Doch möglicherweise sind auch die Teilchenenergien, die der Large Hadron Collider erzielt, noch zu gering, um in die winzigen Stringwelten vorzustoßen.

Vielleicht aber stellt die Inflation das lang erhoffte Schlüsselexperiment dar. Sie könnte nämlich bei so hohen Energien stattgefunden haben, dass die String-Natur der Elementarteilchen eine wichtige Rolle spielte. In den letzten Jahren hat sich darum eine Reihe von Physikern daran gemacht, die Inflation mit Hilfe der Stringtheorie zu erklären. Aber das ist leider viel leichter gesagt als getan. Sie überprüften, ob die Stringtheorie die Existenz eines Skalarfelds mit folgenden Eigenschaften vorhersagt: Zum einen sollte die potenzielle Energie des Felds groß, positiv und weit gehend konstant sein, um als mächtige Triebfeder der Inflation zu dienen. Zum anderen muss es möglich sein, dass diese potenzielle Energie abrupt in kinetische Energie umgewandelt wird – dann, wenn die Achterbahn am Ende der Inflationsphase nach unten stürzt.

Die gute Nachricht ist, dass in der Stringtheorie kein Mangel an Skalarfeldern herrscht. Hineinschauen in die Extradimensionen können wir zwar trotzdem nicht, aber solche Skalarfelder geben uns zumindest Hinweise auf ihre Existenz. Stellen Sie sich zum Beispiel eine Reise in einem Flugzeug vor, bei der Sie die Sichtblenden aller Fenster hinuntergezogen haben. Die dritte Dimension, die Flughöhe, können Sie dann zwar nicht sehen, aber Sie fühlen die Höhenänderungen, weil der Luftdruck Ihre Ohren zufallen lässt. Auch hier zeigt die Änderung eines Skalarfelds, in diesem Fall des Drucks, das Vorhandensein einer zusätzlichen Dimension an.

Doch welche physikalische Bedeutung haben die Skalarfelder der Stringtheorie? Einige davon beschreiben Größe oder Form der unsichtbaren Raumdimensionen. In der Sprache der Mathematik sind dies geometrische Moduli. Andere Skalarfelder beschreiben den Abstand zwischen verschiedenen Branwelten. Ein Beispiel: Nähert sich unsere D3-Bran einer anderen D3-Bran und sind beide ein wenig gewellt, dann variiert der Abstand zwischen ihnen von Ort zu Ort. Physiker in Toronto könnten

### WARUM HAT UNSER UNIVERSUM DREI DIMENSIONEN?

Wenn sich eine Bran und eine Antibrän treffen, kommt es zu einem Prozess der gegenseitigen Vernichtung, bei dem reine Strahlungsenergie entsteht. Allerdings nicht sofort. Zunächst bilden sich Bran-Scherben, also kleinere Branen und Antibränen mit einer um zwei geringeren Zahl von Dimensionen als das ursprüngliche Bran-Antibrän-Paar. Eine D7-Bran und eine D7-Antibrän zerfallen beispielsweise in eine Vielzahl von D5-Branen und D5-Antibränen. Diese Scherben vernichten sich ihrerseits zu D3-Objekten, aus denen wiederum D1-Branen und -Antibränen entstehen. Erst danach zerfallen die Objekte ganz.

Durch solche Vernichtungskaskaden zerstrahlen naturgemäß vor allem die größeren Branen, die schnell eine entsprechende Antibrän finden. Kleinere Objekte wie D3- oder D1-Branen treffen in den Weiten des neundimensionalen Raums weit seltener auf entsprechende Antibränen. Lisa Randall von der Harvard-Universität und Andreas Karch von der Universität Washington haben unsere Ergebnisse auf neun expandierende Dimensionen verallgemeinert. Dies könnte erklären helfen, warum die meisten Branen – wie auch unsere eigene – nur vergleichsweise wenige Dimensionen besitzen.

C. B. und F. Q.

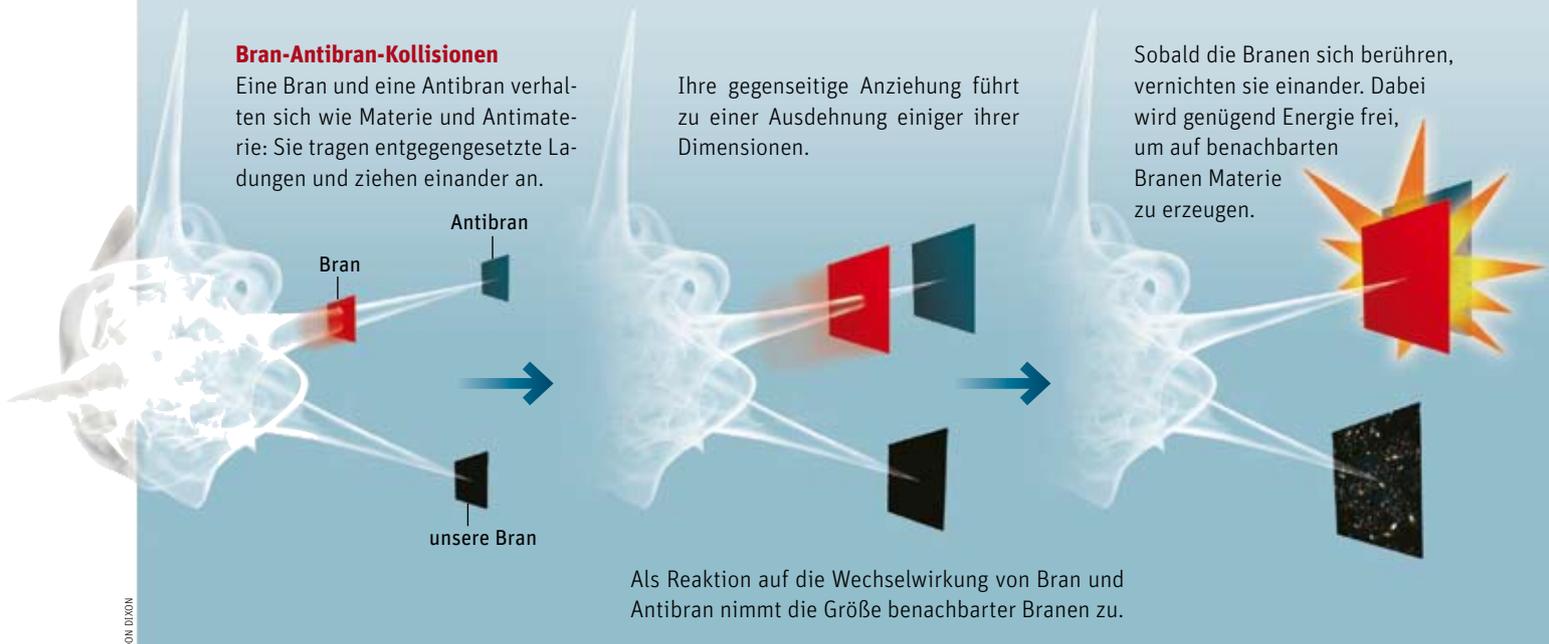
EXPANDIERENDE BRANEN – ZWEI SZENARIEN

**Bran-Antibran-Kollisionen**

Eine Bran und eine Antibran verhalten sich wie Materie und Antimaterie: Sie tragen entgegengesetzte Ladungen und ziehen einander an.

Ihre gegenseitige Anziehung führt zu einer Ausdehnung einiger ihrer Dimensionen.

Sobald die Branen sich berühren, vernichten sie einander. Dabei wird genügend Energie frei, um auf benachbarten Branen Materie zu erzeugen.



Als Reaktion auf die Wechselwirkung von Bran und Antibran nimmt die Größe benachbarter Branen zu.

Die Inflation findet ein natürliches Ende – dann, wenn sich Bran und Antibran in einer gewaltigen Explosion vernichten

für das entsprechende Skalarfeld beispielsweise einen Wert von 1 messen, Physiker in München dagegen den Wert 2; das würde bedeuten, dass die Nachbarbran doppelt so weit von München entfernt ist wie von Toronto.

Auch die nötige Energie, um den Abstand zweier Branen zu verkleinern oder um die Extradimensionen des Raums zu verformen, lässt sich durch ein Skalarfeld beschreiben. Diese Energie könnte Branen auch inflationär expandieren lassen, wie Georgi Dvali von der Universität New York und Henry S.-H. Tye von der Cornell-Universität bereits 1998 vorschlugen. Die ersten Rechnungen für verschiedene Skalarfelder waren allerdings recht entmutigend. Ihre Energiedichten waren zu gering, als dass sie eine Inflationsphase antreiben könnten. Wir haben es eher mit einer Eisenbahn auf ebener Strecke zu tun als mit einer Achterbahn, die eine Steigung erklimmt.

Dies war zumindest die Ausgangssituation, die wir im Jahr 2001 vorfanden. Damals begannen auch wir beide, über dieses Problem nachzudenken – gemeinsam mit Mahbub Majumdar, damals an der Universität Cambridge, sowie mit Govindan Rajesh, Ren-Jie Zhang und dem mittlerweile verstorbenen Detlef Nolte. Letztere arbeiteten zu jener Zeit am Institute for Advanced Study in Princeton im US-Bundesstaat New Jersey. Zur selben Zeit entwickelte auch Georgi Dvali und Sviatoslav Solganik von der Universität New York gemeinsam mit Qaisar Shafi von der Universität Delaware einen ähnlichen Ansatz.

Unsere Neuerung bestand darin, dass wir sowohl Branen als auch Antibranen in Be-

tracht zogen. Branen verhalten sich zu Antibranen wie Materie zu Antimaterie: Sie ziehen einander an, ähnlich wie Elektronen ihre entgegengesetzt geladenen Antiteilchen, die Positronen, anziehen. Kommen sich eine Bran und eine Antibran nahe, bewegen sie sich daher immer weiter aufeinander zu. Die Energie der Branen könnte dabei gerade jene positive Energie sein, die die Inflation in Gang setzt. Ihre anziehende Wirkung führt jedoch auch dazu, dass die Inflation ein natürliches Ende findet – dann nämlich, wenn Bran und Antibran schließlich zusammenstoßen und sich in einer gewaltigen Explosion vernichten. Dies wiederum hat Konsequenzen für benachbarte Branen, zu denen auch unser Universum gehören könnte; in diesem bewirkt die freigeordnete Energie möglicherweise die Entstehung von Materie.

**Auch der Raum entwickelt sich dynamisch**

Unsere Rechnungen im Rahmen dieses Modells zeigten allerdings, dass die Anziehungskraft zwischen Branen und Antibranen viel zu stark wäre, um die Inflationsphase unseres Universums zu erklären. Sie zeigten aber auch, wie ein stetiger Prozess zu einem abrupten Ende kommen kann, das unser Universum mit Teilchen füllt. Unsere Antibran-Hypothese regte auch weitere Überlegungen zu einer Frage an, der Physiker bereits seit geraumer Zeit nachgehen, nämlich, warum unser Universum dreidimensional ist (siehe Randspalte auf S. 31).

Nun machten wir uns an die Verfeinerung unseres Modells. Was würde passieren, wenn

## Formenwandel

Ursprünglich waren die zusätzlichen Dimensionen anders geformt als jetzt. Die potenzielle Energie, die sie in ihre heutige Form gebracht hat, könnte auch die Inflation der drei beobachtbaren Raumdimensionen bewirkt haben.



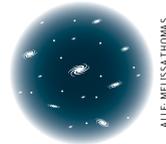
nicht nur die im Raum enthaltenen Branen einer dynamischen Entwicklung unterlägen, sondern auch der Raum selbst? Ursprünglich hatten wir angenommen, dass Größe und Form der zusätzlichen Raumdimensionen unverändert bleiben, wenn sich die Branen bewegen. Diese Vereinfachung war natürlich zu rigoros, denn der Raum krümmt sich nun einmal, wenn er Materie enthält. Andererseits aber war sie durchaus nachvollziehbar: Im Jahr 2001 wusste einfach noch niemand, wie sich Verformungen der Extradimensionen im Rahmen der Stringtheorie ausrechnen lassen.

Binnen nur zweier Jahre änderte sich diese Situation aber ganz erheblich. 2003 entwickelten Shamit Kachru, Renata Kallosh und Andrej Linde von der Stanford-Universität und Sandip Trivedi vom Tata-Institut für Grundlagenforschung im indischen Mumbai einen neuen Formalismus. Dieses nach den Anfangsbuchstaben ihrer Nachnamen als KKLIT-Formalismus bezeichnete Modell beschreibt Umstände, unter denen die Geometrie der Extradimensionen vergleichsweise starr und unflexibel ist, sich also nur wenig verändert, wenn sich Objekte darin umherbewegen. Es sagt eine riesige Anzahl möglicher Konfigurationen der Extradimensionen voraus, die Extradimensionen könnten also in je unterschiedlicher Art und Weise aufgerollt sein. Und jede dieser Konfigurationen entspricht einem möglichen Universum. Vielleicht haben wir es bei dieser Stringtheorie-Landschaft, wie die Theoretiker sagen, sogar mit einer Unzahl tatsächlicher Universen zu tun, von denen jedes eine kleine Fassade des Multiversums darstellt.

## KLETTERN AUF DER GRÖSSENSKALA

Naturphänomene ereignen sich auf einer Vielzahl von Größenskalen. Was auf kleinster Skala geschieht, hat in der Regel aber keine Folgen für großräumige Geschehnisse. Daher ist es schwierig, Quantengravitationstheorien wie die Stringtheorie direkt zu testen – zu diesem Zweck müssten wir in viel kleinere Dimensionen vorstoßen können. Eine Ausnahme macht jedoch die kosmische Inflation. Einige ihrer Eigenschaften könnten auf Phänomenen beruhen, die sich in solch unvorstellbar winzigen Dimensionen abspielten.

**$10^{26}$  METER:**  
beobachtbares  
Universum



ALLE BILDESSTROMAS

**$10^{21}$  METER:**  
Milchstraße



**$10^{13}$  METER:**  
Sonnensystem



**$10^7$  METER:**  
Erde



**$10^{-2}$  METER:**  
Insekt



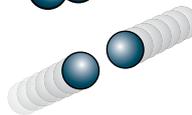
**$10^{-10}$  METER:**  
Atom



**$10^{-15}$  METER:**  
Atomkern



**$10^{-18}$  METER:**  
kleinste Distanz,  
die Teilchen-  
beschleuniger  
derzeit erkunden können



**$10^{-18}$  BIS  $10^{-35}$  METER:**  
typische Ausdehnung  
fundamentaler Strings  
und zusätzlicher  
Dimensionen



**$10^{-35}$  METER:**  
kleinste Länge in der  
Natur, der wir noch eine  
Bedeutung beimessen  
können



## wichtige onlineadressen

### Brainlogs

Blogs für die Welt im Kopf  
[www.brainlogs.de](http://www.brainlogs.de)

**Kernmechanik –**  
von Kernspin bis Kosmologie,  
von Dunkler Materie und Energie  
[www.kernmechanik.de](http://www.kernmechanik.de)

### KOSMOpod

Astronomie zum Hören  
[www.kosmopod.de](http://www.kosmopod.de)

**Portraits, Interieurs,**  
Landschaften, Figurativa u. a.  
Dipl.-Des. Ewa Kwasniewska  
– Kunstmalerin –  
[www.kwasniewska.com](http://www.kwasniewska.com)

### Platinnetz

das Netzwerk für die Generation  
der Jungebliebenen  
[www.platinnetz.de](http://www.platinnetz.de)

### WISSENSlogs

Science unplugged  
[www.wissenslogs.de](http://www.wissenslogs.de)

Hier können Sie den Leserinnen und Lesern von Spektrum der Wissenschaft Ihre WWW-Adresse mitteilen. Für € 83,00 pro Monat (zzgl. MwSt.) erhalten Sie einen maximal fünfzeiligen Eintrag, der zusätzlich auf der Internetseite von Spektrum der Wissenschaft erscheint. Mehr Informationen dazu von

GWP media-marketing  
Susanne Förster  
Telefon 0211 61 88-563  
E-Mail: [s.foerster@vhb.de](mailto:s.foerster@vhb.de)



**Cliff Burgess und Fernando Quevedo** lernten sich in den frühen 1980er Jahren als Doktoranden des international renommierten Physikers und Buchautors Steven Weinberg kennen. Gemeinsam haben sie häufig über die Frage gearbeitet, wie sich aus der Stringtheorie beobachtbare Konsequenzen ableiten lassen. Burgess forscht am Perimeter-Institut im kanadischen Waterloo und ist Professor an der McMaster-Universität bei Hamilton. 2005 erhielt er das Killiam-Fellowship. Quevedo ist Professor an der Universität Cambridge und erhielt bereits eine Reihe von Auszeichnungen. Er setzt sich auch aktiv für die Wissenschaft in seiner Heimat Guatemala ein.

Das elegante Universum. Von Brian Greene. Goldmann 2006

Verborgene Universen. Eine Reise in den extradimensionalen Raum. Von Lisa Randall. S. Fischer, Frankfurt 2006

Die Geburt des Kosmos aus dem Nichts – Die Theorie des inflationären Universums. Von Alan H. Guth. Droemer Knauer, München 2002

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/936490](http://www.spektrum.de/artikel/936490).

Im Rahmen des KKL-Szenarios kann Inflation auf mindestens zwei verschiedene Arten stattfinden. Zum einen lässt sie sich als – durch die Gravitation vermittelte – Reaktion der Extradimensionen auf die Bewegung eines Bran-Antibran-Paars beschreiben. Die Geometrie der Extradimensionen kann recht ungewöhnliche Formen annehmen, ähnlich einem Kraken mit vielen röhrenartigen Armen. Die Bewegung einer Bran durch einen solchen Arm schwächt die Anziehung zwischen Bran und Antibran ab. Diese Abschwächung löst möglicherweise das Hauptproblem unseres ursprünglichen Ansatzes. Die geringere Anziehungskraft erlaubt nun langsamere Veränderungen – langsam genug, um tatsächlich eine Inflationsphase auslösen zu können (siehe auch Kasten S. 32/33).

Zum anderen könnte die Inflation direkt durch Veränderungen in der Geometrie der Extradimensionen angetrieben werden. An diesem Prozess müssten nicht einmal bewegte Branen beteiligt sein. Ein erstes String-Inflationszenario, das auf diese Weise funktioniert, stellten wir gemeinsam mit unseren Kollegen vor zwei Jahren vor. Bei Szenarien dieser Art spricht man auch von Moduli-Inflation, da die Inflatonen in diesem Fall die Moduli-Felder sind, die die Geometrie der Extradimensionen beschreiben. Während die zusätzlichen Dimensionen ihre derzeitige Konfiguration einnehmen, erfahren die üblichen drei Dimensionen eine beschleunigte Expansion; das Universum formt sich sozusagen selbst. Der Moduli-Inflation gelingt es also auch, eine Verbindung zwischen der Größe der sichtbaren Dimensionen und der Größe und Form der zusätzlichen unsichtbaren Dimensionen herzustellen.

Das Schöne an solchen Theorien ist, dass String-Inflationsmodelle, anders als viele andere stringtheoretische Ansätze, möglicherweise schon in naher Zukunft anhand von Beobachtungen überprüft werden können. Bereits seit längerem nehmen Kosmologen an, dass während der Inflationsphase Gravitationswellen entstanden, also wellenartige Verzerrungen von Raum und Zeit. Aktuelle String-Inflationsmo-

delle sagen aber so schwache Gravitationswellen voraus, dass selbst die heute in Planung befindlichen Detektoren sie nicht werden messen können. Darum ist die Planck-Mission für die Zukunft dieser Modelle entscheidend. Der Satellit besitzt die bislang empfindlichsten Detektoren für Gravitationswellen aus der Frühzeit des Universums. Solche Gravitationswellen nämlich prägen der kosmischen Hintergrundstrahlung, für deren hochpräzise Untersuchung Planck entworfen wurde, ein schwaches Muster auf. Weist Planck das Phänomen tatsächlich nach, wirft dies alle bisher vorgeschlagenen String-Inflationsmodelle aus dem Rennen.

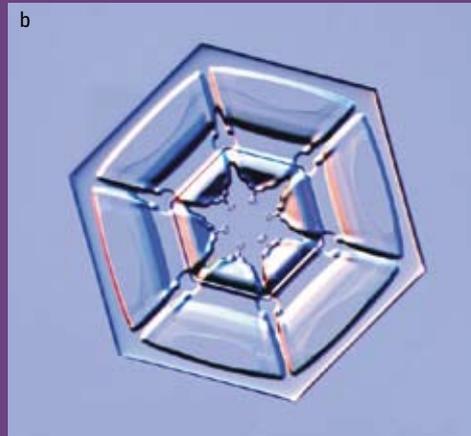
### String von gigantischer Länge

Eine weitere Vorhersage einiger Bran-Inflationsmodelle sind kosmische Strings. Solche großen lang gestreckten Strukturen treten als typische Nebenprodukte der gegenseitigen Vernichtung von Branen und Antibranen auf. Es könnte sich dabei um D1-Branen handeln oder auch um fundamentale Strings, die zu gigantischer Länge gedehnt wurden – oder um eine Kombination von beiden. Existieren sie tatsächlich, verzerren sie das Licht ferner Galaxien, bevor es auf der Erde eintrifft. Astronomen könnten diesen Effekt nachweisen.

Trotz solcher Fortschritte der Theorie bleibt eine Reihe von Fragen unbeantwortet. Noch ist zum Beispiel nicht abschließend geklärt, ob es tatsächlich eine Inflationsphase gab. Sollten genauere Beobachtungen eines Tages Zweifel daran wecken, werden sich die Kosmologen alternativen Szenarien für das frühe Universum zuwenden müssen. Vor dem Hintergrund der Stringtheorie wurden darum bereits einige Alternativen entwickelt, denen zufolge unser Universum bereits vor dem Urknall existierte – vielleicht als Teil eines ewigen Zyklus von Erschaffung und Vernichtung (siehe »Die Zeit vor dem Urknall« von Gabriele Veneziano, Spektrum der Wissenschaft 8/2004, S. 30). Die Herausforderung solcher Modelle wäre insbesondere, den Moment des Übergangs zwischen einem sterbenden und einem entstehenden Universum zu beschreiben, der an die Stelle des Urknalls träte.

Doch derzeit erzielt die Stringtheorie äußerst ermutigende Fortschritte. Als erste Theorie erlaubt sie Physikern, konkrete Modelle für die kosmische Inflation zu entwickeln, ohne dass sie willkürliche Annahmen treffen müssen – gleich, ob sie von zusammenstoßenden Branen oder sich verformenden Extradimensionen ausgehen. Ursprünglich war sie unseren Versuchen zu verdanken, die Welt auf winzigsten Größenskalen zu verstehen – nun aber erheben wir unsere Blicke und fahnden am Nachthimmel nach ihren verräterischen Spuren. <





# Wie Schneekristalle entstehen

Subtile molekulare Vorgänge bestimmen das Wachstum der erstaunlich vielfältigen und kunstvollen Eiskristalle. Ihre Erklärung fordert die Forscher noch heute heraus.

Von Kenneth G. Libbrecht

**O**b Eiswürfelbehälter im Kühlschrank oder gefrorene Seen – Eis nimmt stets die Form seines Gefäßes an. Ganz anders bei Schneeflocken: Hier führt der simple Vorgang des Gefrierens von Wasser stattdessen zu zahllosen komplexen Formen. Deren Vielfalt verblüfft zu Recht – gemäß der alten Redewendung, dass sich keine zwei Schneeflocken exakt gleichen. Im Schneefall eröffnet sich für Naturfreunde eine wundersame Welt, die der amerikanische Autor Henry David Thoreau (1817–1862) so beschrieb: »Wie angefüllt mit kreativem Genie ist die Luft, die das erzeugt! Ich würde es kaum mehr bewundern, wenn echte Sterne fielen und an meinem Mantel hängen blieben.«

Wasser ist ein so präsender Stoff, dass man erwarten würde, es wäre bereits alles über Thoreaus »kreatives Genie« bekannt – wie nämlich Schneeflocken ihre komplexen Strukturen entwickeln. Tatsächlich aber ist ein großer Teil des Wachstums dieser winzigen Meisterwerke auch heute noch ziemlich schwierig zu erklären, selbst auf einer rein qualitativen Ebene. Beim Wachstum der Schneeflocken handelt es sich um ein hochgradig nichtlineares Nichtgleichgewichtsphänomen, bei dem kleinste Prozesse im Nanobereich die Entwicklung komplexer Muster

auf allen Skalen beeinflussen können. Die Analyse von Schneeflocken vereint daher Moleküldynamik, Oberflächenphysik, Wachstumsinstabilitäten, Strukturbildung und Statistische Mechanik. Die Forscher beginnen denn gerade erst zu verstehen, wie die Gebilde ihre typischen Formen erhalten.

Schneekristalle entstehen immer dann, wenn Wasserdampf in der Atmosphäre direkt zu Eis kondensiert, also die flüssige Phase auslässt. Der Begriff »Schneeflocke« entstammt der Meteorologie, der diverse Arten des winterlichen Niederschlags bezeichnet – von einzelnen Schneekristallen bis hin zu Anhäufungen vieler Kristalle, die miteinander kollidieren, aneinander haften und als locker gepackter Flockenball zur Erde rieseln.

Schneekristalle bilden sich gewöhnlich dann, wenn warme, feuchte Luftmassen zusammenstoßen und dort eine Wetterfront entsteht. Schiebt sich die warme Luft dabei nach oben, kühlt sie ab. Unterhalb einer bestimmten Temperatur kann der Wasserdampf der Luft in zahllose Wassertröpfchen kondensieren. Jedes Tröpfchen benötigt dabei einen Kondensationskeim. Diesen liefern die Staubpartikel in der Luft. Die mikrometergroßen, kugelförmigen Tröpfchen streuen das Licht sehr effektiv, deshalb bilden sie sichtbare Wolken. Eine mittelgroße Wolkenbank speichert etwa eine Million Tonnen Wasser, alles in Form winziger, schwebender Tröpfchen.



SOWEIT NICHT ANDERS ANGEZEIGT, ALLE FOTOS DES ARTIKELS: KENNETH LIBBRECHT UND WWW.SNOWCRYSTALS.COM

**Faszinierende Vielfalt natürlicher Schneekristalle:** eine kurze Säule mit fassettierten Flächen, die durch die Konkurrenz um Wasserdampf teilweise ausgehöhlt sind (a), ein hexagonales Plättchen (b), ein sternförmiges Plättchen (c), ein unterteiltes Plättchen (d), ein sternförmiger Dendrit (e), eine Hohlsäule (f), ein Nadelbündel (g), eine Hantel (h) und eine Rosette aus Pyramiden-Prismen mit Plättchen (i). Die kleinsten Prismen sind nur wenige zehntel Millimeter groß, sternförmige Dendriten erreichen dagegen bis zu zehn Millimeter Durchmesser.



Kühlt die so neu entstandene Wolke weiter ab, spielen die Staubteilchen noch eine andere Rolle – sie beschleunigen die Schneebildung. Sobald die Temperatur unter null Grad Celsius sinkt, gefrieren die Wassertröpfchen nämlich nicht sofort. Stattdessen bleiben sie flüssig, sie sind dann in einem so genannten unterkühlten Zustand. Reines Wasser lässt sich, bevor es gefriert, bis zu einer Temperatur von minus 40 Grad herunterkühlen. Staubteilchen stellen nun eine feste Oberfläche bereit, an welcher der Gefrierprozess schlagartig einsetzen kann. Tröpfchen mit eingeschlossenen Partikeln erstarren deshalb bereits bei rund minus sechs Grad. Da die Staubteilchen verschieden groß ausfallen, gefrieren nicht alle Tröpfchen bei derselben Temperatur. Es gibt also beim Abkühlen der Wolke einen Übergangsbereich, in dem die Tröpfchen allmählich fest werden.

Gefriert ein Tröpfchen, beginnt es sogleich zu wachsen, weil an seiner Oberfläche weiterhin Wasserdampf kondensiert. Schneekristalle bilden sich deshalb hauptsächlich aus Dampf und nicht aus flüssigem Wasser. Dieser geht direkt in die Gitterstruktur des Kristalls über. Tröpfchen in der Wolke, die nicht gefrieren, verdampfen langsam und liefern so zusätzlich Wasserdampf zur Bildung von Schneekristallen. Es findet also ein Netto-

transfer von Wassermolekülen aus flüssigen Tröpfchen über Wasserdampf in die Kristalle statt.

Das ist – in groben Zügen – der Weg, auf dem das flüssige Wasser der Wolken gefriert. Um ausreichend Dampf für einen einzigen großen Schneekristall zu liefern, müssen zuvor in einer Wolke rund eine Million winziger Tröpfchen verdampfen. Die Kristalle wachsen und werden dadurch schwerer; schließlich zerrt die Schwerkraft sie aus ihrer wolkgigen Kinderstube.

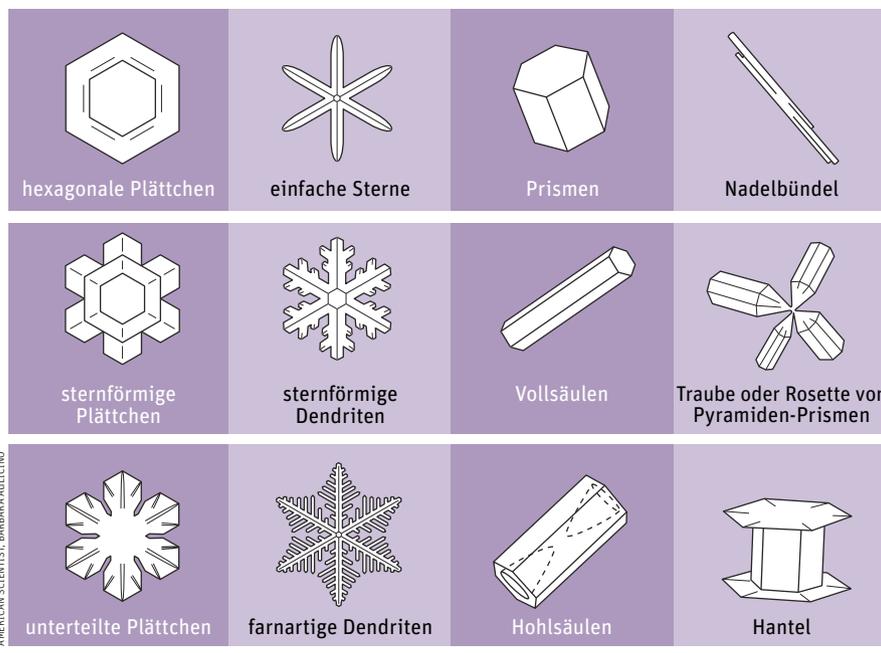
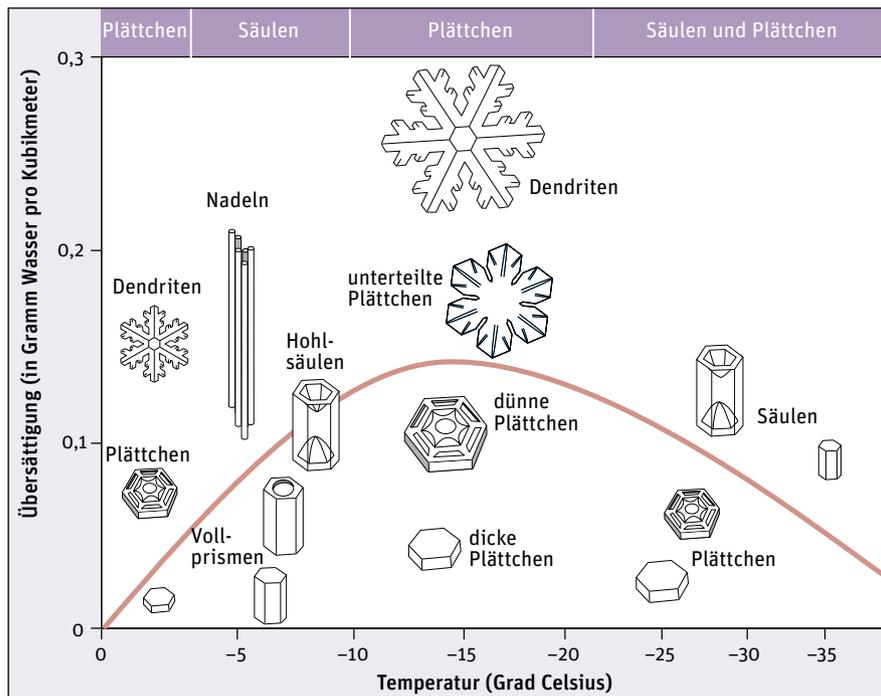
### Hohlräume im Schnee

Die räumliche Anordnung der Atome im Wassermolekül führt dazu, dass Eis ein hexagonales Kristallgitter besitzt – diese Geometrie ist der Grund für die sechszählige Symmetrie aller Schneeflocken. Ihre Kristalle bilden zunächst kleine, hexagonale Plättchen, etwa so groß wie der Punkt am Ende dieses Satzes. Diese elementaren Gebilde können sich dann zu schlanken Säulen, dünnen Platten oder anderen, noch komplexeren Strukturen entwickeln (siehe die Fotos auf dieser Doppelseite).

Typischerweise werden diese beim Wachsen der Kristalle immer komplizierter. Säulenförmige Schneekristalle können kegelförmige Hohlräume an ihren Enden ausbilden – oder sie verwandeln sich in millimeterlange Eisnadeln. Kräftige Säulen

IM IRRGARTEN DER SCHNEEFLOCKEN

Die Struktur der Schneekristalle hängt empfindlich von Temperatur und Luftfeuchtigkeit ab, wie das in den 1930er Jahren von Ukichiro Nakaya entwickelte Diagramm (unten) zeigt. Übersättigung bezeichnet hier den Überschuss an Wasserdampf in der Luft, wenn die Luftfeuchtigkeit 100 Prozent übersteigt. Zwischen null und minus drei Grad entstehen kleine Plättchen und Sterne. Zwischen minus drei und minus zehn Grad bilden die Kristalle dünne Nadeln und lange Säulen. Zwischen minus zehn und minus 22 Grad wachsen im Bereich niedriger Übersättigung Plättchen, während sich sonst größere verzweigte Strukturen entwickeln. Besonders große und fotogene Formen tauchen um minus 15 Grad auf. Bei noch niedrigeren Temperaturen bilden sich wieder kleine Plättchen oder Säulen. Die Kurve in dem Diagramm zeigt Feuchtigkeitswerte dichter Wolken. Die Grafiken ganz unten zeigen eine Auswahl weiterer Unterformen der Kristalltypen, die darüber im Nakaya-Diagramm zu sehen sind.



AMERICAN SCIENTIST, BARBARA AULLICINO

len verbinden sich oft zu ganzen Haufen, so genannten Trauben oder Rosetten. Im Zentralbereich einer solchen Ansammlung konkurrieren die Säulen um den Wasserdampf, dadurch ist das Wachstum dort eingeschränkt. So entstehen die in der Mitte einer Rosette spitz zulaufenden Formen.

Aus kleinen Plättchen können sechs Haupt-äste herausprießen, sodass ein sternförmiger Kristall entsteht. Solche Gebilde werden zwei bis drei Millimeter groß, etwa so groß wie dieses »O«. Die Arme der verzweigten sternförmigen Plättchen entwickeln an ihrer Oberfläche oftmals Riffelungen oder andere Muster. Aus den sechs Zweigen eines Schneekristallsterns können zudem zahlreiche Seitenäste hervorragen, sodass eine farnartige, dendritische Struktur entsteht, die sich bis auf zehn Millimeter Länge auswachsen kann. Die Winkel zwischen den Seitenästen betragen stets ein Vielfaches von 60 Grad, benachbarte Seitenäste wachsen parallel zueinander.

Manchmal beginnt ein Schneekristall als Säule – und wechselt während des Wachstums in die Form einer Platte. So entstehen »Hanteln«, zwei flache Kristalle, die durch eine Säule verbunden sind – wie zwei Räder auf einer Achse. Beispiele reiner Symmetrie sind bei Schneeflocken allerdings eher die Ausnahme, denn es gibt allzu viele Mechanismen, die das perfekte Wachstum eines Schneekristalls stören können.

**Keplers Neujahrsgabe**

Ein junger Schneekristall beginnt zunächst als ein wenige Mikrometer großes Objekt. Solange das Tröpfchen nur einen Eiskristall ohne jeden Defekt bildet, spielt seine ursprüngliche Form für seine spätere, endgültige Struktur keinerlei Rolle. Die detaillierte Morphologie eines individuellen Schneekristalls entwickelt sich erst im Lauf der Zeit, während der Wasserdampf schichtweise an seiner Oberfläche kondensiert. Um die große Vielfalt der Formen von Schneekristallen zu verstehen, müssen wir also die Dynamik ihres Wachstums analysieren.

Johannes Kepler (1571–1630) war der Erste, der Schneekristalle wissenschaftlich untersuchte. 1611 schrieb der Astronom einen kleinen Aufsatz mit dem Titel »Neujahrsgabe oder vom sechseckigen Schnee«. Darin versuchte der Entdecker der Planetengesetze die blütenförmigen Strukturen zu erklären:

Man könne »einwenden, dass die einzelnen Pflanzen je ein besonderes seelisches Vermögen hätten, da sie ja auch von den anderen abgesondert als einzelne Pflanzen existieren. Daher sei es auch nicht verwunderlich, dass jede einzelne Pflanze eine besondere Gestalt be-

sitze. Jedoch beim Schnee für jedes Sternchen eine besondere Seele anzunehmen, das sei lächerlich. Deswegen können die Figuren des Schnees auch nicht in gleicher Weise aus den Wirkungen einer Seele wie bei den Pflanzen abgeleitet werden.

Ersetzt man hier »Seele« etwa durch »komplexe Biochemie lebender Organismen«, dann erweisen sich seine Gedanken als grundsätzlich korrekt. Es gibt keine genetische Blaupause, nach der sich Schneekristalle entwickeln könnten. Ihr Wachstum wird vielmehr durch relativ einfache physikalische Gesetze bestimmt – Gesetze, die viel einfacher sind als die Chemie lebender Organismen –, und trotzdem tauchen dabei ganz spontan komplexe Formen auf. Kepler erkannte, dass die Entstehung komplexer Muster und Strukturen ein interessantes wissenschaftliches Problem darstellt – ein Problem, mit dem sich Forscher noch heute beschäftigen.

Die Erfindung der Röntgenbeugung in den 1920er Jahren eröffnete erstmals einen Blick in kristalline Strukturen und begründete damit die Kristallografie. Rasch zeigte sich die sechszählige Gittersymmetrie der Eiskristalle. Diese Geometrie erklärte zwar die hexagonale Struktur der Schneekristalle, aber noch nicht ihre komplexe Morphologie.

In den 1930er Jahren setzte Ukichiro Nakaya von der Universität Hokkaido in Japan erstmals die wissenschaftlichen Methoden des

20. Jahrhunderts für das Problem ein. Nach seinen bemerkenswerten Untersuchungen befand er, dass nur Laborexperimente klären könnten, unter welchen Bedingungen die verschiedenen Kristalltypen entstehen.

Der Physiker ließ erstmals einzelne Schneekristalle in Kammern wachsen. Bald erkannte er, dass die Morphologie der Flocken hauptsächlich von Temperatur und Feuchtigkeit der Luft abhängen. Unter dem Gefrierpunkt, bei etwa minus zwei Grad Celsius, tauchen dünne, plättchenförmige Kristalle auf. Bei minus fünf Grad entstehen bevorzugt schlanke Nadeln. Bei minus 15 Grad bilden sich die größten und dünnsten plättchenförmigen Kristalle, unter minus 25 Grad wachsen die Kristalle hauptsächlich zu kurzen Säulen heran.

### Je feuchter, desto komplexer

Bei allen Temperaturen, so fand Ukichiro Nakaya heraus, entstehen bei geringer Luftfeuchtigkeit einfache prismenförmige Kristalle, die nur langsam wachsen. Eine höhere Luftfeuchtigkeit dagegen beschleunigt das Wachstum und fördert komplexere Strukturen. Spätere Arbeiten zeigten, dass kleinere Kristalle zumeist einfacher, größere Kristalle dagegen komplexer sind. Der Japaner präsentierte alle seine Daten in einem heute nach ihm benannten Diagramm, in dem die Formen der Kristalle als Funktion von Temperatur und Luftfeuchtigkeit dargestellt sind, das Nakaya-

## In Kürze

- ▶ Keine Schneeflocke gleicht einer anderen. Gleichwohl unterscheiden Forscher **rund 80 Grundtypen**. Ihr Interesse gilt heute vor allem der Musterbildung in einer so genannten Nichtgleichgewichtssituation.
- ▶ Obwohl die **bizarre Temperaturabhängigkeit** als Ursache für die zahllosen Morphologien schon vor acht Jahrzehnten entdeckt wurde, entziehen sich Eiskristalle noch immer einer vollständigen Erklärung.
- ▶ Doch **mit Hilfe raffinierter Präzisionsexperimente und Computersimulationen** nähern sich die Forscher dem Geheimnis eines Phänomens, das für die meisten einfach nur reine Schönheit darstellt.

## HISTORISCHE AUFNAHMEN UND ZEICHNUNGEN



**1665** benutzte **Robert Hooke** eines der ersten, noch sehr schwachen Mikroskope, um die Formen von Schneeflocken zu skizzieren (unten). Wilson A. Bentley, ein Farmer aus Vermont, war der Erste, der Schneeflocken am Mikroskop fotografierte. Seine Sammlung aus den 1920er Jahren enthält über 5000 meisterhafte Bilder (ein Beispiel oben links). In den 1930er Jahren verbesserte Nakaya die Aufnahmetechnik. Er war außerdem der Erste, der synthetische Schneeflocken im Labor erzeugte (oben rechts). Nakaya benutzte Kaninchenhaare, um die Kristalle zu verankern.

FOTO OBEN LINKS: WOOD; FOTO OBEN RECHTS AUS: UKICHIRO NAKAYA, SNOW CRYSTALS - NATURAL AND ARTIFICIAL, HARVARD UNIVERSITY PRESS; ZEICHNUNGEN UNTEREN AUS: ROBERT HOOKE, MICROGRAPHIA, 1665; MONTAGE VON LIBRARY

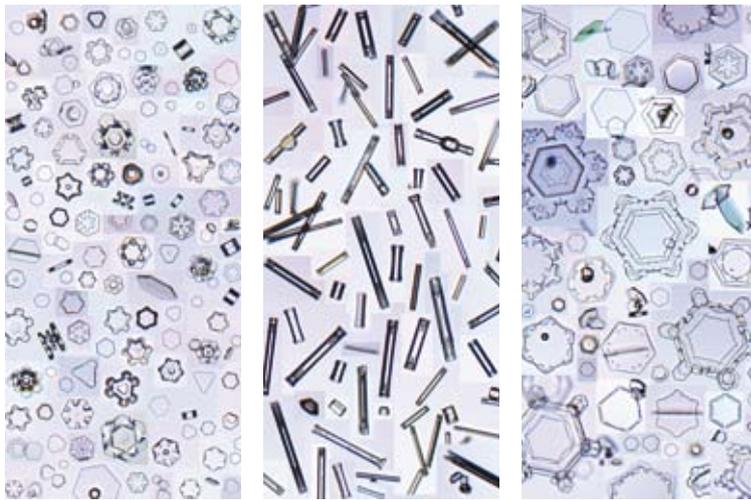
Diagramm (siehe Grafik S. 38). Heute, 75 Jahre später, können wir immer noch nicht alle Phänomene erklären, die dieses einfache Diagramm zeigt. Besonders die seltsame Temperaturabhängigkeit der Kristallmorphologie, die im Verlauf von wenigen Grad geradezu ein oszillatorisches Verhalten zeigt, stellt immer noch ein weitgehend ungelöstes Rätsel dar. Mit dem Nakaya-Diagramm lassen sich je-

doch zwei markante Merkmale der Schneekristalle mühelos erklären: ihre Vielfalt einerseits und das exakt gleiche Aussehen der sechs Zweige sternförmiger Flocken andererseits. Die Erklärung basiert auf Nakayas Beobachtung, dass das Wachstum der Eiskristalle bemerkenswert stark von Temperatur und Luftfeuchtigkeit abhängt.

Während eine junge Schneeflocke in einer Wolke herumwirbelt, ist sie veränderlichen Temperaturen und Luftfeuchtigkeiten ausgesetzt. Dabei variiert auch ständig die Art ihres Wachstums: Der Kristall wächst entweder plättchen- oder säulenförmig, fassettiert oder verzweigt. Da dieser Prozess so empfindlich von Temperatur und Luftfeuchtigkeit abhängt, reichen schon geringe Veränderungen innerhalb der Wolke, um den Wachstumsvorgang umzuwerfen. So erhält der Kristall während seines Flugs durch die Wolke schließlich seine komplexe, vielgestaltige Struktur.

## KÜNSTLICHE KRISTALLE AUS DEM LABOR

**Was Schneekristallen bei verschiedenen Temperaturen passiert**, lässt sich im Labor nachvollziehen. Die hier gezeigten kleinen Kristalle entstanden alle im freien Fall in einer Kammer mit einer mittleren Übersättigung, aber unterschiedlichen Temperaturen. Links: Kristalle, die bei minus zwei Grad Celsius entstanden, in der Mitte bei minus fünf Grad, rechts bei minus 15 Grad.



## Chaos in der Schneewolke

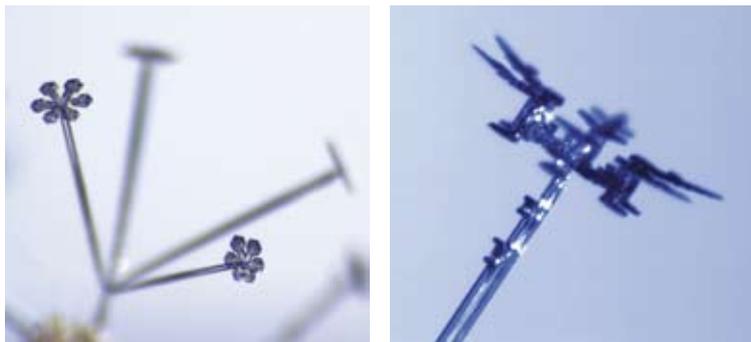
Außerdem ist der Weg, den ein Schneekristall in der Wolke zurücklegt, im Wesentlichen ein Zufallsprodukt turbulenter Luftströmungen. Deshalb durchlaufen zwei Schneeflocken in einer Wolke auch kaum jemals genau die gleiche Bahn. Damit geht die Wahrscheinlichkeit gegen null, dass zwei völlig identische Schneeflocken entstehen. Die Natur hat sich also geradezu verschworen, die erstaunliche Vielfalt der Schneekristalle hervorzubringen. Während jede Flocke ihrem eigenen, individuellen Weg folgt, reisen die sechs Arme eines einzelnen sternförmigen Schneekristalls natürlich stets gemeinsam. Sie sind also alle ständig den gleichen Veränderungen ausgesetzt. Deshalb wachsen diese Zweige synchron.

Es waren vor allem die Arbeiten zahlreicher Forscher in den Bereichen Kristallografie und Metallurgie, die das Verständnis der Schneekristalle weiter verbesserten. Eine wichtige Rolle spielte dabei auch die frühe Halbleiterindustrie: Plötzlich war es wirtschaftlich interessant, große Kristalle zu züchten – und dafür war ein besseres Verständnis des Kristallwachstums nötig.

Fast jeder Kristall entwickelt ebene Grenzflächen, auch Schneeflocken tun das. Gefriert ein Wolkentröpfchen, so entwickelt der Kristall solche Fassetten, weil einige seiner Flächen schneller Material ansammeln als andere. Kondensierende Moleküle werden besonders von abgerundeten Flächen angezogen, die auf atomarer Skala rau sind, weil solche Bereiche mehr molekulare Bindungen anbieten. Molekular ebene Regionen – also fassettierte Flächen – haben dagegen weniger freie chemi-

## NADELZUCHT MIT ELEKTRISCHEN FELDERN

**Im Labor gezogene Schneeflocken:** Einmal wachsen sie an den Spitzen dünner Eisnadeln, die ihrerseits von elektrisch geladenen Drähten sprießen (links). Das starke elektrische Feld zieht Wassermoleküle aus der Luft an und beschleunigt so das Nadelwachstum. Wird dem Draht die elektrische Ladung entzogen, wächst der Kristall wieder normal. Im Wechselspiel von Temperatur und Feuchtigkeit lassen sich damit Designer-Schneeflocken kreieren (rechts). So wachsen an den Spitzen eines Dendriten etwa Hohlsäulen, dann Plättchen am Ende dieser Säulen – fertig ist der Kandelaber.



sche Bindungen und ziehen deshalb weniger Kondensat auf sich.

Ist der Kristall eine Weile gewachsen, bleiben nur die langsam wachsenden Seitenflächen übrig. Das Gebilde wird also fassettiert, unabhängig von seiner ursprünglichen Form. Die molekularen Bindungen an das Kristallgitter bestimmen darüber, welche Flächen langsam wachsen, und damit auch, welche Gitterebenen zu Fassetten werden. Beim Prozess der Fassettierung wird also die Geometrie des Wassermoleküls auf die Geometrie eines großen Kristalls übertragen.

Die Kristalle unterschiedlicher Mineralien unterscheiden sich auch in ihren Seitenflächen – abhängig von den Details ihrer Molekülgitter. Wenn die Fassettierung das Wachstum des Schneekristalls dominiert, entstehen Gebilde mit sechs Seiten- und zwei hexagonalen Grundflächen. Das ist die Grundform kleiner und langsam wachsender Schneekristalle. Überbleibsel dieser Form lassen sich oft in den Zentren größerer, komplexer Schneekristalle erkennen und verraten so deren einfache Ausgangsgeometrie. Unter bestimmten Umständen binden sich Wassermoleküle leichter an die Seitenflächen als an die Grundflächen der Prismen. Auf diese Weise entstehen dünne Eisplättchen. Unter anderen Bedingungen lagern sich Moleküle leichter an die Grundflächen an, wobei Säulen entstehen. In beiden Fällen spielt die Fassettierung eine wichtige Rolle bei der Entstehung unterschiedlicher Formen und Muster.

Aber dieser Prozess kann nicht alles erklären. Denn sonst wären alle Schneekristalle geformt wie einfache hexagonale Prismen – und das ist weit entfernt von der Wirklich-

keit. Wenn der Kristall groß wird – typischerweise etwa einen halben Millimeter – oder wenn er schnell wächst, tritt ein weiteres Phänomen hinzu. Dann nämlich entspringen dem Kristall Zweige. Diesen Effekt bewirkt die so genannte Mullins-Sekerka-Instabilität, fachlich auch Verzweigungsinstabilität genannt. Damit lässt sich im Großen und Ganzen erklären, wie aus nichts weiter als Wasserdampf spontan die blütenartigen Schneekristalle entstehen.

### Spontane Entstehung von Zweigen und Seitenästen

Bei ihrem Wachstum verbrauchen sie den Wasserdampf ihrer unmittelbaren Umgebung. Weiter entfernte Moleküle benötigen etwas länger, bis sie die Kristalloberfläche erreichen. Der Prozess ist deshalb, wie Physiker sagen, »diffusionsbegrenzt«, die verschiedenen Regionen eines Kristalls konkurrieren untereinander um die verfügbaren Ressourcen. Wenn ein Punkt auf einem Kristall – beispielsweise eine der Spitzen eines hexagonalen Plättchens – weiter in die Luft hinausragt als seine Umgebung, dann sammeln sich die Wassermoleküle bevorzugt an diesem Punkt an, einfach weil er schneller zu erreichen ist. Die Spitze wird also etwas schneller wachsen als ihre Umgebung und dadurch noch länger werden. Im Ergebnis ergibt sich eine positive Rückkopplung, sodass aus den sechs Ecken eines hexagonalen Schneekristalls lange Zweige herauswachsen. Auch an zufälligen Verdickungen oder an fassettierten Spitzen der Hauptäste können sich weitere Seitenäste bilden.

Solche Instabilitäten sind der Hauptgrund für die spontane Entstehung von Mustern –

### WENN FLOCKEN ZU SCHNEE WERDEN

**Entstehung:** Sobald mehrere Eiskristalle zusammenkleben, bilden sich wattebauschartige **Schneeflocken**.

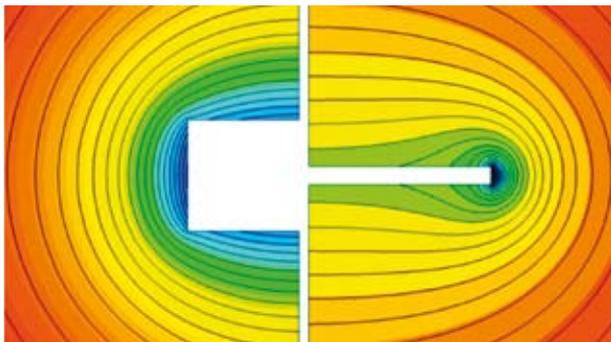
**Gewicht:** Natürliche Schneeflocken werden im Mittel fünf Millimeter groß und 0,004 Gramm schwer.

**Schneefall:** Schnee fällt mit 4 km/h wesentlich langsamer als etwa Regen mit 20 km/h oder gar Hagel.

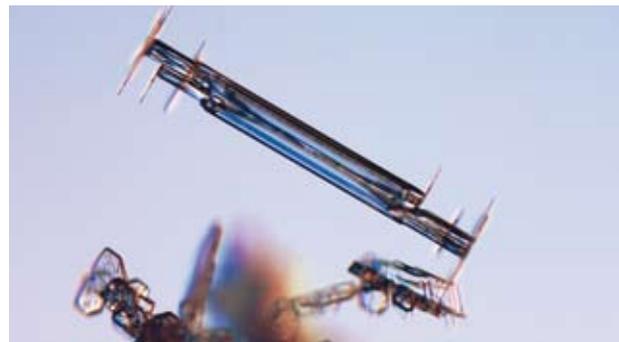
**Schneesmelze:** Schnee kann tauen (nur flüssig werden), schmelzen (flüssig und gasförmig werden) oder sublimieren (nur gasförmig werden). Bei 50 Prozent relativer Luftfeuchte sublimiert Schnee unterhalb von plus 3,5 Grad, schmilzt zwischen 3,5 und zehn Grad und taut oberhalb zehn Grad.

## COMPUTERSIMULATION UND EXPERIMENT

**Flocken im Rechner:** Hier wurde simuliert, wie Wasserdampf schichtweise auf dicken (links) und dünnen (Mitte) Schneekristallplättchen kondensiert. Die Farben entsprechen der Wasserdampfmenge: blau wenig, rot viel Dampf. An den Kopfenden dünner, schnell wachsender Plättchen entstehen dünnere



Schichten, Beleg für die so genannte Messerschneiden-Instabilität. Dieser Effekt beschleunigt das Wachstum dünner Plättchen und erklärt, warum Hanteln entstehen, bei denen ein Kristall schlagartig von säulenförmigem zu plättchenförmigem Wachstum umschwenkt (rechts).



und die Natur ist letztlich eine Anhäufung von übereinandergeschichteten instabilen Systemen. Die Sonne erhitzt die Luft am Erdboden, warme Luft steigt auf – und diese Konvektionsinstabilität erzeugt Winde, Wolken und Wetter. Der Wind wiederum bläst über die Meere und destabilisiert deren Oberfläche – Wellen peitschen übers Wasser und treiben Feuchtigkeit in die Atmosphäre.

Flächenbildung und Verzweigung sind die zwei wichtigsten Vorgänge beim Flockenwachstum, aber sie wirken in unterschiedliche Richtungen. Fassettierung stabilisiert, da sie ebene Flächen und einfache Formen ausbildet. Damit allein wären alle Schneekristalle hexagonale Prismen. Im Gegensatz dazu destabilisiert die Verzweigung, sie transformiert einfache in komplexe Formen. Verzweigung allein würde Kristalle erzeugen, die zwar viel Struktur, aber keinerlei Symmetrie besäßen – sie würden in etwa aussehen wie winziges Dornengestrüpp. Es ist das permanente Wechselspiel beider Prozesse, das die Vielfalt von Formen und Muster der Schneekristalle erzeugt.

### Erst modernste Technologien enthüllen das Geheimnis der Kristalle

Verzweigung und Fassettierung erklären zwar viele Eigenschaften der Flockenbildung. Aber die Prozesse erhellen noch nicht die konkreten Kristallformen im Nakaya-Diagramm. In den vergangenen Jahren habe ich Schneekristalle unter kontrollierten Bedingungen untersucht und vermessen. Einen solchen Ansatz hat zwar auch schon Nakaya verfolgt – doch ich kann heute auf die Technologien des 21. Jahrhunderts zurückgreifen: Laserinterferometrie, digitale Datenaufzeichnung, präzise Temperatursteuerung und anderes, von dem Nakaya nicht einmal zu träumen wagte.

Ich hatte erwartet, dass das Wachstum der Kristalle bei meinen Messungen stark von der Temperatur abhängen würde. Denn wenn bei nur wenigen Grad Unterschied einmal dünne Plättchen, einmal schlanke Säulen entstehen, dann sollten sich die Wachstumsraten der Seiten- und Grundflächen von Prismen deutlich unterscheiden und sich stark mit der Temperatur verändern. Doch meine Messungen wiesen auf etwas anderes hin. Es gab zwar Unterschiede zwischen einzelnen Flächen, aber sie waren bei Weitem nicht so groß wie erwartet. Und die Wachstumsraten änderten sich mit der Temperatur, jedoch ebenfalls viel weniger als gedacht – zu wenig, um all die Unterschiede im Nakaya-Diagramm zu erklären.

Die Situation wurde noch spannender, als ich begann, das diffusionsbegrenzte Wachstum von Kristallen, speziell von dünnen Plätt-

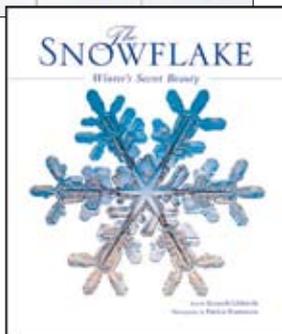
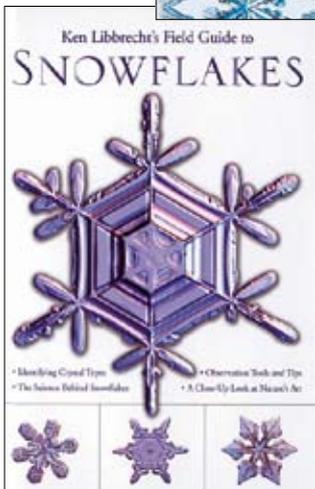
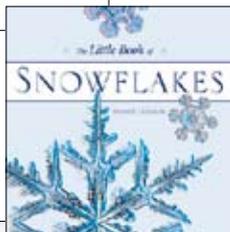
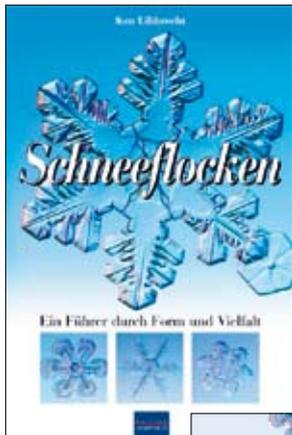
chen, im Computer zu simulieren. Die übliche Lehre der Verzweigungsinstabilität sagt voraus, dass die Feuchtigkeit an den Kanten der Plättchen am höchsten wird. Doch meine Modelle zeigten, dass das schnelle Wachstum an den Kanten der Plättchen zu einem Verbrauch des Wasserdampfs führt, sodass die Feuchtigkeit dort sogar niedriger ist als in anderen Regionen. Dieses Resultat widerspricht jeder Intuition. Die Verzweigungsinstabilität unterstützt das Wachstum dünner Plättchen nicht, sondern trägt eher zum Entstehen dickerer Formen bei.

Meine Messungen zu den Morphologien der Kristalle im Nakaya-Diagramm waren jedenfalls mit dem bisherigen Stand des Wissens nicht vereinbar. Die Modelle legten ja nahe, dass die Wachstumsraten im Verlauf von wenigen Grad um einen Faktor von 100 oder gar 1000 hochschnellen müssten. Doch das ist nach allem, was wir über die Dynamik dieser Prozesse wissen, wenig plausibel. Und tatsächlich zeigten die Daten, dass keine so großen Änderungen auftreten. Es musste also einen bislang unbekanntem Prozess geben, der zu den dramatischen Effekten in der Kristallform führte.

Die Lösung lag nach meiner Überzeugung in einer »strukturabhängigen Kinetik der Anlagerung« (*structure-dependent attachment kinetics*). Nach dieser Hypothese hängt die intrinsische Wachstumsrate einer fassettierten Oberfläche von ihrer Struktur ab. Insbesondere behauptete ich, dass eine extrem schmale Seitenfläche, wie sie an den Kanten sehr dünner Plättchen existiert, sehr viel schneller wächst als breitere Fassetten. Die Molekulardynamik, die zu diesem Verhalten führt, ist allerdings noch unklar. Möglicherweise sind Moleküle an den Kanten eines dünnen Plättchens weniger stark gebunden als an größeren Flächen, einfach weil sie weniger Nachbarmoleküle besitzen, an die sie sich binden können.

Das könnte dazu führen, dass solche Kanten intrinsisch rauer werden, da die Oberflächenmoleküle mehr Spielraum haben, sich hin und her zu bewegen. Eine rauere Oberfläche ist wiederum für kondensierende Moleküle attraktiver, was dann die Wachstumsrate erhöhen würde. Die Eisoberfläche besitzt ja eine höchst komplexe Molekularstruktur, die selbst für simple Fälle noch nicht vollständig verstanden wird. Deshalb kann derzeit niemand meine Hypothese beweisen oder widerlegen.

Eine strukturabhängige Kinetik der Anlagerung führt zu einem neuartigen Wachstumsverhalten, das ich »Messerschneiden-Instabilität« genannt habe. Wird die Kante eines



plättchenförmigen Kristalls, die zunächst eine bestimmte Breite hat, etwas dünner, dann beschleunigt die strukturabhängige Kinetik der Anlagerung das intrinsische Wachstum der Kante. Dies wiederum macht sie noch dünner, eben scharf wie eine Messerschneide, und lässt sie noch schneller anwachsen. Auch hier liegt wieder eine positive Rückkopplung vor, welche die Entstehung dünner, plättchenförmiger Strukturen verstärkt. Die Instabilität bleibt so lange bestehen, bis ein anderer Mechanismus eine weitere Schärfung der Kanten unterbindet.

Die Messerschneiden-Instabilität liefert nicht nur eine plausible Erklärung für die Beobachtungen meiner Experimente, sie erklärt auch viele Eigenschaften natürlicher Schneekristalle. So zeigten beispielsweise Nakayas Experimente, dass große sternförmige Kristalle – weitgehend unabhängig von Größe und Komplexität – zumeist rund 0,01 Millimeter dick sind (etwa ein Zehntel der Dicke eines Blatts Papier). Das ist genau das, was man bei so einer Instabilität erwartet, und es ist schwer auf andere Weise zu erklären.

Auch ein anderes Phänomen lässt sich damit verstehen. So zeigen hantelförmige Kristalle häufig einen scharfen Übergang zwischen Säulen- und Plättchenform. Ein scheinbar unvermittelt auftretender Wechsel zwischen beiden Wachstumstypen führt zu dünnen Plättchen an den Enden der Säule. Eigentlich würde man einen allmählichen Übergang erwarten, der zu dickeren Plättchen führt, aber das entspricht nicht den Beobachtungen.

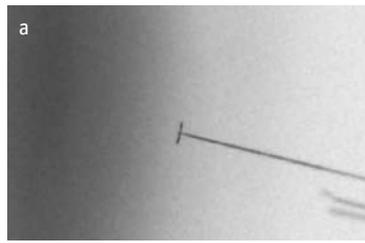
### Auf des Messers Schneide

Der Grund dafür ist, dass Instabilitäten kleine Änderungen häufig verstärken. Ändert sich die lokale Umgebung nur ein wenig, was die Plättchenbildung favorisiert, dann lässt die Messerschneiden-Instabilität die Plättchen immer dünner werden. Die Instabilität verändert also das Wachstum abrupt, obwohl die äußeren Bedingungen nur langsam variieren.

Diese Verstärkung ist eine wichtige Eigenschaft der Messerschneiden-Instabilität, denn sie reduziert die temperaturabhängigen Wachstumsraten, die zur Erklärung des Nakaya-Diagramms nötig sind, ganz erheblich. Wir wissen zwar immer noch nicht, worum es sich bei diesen Temperatureffekten handelt, aber sie können zumindest nicht mehr ganz so dramatisch sein. Kleine temperaturabhängige Wachstumsvorgänge können so verstärkt werden, dass die beobachteten Kristallmorphologien entstehen.

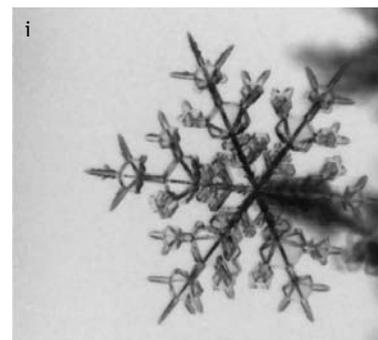
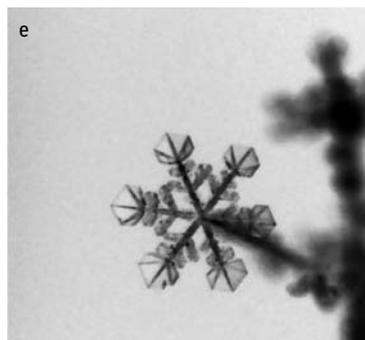
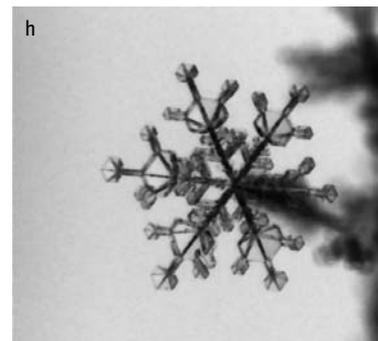
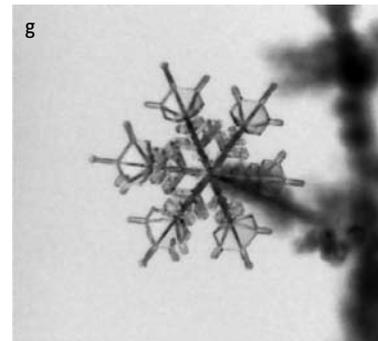
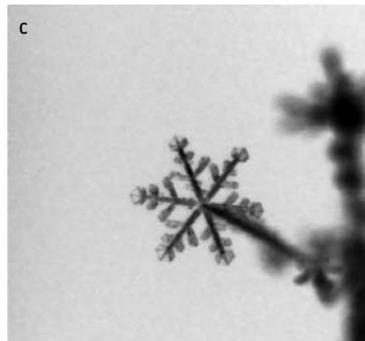
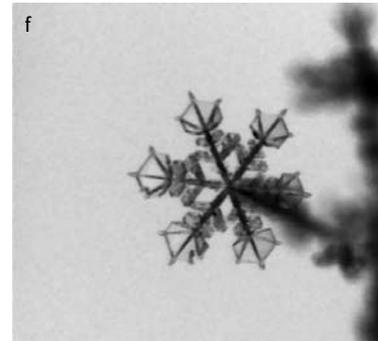
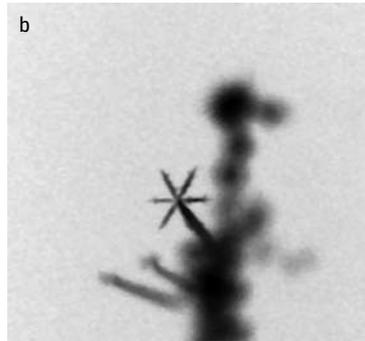
Offenbar wachsen Kristalle im Nanobereich auf Grund der Messerschneiden-Instabilität ganz anders als in größeren Dimensionen.

## DESIGNER-SCHNEEKRYSTALLE

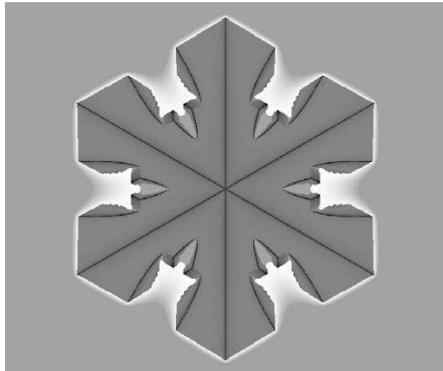


### Eine Schneeflocke wächst im Labor:

Zunächst waren Temperatur und Luftfeuchtigkeit so eingestellt, dass sich der Kristall verzweigte. Dann wurden die Bedingungen geändert – nun bildeten sich Flächen und Plättchen aus.



## WACHSEN EISKRISTALLE WIE ZELLULARAUTOMATEN?



COMPUTERSIMULATIONEN: DAVID GRIFFEATH UND JANKO GRAVNER, UNIVERSITY OF WISCONSIN

**Flocken als Zellularautomaten:**

Mit diesem Verfahren, bei dem dynamische Systeme räumlich und zeitlich diskret behandelt werden, gelang es Mathematikern, das Wachstum von Schneekristallen zu simulieren. Die simulierten Objekte folgen weitgehend denselben Regeln wie natürliche Schneekristalle.

Dies kann von großer Bedeutung für die Nanotechnologie sein, beispielsweise für die Selbstmontage komplexer Nanoteile aus einem Gemisch vorgegebener Materialien. Derzeit ist nicht klar, wie häufig diese Instabilität vorkommt oder welche anderen Überraschungen uns bei der Nano-Wachstumodynamik noch blühen.

Ich bin jedenfalls davon überzeugt, dass diese neu entdeckte Instabilität neben Fassetierung und Verzweigung der dritte wichtige Effekt für die Entwicklung von komplexen Schneekristallen ist. Sie scheint eine zentrale Rolle für die großräumige Struktur der meisten Flocken zu spielen und sie liefert uns einen wichtigen Verstärker, mit der sich die Morphologien im Nakaya-Diagramm erklären lassen. Ohne Messerschneiden-Instabilität wären Schneekristalle kleiner, dicker und die meisten ihrer schönen Eigenschaften würden ihnen fehlen.

**Elektrisch modifiziertes Wachstum**

Die Messerschneiden-Instabilität ist zwar eine bestechende Idee, aber bislang nur eine Hypothese. Weitere Experimente und Modelle sind nötig, um genau zu verstehen, wie Kristalle wachsen. So müssen wir mehr über Eisoberflächen wissen, damit die Molekulardynamik der Anlagerung erklärt werden kann. Auf molekularer Ebene zeigt Eis temperaturabhängige Erscheinungen wie Oberflächenschmelzen, Aufrauung und andere Phänomene. Wir kennen zwar die Oberflächenphysik von Eis immer besser, aber die Theorie ist noch lange nicht komplett. Eis überrascht uns immer wieder; es auf molekularer Ebene zu verstehen bleibt eine Herausforderung.

Außerdem benötigen wir bessere Computermodelle des Kristallwachstums. Das diffusionsbeschränkte Gefrieren wird heute schon besser modelliert, doch bislang hat noch niemand ein akkurates Computermodell des dif-

fusionsbegrenzten Wachstums unter Berücksichtigung starker Fassetierung entwickelt. Einige viel versprechende Arbeiten auf diesem Gebiet aus jüngerer Zeit stammen von David Griffeath von der University of Wisconsin-Madison und Janko Gravner von der University of California in San Diego. Beide Mathematiker verwenden Modelle auf Basis zellulärer Automaten, um das diffusionsbegrenzte Wachstum zu simulieren.

Weiterhin ist es wichtig, das Kristallwachstum für weitere, ganz unterschiedliche äußere Bedingungen – Temperatur, Luftfeuchtigkeit oder Luftdruck – zu messen. So führt beispielsweise eine Verringerung des Luftdrucks dazu, dass Wassermoleküle rascher diffundieren, was wiederum die Verzweigung von wachsenden Kristallen verringert. Auch ist die Frage noch offen, wie Druckschwankungen sich auf die Messerschneiden-Instabilität auswirken.

Meine Forschungsgruppe entwickelt gegenwärtig Methoden, bei denen das Kristallwachstum elektrisch modifiziert wird, was zur Bildung extrem dünner Nadeln führt. Auf deren Spitzen können wir inzwischen plättchen- oder säulenförmige Kristalle wachsen lassen. Ohne störende Luftströmungen werden solche Kristalle größer als in der freien Natur; bislang haben wir Flocken von bis zu 25 Millimeter Größe produziert. Innerhalb gewisser Grenzen können wir sogar Designer-Schneeflocken mit Mustern erzeugen, die wir selbst entworfen haben (siehe Kasten S. 41). Andere Gruppen, insbesondere an der Staatsuniversität Washington und der Staatsuniversität von Pennsylvania, benutzen elektrodynamische Levitation, um einzelne Schneekristalle unter unterschiedlichen Umgebungsbedingungen wachsen zu lassen. So stehen wir heute unmittelbar vor der Beantwortung jener Fragen, die Kepler vor 400 Jahren aufgeworfen hat, als er erstmalig über die wundervollen Formen der Schneeflocken nachgedacht hat. <



**Kenneth G. Libbrecht** lehrt Physik am California Institute of Technology in Pasadena. Seine Forschungen decken einen weiten Bereich ab – von der Sonnenaktivität bis zu Gravitationswellen. Von ihm stammen auch mehrere Bücher zum Thema.

© American Scientist  
[www.americanscientist.org](http://www.americanscientist.org)

Schneeflocken. Juwelen des Winters. Von K. G. Libbrecht. Sanssouci, München 2005

The art of the snowflake: a photographic album. Von K. G. Libbrecht. Motorbooks International, 2007

Ken Libbrecht's field guide to snowflakes. Von K. G. Libbrecht. Voyager Press, 2006

Bilder von Schneekristallen:  
[www.snowcrystals.com](http://www.snowcrystals.com)

Homepage des Autors:  
[www.its.caltech.edu/~atomic/](http://www.its.caltech.edu/~atomic/)

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/936494](http://www.spektrum.de/artikel/936494).

HOHLWELTTHEORIE

## Das Äußerste nach innen gewendet

Kann man abwegige Ideen widerlegen? Oder leben wir wirklich auf der Innenseite einer Hohlkugel?



Von Norbert Treitz

Es gibt eine ganze Reihe von Theorien, deren Erfinder und Anhänger sich als verkannte Wissenschaftler sehen. Diese Leute vergleichen sich gerne mit Kolumbus oder Robert Mayer (1814–1878), der als einer der Ersten den Ersten Hauptsatz der Thermodynamik formulierte, und hoffen, dass sie wie diese zunächst verkannten Helden »dann doch Recht behalten« werden. Man kann darüber streiten, ob Kolumbus oder Mayer nicht eher trotz ihrer Irrtümer und unzulässigen Schlüsse zufällig erfolgreich waren. Dagegen werden überholte Theorien wie die aristotelische Mechanik oder die Phlogiston-Chemie heute oft nur noch als falsch angesehen und die Leistungen ihrer Schöpfer weit unterbewertet.

Anders ist die Lage bei den so genannten Hohlwelttheorien. Diese sind schlicht unsinnig, aber zumindest eine von ihnen lässt sich nicht widerlegen. Damit wird sie als Stoff für erkenntnistheoretische und didaktische Reflexionen lehrreich.

Dieser Artikel ist dem Andenken an Prof. Roman Ulrich Sexl (1939–1986) gewidmet, der nicht nur dieses Thema ebenso lehrreich wie unterhaltsam behandelte.

Wenn man sie nicht als falsch erweisen kann: Mit welchem Recht darf man sie dann in den Papierkorb werfen? Weil sie dem »gesunden Menschenverstand« widerspricht? Das wäre kein gutes Argument, denn die Physik mutet den Menschen mehr unplausible Dinge zu als alle Pseudowissenschaften zusammen.

Kann man andersherum alle Lehrmeinungen, für die es keine klare Widerlegung gibt, einfach gelten lassen? Diese Idee geistert zuweilen durch den wissenschaftlichen Diskurs, garniert mit dem Stichwort »Relativität« oder gar mit der »konstruktivistischen« Idee, jedes Bewusstsein schaffe sich ohnehin seine eigene Wirklichkeit, und alle diese Wirklichkeiten seien im Prinzip gleichberechtigt. Aber dann kann man das Streben nach Wissenschaft gleich ganz bleiben lassen. Es soll jeder auf eigene Kosten schreiben und reden können, was er glaubt, ohne eingesperrt oder gar gefoltert zu werden. Aber Forschungsministerien und öffentliche Schulen müssen sehr wohl zwischen Wissenschaft und Esoterik diskriminieren, und das heißt unterscheiden.

Im Gegensatz zu Kreationismus und »Intelligent Design« ist die Außenseitertheorie, von der hier die Rede ist, völlig harmlos. Vielmehr hat sie den Rang eines interessanten Denkfehlers, über den sich ein guter Lehrer Gedanken macht, statt ihn nur rot anzustreichen.

Die Vertreter der Hohl-Weltbilder nehmen an, dass wir auf der Innenseite einer Hohlkugel von etwa 40 000 Kilometer Umfang herumlaufen und in deren Innerem die ganze Astronomie stattfindet. Der Alchimist Cyrus Reed Teed (1839–1908) formulierte 1870 die Idee als Erster, ein Verfechter in den 1930er Jahren hieß Johannes Lang, und heute findet man im WWW etliche Anhänger.

### Die Galaxis in einer Nusschale

Die Atmosphäre, die Bahnen von Mond und Planeten, die Sterne und Galaxien liegen also sämtlich im Inneren unserer Hohlkugel, und wir sind wie Ameisen, die sich in eine Weihnachtsbaumkugel verirrt haben. Die Schächte der Bergwerke bohren wir radial nach außen. Müsste man dann nicht bei gutem Wetter ganz ohne Spiegel bis Australien sehen oder Radiosendungen von dort direkt empfangen können?

Diese Frage setzt voraus, dass Licht und Radiowellen sich geradlinig ausbreiten. Das stimmt wegen der Brechung bereits in der Atmosphäre nicht genau; beim Weg durch eine Brille ist die Abweichung schon deutlich größer, und in der Nähe von Neutronensternen oder gar Schwarzen Löchern kann von Geradlinigkeit keine Rede mehr sein. Vernünftige Hohlweltanhänger würden uns dazu mitteilen, dass das Licht im Vakuum



Der Blick von außen auf dieses Modell (links) enthüllt nicht, dass es sich um eine Hohlkugel handelt. Das Pappmaché-Modell einer hohlen Erde hat Martin Straube im Rahmen einer Physik-Facharbeit am Gymnasium Wittenberg angefertigt.

FOTOS: LINKS: MARTIN STRAUBE; ALLE GRAFIKEN DES ARTIKELS: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, ILMCH; NOBERT TREITZ

stimmt durch die Tangentialebene an die Kugel durch seinen Standort. Das ist offensichtlich wegen der geradlinigen Ausbreitung des Lichts so. (Auf der Erde senkt die atmosphärische Brechung den realen Sichthorizont gegen den geometrischen ab, und zwar ungefähr um den Durchmesser der auf- oder untergehenden Sonne.)

In der Hohlwelt mit ihrer kreisförmigen Lichtausbreitung ist der Horizont nun eine exzentrische Kugel, die durch den Mittelpunkt der Hohlwelt geht und ihre Oberfläche am Ort des Betrachters von innen berührt. Das Äußere dieser kleineren Kugel ist für den Betrachter unsichtbar, nämlich durch den Erdboden verdeckt. Die Sterne, Planeten und Erdsatelliten laufen – grob gesagt – auf ziemlich kleinen Bahnen einmal am Tag um das Zentrum der Hohlwelt herum. Dabei tauchen sie einmal in den sichtbaren Bereich ein und wieder aus ihm heraus. Die Schattenspiele, die wir Finsternisse, Mond- und Venusphasen und so weiter nennen, sind zwar verwickelt, aber im Prinzip problemlos zu erklären.

Wenn sich nur ein Schiff nähert, schaut zuerst nur seine Mastspitze aus dem Wasser heraus, und wir sagen mit Recht, dass sich das übrige Schiff auf der konvexen Erdkugel noch unter unserer tangentialen Horizontebene befindet. Die Hohlweltdeutung ist aber ebenso widerspruchsfrei: Das Schiff fährt auf der Innenseite der Erdoberfläche, seine Mastspitze zeigt nach innen und ragt als Erstes in unsere Sichtbarkeitskugel hinein, die nur ein Achtel des Erdvolumens hat (Bild unten).

Nun machen wir ein Gedankenexperiment: Wir schicken von der Erdoberfläche aus ein Raumschiff mit einem Ro-

boter und einem hinreichend langen Maßband zum Jupiter und bitten ihn, dessen Umfang zu messen. Er findet einen Umfang, der rund zehnmal so groß ist wie der Äquator der Hohlwelt.

Wenn wir das für unmöglich halten, dann vor allem, weil wir an die Längenkonzanz von – zum Beispiel – Maßbändern glauben. Dabei lernen wir schon in der Schule, dass die Länge eines Maßstabs (und anderer Gegenstände) von der Temperatur abhängt, wenn auch nur geringfügig. Und die relativistische Längenkontraktion bei Geschwindigkeiten in der Nähe der Lichtgeschwindigkeit ist keineswegs immer so winzig.

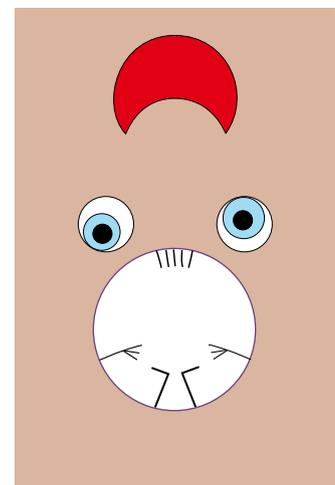
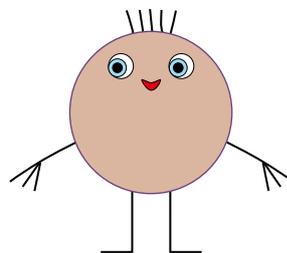
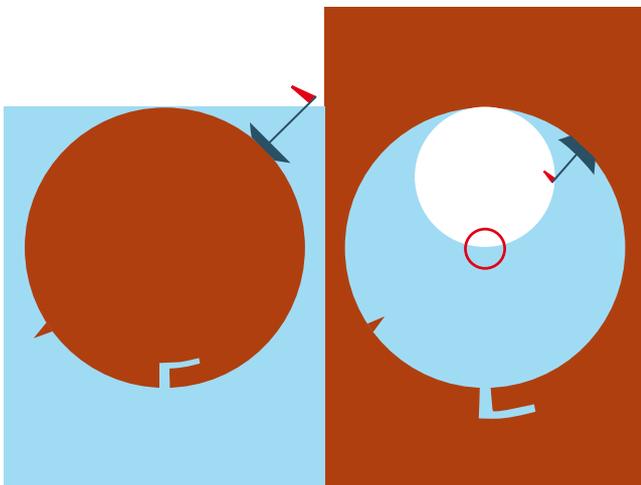
In der nicht widerlegbaren Variante der Hohlwelttheorie müssen wir also annehmen, dass reale Objekte ihre Länge ändern, wenn sie ins Innere der Hohlkugel reisen: Nahe bei deren Mittelpunkt werden sie sehr klein, und auf der Rückreise wachsen sie wieder zum alten Format. Ob diese Längenänderung »echt« oder »scheinbar« ist und was unter diesen Begriffen zu verstehen ist, sei dahingestellt. Immerhin beobachtet der mitreisende Roboter, dass keine Längenänderung stattfindet, da er mitschrumpft

nicht einer geraden Linie, sondern einem Kreis folgt, der durch den Mittelpunkt der Hohlwelt geht. In der Nähe dieses Punktes nehmen alle Geschwindigkeiten so drastisch ab, dass weder Licht noch Materie ihn in endlicher Zeit durchqueren können.

Solche Annahmen fallen keineswegs aus dem Rahmen der (modernen) Physik; nur die sehr spezielle Rolle des Hohlweltmittelpunktes ist etwas merkwürdig. Wir kommen darauf zurück.

Für einen gewöhnlichen Physiker mit vernachlässigbarer Körpergröße, der auf der Oberfläche eines kugelrunden Planeten sitzt, ist die Grenze dessen, was er sehen kann (sein »Horizont«), be-

Links unten: Auf der Erde (mit steilem Berg, Bergwerk und Schiff) sieht ein auf dem oberen Scheitelpunkt sitzender Beobachter vom Schiff nur den roten Wimpel; der Rest liegt für ihn unter dem Horizont (blau), einerlei ob man es euklidisch (linkes Teilbild) oder invertiert (rechtes Teilbild) sieht. Der rote Kreis ist der Weg eines astronomischen Objekts, das zweimal pro Tag den Horizont kreuzt. Rechts: Herr X vor und nach dem Wenden. Nicht schöner, aber viel größer ist er geworden!



und auf dem Rückweg wieder zur alten Größe aufläuft. Jupiter passt also mühelos in die Hohlkugel, hat aber den zehnfachen Umfang derselben. Das ist vielleicht gewöhnungsbedürftig, aber weniger aufregend und einfacher als manche Konsequenzen der Relativitätstheorie.

Nun wird es aber Zeit für den entscheidenden mathematischen Trick, dem die »bessere« Variante der Hohlwelttheorie den Namen Inversionsweltbild verdankt.

### Die Inversion an der Kugel

Es gibt eine relativ einfache Koordinatentransformation mit verblüffenden Konsequenzen. Sie trägt den treffenden Namen Inversion (wörtlich »Einwärts-Wendung«), denn sie kehrt das Innerste der Kugel zuäußerst und umgekehrt. Ein Mensch (oder sonstiger Gegenstand), der den Mittelpunkt der Kugel im Bauch hat, wird durch die Inversion sehr drastisch verändert (Bild S. 47 unten, rechts). Das gilt insbesondere für die Erde, wenn sie an ihrer eigenen Oberfläche invertiert wird. Genau das ist die Transformation, welche die herkömmliche Welt in eine Hohlwelt verwandelt und umkehrt.

Formal ist die Inversion wie folgt definiert. Die Bezugskugel, an der invertiert wird, habe den Radius  $R_0$ . Um den Bildpunkt  $x'$  eines Punkts  $x$  zu ermitteln, ziehe man den Strahl vom Kugelmittelpunkt  $M$  aus durch  $x$ . Der Bildpunkt  $x'$  liegt dann auf demselben Strahl, und für die Abstände  $r$  und  $r'$  der Punkte  $x$  beziehungsweise  $x'$  von  $M$  gilt  $rr' = R_0^2$ . Diese Abbildung ist eindeutig umkehrbar, wenn  $r$  und  $r'$  positiv sind, also überall bis auf den Mittelpunkt  $M$  selbst, der »ins Unendliche« abgebildet wird. Es wird genau der Innenraum der Bezugskugel auf ihren Außenraum abgebildet und umgekehrt, jeder Punkt der Kugeloberfläche auf sich selbst.

In zwei Dimensionen haben wir die Inversion am Kreis mit dem Antiparallelogramm und mit dem Inversor von Peaucellier betrachtet (Spektrum der Wissenschaft 4/2006, S. 114, und 5/2006, S. 105). Der dänische Mathematiker Jørgen Mohr (1640–1697) nutzte sie, um bei den klassischen geometrischen Konstruktionen mit Zirkel und Lineal das Letztere entbehrlich zu machen. Ein Jahrhundert später kam Lorenzo Mascheroni (1750–1800) auf dieselbe Idee.

Häufig wird die Inversion irreführend auch als Spiegelung am Kreis bezie-

hungsweise an der Kugel bezeichnet. Aber eine Weihnachtskugel zeigt uns nicht ein Inversionsbild ihrer Umgebung! Eine gute Näherung an die Inversion am Kreis wird durch eine reflektierende Thermoskanne realisiert, deren Querschnitt der Unterseite eines Bügel-eisens ähnlich ist; das hat mein Vetter Klaus Treitz entdeckt und publiziert.

Zurück zur Inversion an der Kugel! Jede Ebene wird auf eine Kugel abgebildet, die durch  $M$  geht. Aus einer Tangentialebene an die Bezugskugel wird eine Kugel, die nicht nur durch  $M$ , sondern auch durch den Berührungspunkt der Tangentialebene geht. Dann muss sie den halben Radius der Bezugskugel haben. Da erkennen wir die beiden oben genannten Horizontflächen wieder, die euklidische Ebene und den Kugelhorizont der Hohlwelt.

Allgemein können wir allen Punkten bezüglich der (zur Kugel idealisierten) Erdoberfläche einen Bildpunkt zuordnen und damit zwischen unserer euklidischen und der Hohlweltbeschreibung wechseln. Solange wir den singulären Erdmittelpunkt und sein unendlich fernes Bild meiden, gibt es keine Probleme. Nur werden vergleichsweise einfache Naturgesetze ziemlich kompliziert, von den komplizierteren gar nicht erst zu reden.

Diese Komplikation bewältigt ein Verfechter des Inversionsweltbildes mühelos: Er transformiert einfach das Problem mit einer Inversion in die ebene Beschreibung, löst es da genauso, wie wir es tun würden, und transformiert zurück. Die Hin- und die Rück-Transformation sind punktweise wirklich einfach, in Formeln eingesetzt muss das aber nicht so bleiben – gelinde gesagt.

Das ist vergleichbar der Benutzung von Logarithmen, die vor der Ära des Taschenrechners das Multiplizieren erleichterten: Jemand möchte das Produkt aus 100 Metern und 1000 Metern oder aus 467 243 Metern und 878 975 456 Metern ausrechnen, findet das aber zu mühsam, was wir zumindest im zweiten Beispiel gut verstehen. Er schaut nun in einer Logarithmentafel zu jeder Zahl eine »Bildzahl« nach, die auf den Namen Logarithmus (»Rechenzahl«) hört. Im ersten Beispiel sind das einfach die Zahlen 2 und 3, im zweiten auch irgend etwas Bestimmtes. Dann addiert er die beiden Logarithmen ( $2+3=5$  im ersten Beispiel), sucht dazu die Originalzahl (»Antilogarithmus« oder noch unklarer

**Wenn man eine Tangentialebene an die transparent gedachte Erdkugel legt und diese mit einer punktförmigen Lichtquelle beleuchtet, erhält man eine flache Erdkarte, auf der alle Großkreise (kürzesten Flugrouten) durch den Berührungspunkt als Geraden erscheinen. Links die stereografische Projektion mit Frankfurt als Berührungspunkt und Lichtquelle im antipodischen Punkt. In der gnomonischen Projektion (rechts) mit Lichtquelle im Erdmittelpunkt und Berührungspunkt am Nordpol werden sämtliche Großkreise auf Geraden abgebildet.**

»Numerus«) in der Tabelle und findet im ersten Beispiel 100 000. Die schwere Aufgabe wird also zwischen einer Transformation und einer Rücktransformation in einer wesentlich leichteren Weise ausgeführt, in diesem Fall als Addition. Dabei sind wir durchaus der Meinung, dass wir es »eigentlich« mit einer Multiplikation zu tun haben, und betrachten die Transformationen (in diesem Fall durch Nachsehen in der Tabelle) nur als rechentechnischen Trick.

Der Hohlweltfreund kann nun an seine Sicht der Dinge glauben und die Umrechnung in unsere Koordinaten auch nur als wirkungsvollen Rechen-trick ansehen. Solange er einen hinreichend großen Bogen um den Erdmittelpunkt macht, können wir ihm keinerlei Fehler ankreiden. Wir werfen ihm etwas ganz anderes vor: Er spricht umständlicher, als er rechnet. Wenn er schon euklidisch rechnet, kann er auch gleich so euklidisch von der Welt mit ebenem Horizont reden wie wir.

### Ockhams Rasiermesser

Was wir tun, wenn wir so reden, wie wir sinnvollerweise am bequemsten rechnen, kann man als »hypothetischen Realismus« beschreiben: Wir sind nicht sicher, wie die Welt »an sich« ist, aber wir reden so, als würden wir unsere »rechentechnischen« Vokabeln ernst nehmen.

Der Hohlwelttheoretiker bekommt bestenfalls die gleichen Ergebnisse wie wir, redet aber viel komplizierter. Da greifen wir zu Wilhelm von Ockhams (1285–1349) Rasiermesser zum Abschneiden überflüssiger Bärte: Was man in einer Theorie weglassen kann, ohne dass nachher etwas bei den Ergebnissen fehlt, lassen wir weg.

Auch das zweite Prinzip, gegen das die Hohlweltleute im Gegensatz zu uns ver-



stoßen, hat nichts mit richtig und falsch zu tun: Es ist nach Kopernikus benannt, der bekanntlich das Weltbild von Aristarchos, nach welchem die Sonne im Mittelpunkt der Welt liegt und ruht, zu neuem Leben erweckte, während dasjenige, das Ptolemaios in seinem *Almagest* zusammengefasst hatte, der Erde diese beiden »zentralen« Eigenschaften zuschrieb.

Beide Weltbilder sind eigentlich nur Koordinatensysteme, die gleichermaßen richtig, aber unterschiedlich bequem sind. Dabei ist das kopernikanische System sogar nur dann überlegen, wenn man Massen und Gravitation in die Debatte wirft, was erst Newton getan hat. Ohne diese, also rein kinematisch gesehen, sind die Kompromisse des Philosophen Herakleides Pontikos (um 390–322 v. Chr.) und des Astronomen Tycho Brahe (1546–1601) von bestechender Eleganz. Beide verlegten zwar die Erde in den Mittelpunkt der Welt und bestanden darauf, dass die Sonne die Erde umkreise. Die Planeten allerdings durften die Sonne statt der Erde zum Mittelpunkt ihrer Kreisbahnen haben. Damit erklärten Herakleides und Brahe alles Sichtbare, ohne uns die Ansicht zuzumuten, dass wir auf einer rotierenden und herumsausenden Kugel sitzen.

Es geht bei dem heute kopernikanisch genannten Prinzip nicht darum, ob die Sonne im Mittelpunkt der Welt ruht; das tut sie ohnehin nicht. Wichtig ist vielmehr ein Grundsatz, den wir uns in den letzten Jahrhunderten im Gefolge des zaghaften Domherrn aus Frauenburg und seines sich lebensgefährlich weit aus dem Fenster lehrenden Anhängers Galilei zugelegt haben: Man soll den eigenen Bauchnabel oder die Mitte seines Heimatplaneten nicht für den Mittelpunkt des Universums halten, auch wenn es naiverweise so aussieht und im Sinne

eines Laborsystems sogar eine nützliche Beschreibung liefert. Selbst Astronomen reden vom Sonnenauf- und -untergang statt vom Kippen des Horizonts durch die Erdbahnebene.

Das kopernikanische Prinzip der modernen Kosmologie lautet: Unsere Naturgesetze sollen überall in gleicher Form gelten und nicht einmal unsere Galaxis formal auszeichnen, geschweige denn diesen wunderbaren blauen Planeten, auf dem so staunenswerte Dinge wie menschliche Gehirne entstanden sind.

### Landkarten oder die Erde als Scheibe

Wer sich geschickt anstellt, darf die Erdoberfläche sogar für eine Ebene halten und ist damit genauso unwiderlegbar wie unsere Hohlweltfreunde – und zwar aus demselben Grund. Zu allem Überfluss verwenden auch Leute, welche die Kugelgestalt der Erde nicht bezweifeln, dieselbe Transformation zur Herstellung von ebenen Karten derselben.

Man nehme als Inversionskugel nicht die Erdoberfläche selbst, sondern eine Kugel mit doppeltem Radius, die unsere Erde dort berührt, wo wir gerne den Nabel der Welt sehen; sagen wir am Frankfurter Flughafen. Die Erdoberfläche geht also durch den Mittelpunkt der Inversionskugel – der liegt irgendwo in den Gewässern vor Neuseeland, für die wir uns jetzt besser nicht so sehr interessieren –; also ist ihr Bild eine Ebene. Die Abbildung ist bis auf den Größenfaktor 2 genau die Umkehrung derjenigen, die den euklidischen Horizont in die Horizontkugel der Hohlweltler abbildet.

Auf einer derart konstruierten Erdkarte erscheinen die von Frankfurt ausgehenden kürzesten Wege (sprich Großkreise auf der Erdoberfläche) als gerade Linien (Bild oben). In der Mathematik

leistet die entsprechende Abbildung von der (komplexen) Ebene auf die (Riemannsche Zahlen-)Kugel unter dem Namen »stereografische Projektion« wertvolle Dienste (Spektrum der Wissenschaft 1/2008, S. 72).

Wir haben anhand der unwiderlegbaren (Variante der) Hohlwelttheorie gesehen, dass die Frage nach der Richtigkeit gar nicht das einzige Kriterium für den Nutzen einer Theorie ist. Andere Beispiele: » $\pi$  ist ungleich 4« ist richtig, aber nicht so nützlich wie die falsche Aussage » $\pi = 3,15$ «. Dass das elektrische Feld in einem Plattenkondensator homogen sei, ist eine nützliche Aussage, aber schon am Rand um den Faktor 2 falsch, wogegen das Gravitations- und das Magnetfeld der Erde im Großen deutlich inhomogen sind, aber im Labormaßstab sehr genau homogen.

Roman U. Sexl pflegte seine Vorträge über die Hohlwelt mit einer Pointe zu beenden, wenn sie ihm nicht gerade ein ebenso begeisterter wie zerstreuter Gastgeber schon bei der Anmoderation klaut: »Und nun wird Herr Sexl Ihnen erklären, wie man an der Krümmung der Schuhsohlen sehen kann, dass die Hohlwelttheorie doch Recht hat.« ◁



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

Inversion mit der Thermoskanne. Von Klaus Treitz in: *Der mathematisch-naturwissenschaftliche Unterricht*, Bd. 52, Nr. 5, S. 270, 1999

Die Hohlwelttheorie. Von Roman U. Sexl in: *Der mathematisch-naturwissenschaftliche Unterricht*, Bd. 36, Nr. 8, S. 453, 1983

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei [www.spektrum.de/artikel/936506](http://www.spektrum.de/artikel/936506).

**SERIE Gehirn und Bewusstsein**

Wie erzeugt unser Gehirn Bewusstsein? Die Artikel der Serie beleuchten diese spannende Frage aus verschiedenen Blickwinkeln.

Teil I: Fenster ins Gehirn

Teil II: Neuronale Repräsentation von Bewusstsein

**Teil III: Was ist Bewusstlosigkeit?**

Teil IV: Hirnfunktion im Wachkoma

# SICHERE NARKOSEN?

Warum Narkosemittel wirken, erkennen Mediziner erst jetzt. Eine neue Generation zielgenauer Stoffe wird Anästhesien sicherer und ärmer an Nebenwirkungen machen.

🔊 Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe [www.spektrum.de/audio](http://www.spektrum.de/audio). Hören Sie dazu auch unseren Podcast **Spektrum Talk** unter [www.spektrum.de/talk](http://www.spektrum.de/talk)

## STERBEFÄLLE DURCH NARKOSE

In Deutschland finden jährlich mehrere Millionen Eingriffe unter Narkose statt. Einige Studien aus Industriestaaten ermittelten eine narkosebedingte Sterberate von **1:13 000**, andere eine von **1:200 000**. Die großen Streuungen solcher Erhebungen rühren teils auch von unterschiedlichen Bewertungskriterien her.

### Von Beverley A. Orser

In einem Hollywoodthriller wacht der Held mitten in einer Herzoperation aus der Narkose auf – kann sich aber nicht rühren und auch nicht schreien. Reine Fantasie ist dergleichen leider nicht. Nach einem chirurgischen Eingriff unter Vollnarkose erzählen ungefähr einer oder zwei von tausend Patienten, sie wären zwischendurch bei Bewusstsein gewesen. Zwar dauert das normalerweise nur kurz. Die Betroffenen verspüren auch gewöhnlich weder Schmerzen noch Panik. Doch dass solche Erinnerungen überhaupt vorkommen, bedeutet, dass selbst moderne Narkosemittel mitunter noch einiges zu wünschen übrig lassen.

Denn eine Narkose ist auch in manch anderer Hinsicht nicht völlig ungefährlich – einmal abgesehen von gewissen nur unangenehmen Nachwirkungen wie Übelkeit. Wenn auch selten, kann sie längerfristige oder anhaltende Schäden verursachen, die von Atemproblemen bis zu Gedächtnis- und geistigen Störungen reichen. Auch treten immer noch narkosebedingte Todesfälle auf (siehe Randspalte links).

Das wissenschaftliche Rüstzeug, diese Situation zu verbessern, wäre vorhanden. Auf den meisten anderen medizinischen Gebieten ist die Wirkstoff- und Medikamentenforschung längst weiter als in der Anästhesiologie. Man könnte geradezu sagen: Beim heutigen Stand zeichnet sich ein guter Anästhesist vor allem auch durch hohe Kunstfertigkeit aus. Er jongliert in oft äußerst schwieriger, nicht selten brenzliger Situation mit Substanzen, deren Funktionsweise im Körper wir nur unzureichend kennen.

Wir müssen dringend herausfinden, wie und wo die Narkotika im Körper angreifen, welche einzelnen physiologischen Prozesse sie in welcher Weise beeinträchtigen und was dabei jeweils molekular geschieht. Grob gesagt ähneln etliche der modernen Anästhetika in ihrer Wirkung gewissermaßen immer noch dem Äther. Dessen narkotisierende Kraft führte der Bostoner Zahnarzt William Morton im Jahr 1846 einem Publikum bei der Operation eines Halstumors erstmals vor. Auch die modernen Mittel dämpfen das Zentralnervensystem in der Regel in mehrfacher Hinsicht, was teilweise nicht unbedingt wünschenswert ist. Sicherlich gibt es seit damals



CORBIS, JACK HOLLINGSWORTH

große Fortschritte, auch hinsichtlich der verfügbaren Narkotika. Viele der Verbesserungen verdanken sich aber der Handhabe: den immer raffinierteren Verabreichungssystemen sowie geschickteren Möglichkeiten, auf Zwischenfälle und Nebenwirkungen zu reagieren. Wichtig wäre, endlich die Narkosemittel selbst den Erfordernissen genau so anzupassen, dass möglichst nur die gewünschten Effekte eintreten.

Zur Vollnarkose setzen Ärzte heute die potentesten Hemmsubstanzen ein, die überhaupt in der Medizin zum Dämpfen des Nervensystems verwendet werden. Weil sich diese Stoffe aber leider auch auf Atmung und Herzfunktion auswirken, ist der Spielraum für eine effektive und dennoch sichere Dosierung schmal. Das gilt erst recht für Patienten mit instabilen Lungen- und Herz-Kreislauf-Funktionen – etwa Unfallopfer und Menschen, die am Herzen operiert werden. Sie vertrauen nur eine eher leichte Narkose, weswegen gerade bei ihnen Gefahr besteht, dass sie während der Operation kurz aufwachen.

Im Grunde wurden sämtliche heutigen Narkosemittel durch Ausprobieren gefunden. Man beobachtete, ob und inwieweit ein Stoff – be-

ziehungsweise eine Kombination mehrerer Substanzen – die Effekte hervorrief, die eine Vollnarkose haben soll. Als wichtigste Ziele einer Allgemeinanästhesie gelten heute: eine starke allgemeine Beruhigung und Stressabschirmung (medizinisch: Sedierung); Bewusstseinsverlust (fachlich Hypnose genannt); Bewegungs- oder Reglosigkeit, dabei auch fehlende Muskelreaktionen auf Reize (Immobilisierung); Schmerzunempfindlichkeit (Analgesie); Aussetzen des Gedächtnisses (Amnesie). Oft ist zusätzlich wichtig, jegliche Muskelaktivität völlig zu hemmen – was unter anderem künstliche Beatmung erfordert.

Viele Forschergruppen untersuchen, auf welche Weise diese verschiedenen Wirkungen einer Narkose zu Stande kommen, auch meine eigene an der Universität Toronto (Kanada). Allmählich gelingt es uns nun, die dabei beteiligten Mechanismen zu ergründen und voneinander zu trennen. Die vielleicht wichtigste Erkenntnis bisher: Die Teileffekte entstehen jeweils in speziellen Nervenzellfraktionen, wo Narkosestoffe hochspezifisch angreifen. Das heißt, zu jedem der genannten Narkosekriterien gehören ganz eigene Wechselwirkungen. Wir dürfen folglich hoffen, die

**An die Operation selbst soll sich der Patient später nicht erinnern können – trotzdem kommt das manchmal vor.**

## LEXIKON

**Narkose:** nach griechisch für »Erstarrung, Lähmung«; medizinisch gemeint ist die kontrollierte allgemeine Betäubung mit Bewusstseinsverlust; insofern ist der Ausdruck »Vollnarkose« genau genommen überzogen

**Anästhesie:** bedeutet eigentlich Unempfindlichkeit gegen Schmerz und Sinnesreize; »Allgemeinanästhesie« meint aber dasselbe wie »Narkose«

## In Kürze

- ▶ Noch verstehen wir viel zu wenig, wieso Narkotika (Allgemeinanästhetika) ihre **weit reichenden Wirkungen** in Gehirn und Körper entfalten und wie diese Stoffe Funktionen des Nervensystems so potent unterdrücken.
- ▶ Offenbar sind für die einzelnen Teilwirkungen einer Narkose jeweils nur bestimmte Nervenzellen zuständig. Diese Zellen weisen sich durch **spezi-fische Rezeptorproteine** aus, an denen die einzelnen Narkosestoffe angreifen.
- ▶ Neue, zielgenaue Narkotika sollen jeweils nur an einem ausgewählten Rezeptorsubtyp wirken und somit **nur bestimmte Nervenzelltypen** beeinflussen. Jede Substanz würde eine Teilwirkung erzielen und kombiniert mit anderen, ebenfalls hochspezifisch wirkenden Stoffen eingesetzt, darunter Beruhigungs-, Schlaf- und gedächtnishemmenden Mitteln.

Ära des Äthers bald hinter uns zu lassen. Es wird eine neue Generation von Anästhetika geben. Der Patient erhält dann eine Kombination von Substanzen, die zusammen nur die gewünschten Effekte erzielen und ihn ansonsten nicht gefährden. Im Übrigen werden manche der Erkenntnisse auch die Behandlung mit Beruhigungs- und Schlafmitteln verbessern, denn zum Teil betrifft das die gleichen physiologischen Vorgänge.

Manche Narkotika, etwa Propofol, werden intravenös, andere, wie Isofluran, mit der Atemluft verabreicht. Auch wenn es scheinen mag, als würde der Patient tief schlafen: Die meisten modernen Mittel für eine Vollnarkose erzeugen eher ein künstliches Koma. Unter anderem dank der modernen hirntomografischen, also bildgebenden Verfahren wissen wir heute schon einiges darüber, welche Hirngebiete und neuronalen Schaltkreise für die einzelnen Aspekte einer Narkose wichtig sind. Reglosigkeit bewirken Substanzen beispielsweise am Rückenmark. Ein Gedächtnis verhindern sie, wenn sie auf Vorgänge im Hippocampus einwirken, einer wichtigen Struktur für Erinnerungsbildung. Die anhaltenden Gedächtnisstörungen, die nach einer Narkose manchmal vorkommen, könnten Nachwirkungen hiervon sein.

Schwerer ist bisher zu erkennen, wie die Bewusstlosigkeit zu Stande kommt, schon deswegen, weil sich die Hirnforscher noch nicht einig sind, woran man Bewusstsein festmachen könnte. Ein einzelnes Hirnareal, von dem der Bewusstseinsverlust unter Narkose ausgeht, lässt sich nicht so leicht bestimmen. Etliche Experten halten viel von der Vorstellung einer »kognitiven Entkopplung«: Während bei geistigen Prozessen viele Hirnregionen zusammenarbeiten, sind diese Verbindungen nun unterbrochen – als wären in einem Telefonnetz zentrale Stecker herausgezogen.

Immerhin macht die Forschung ermutigende Fortschritte dazu, was mit einzelnen Nervenzellen geschieht, wenn Narkotika ihre Signale blockieren. Viele Wissenschaftler dachten bis spät ins 20. Jahrhundert, dass diese Substanzen irgendwie die Fettmoleküle (Lipide) in den Zellmembranen beeinträchtigen. Denn die meisten Narkosestoffe sind fettlöslich. Allerdings handelt es sich chemisch um ganz verschiedenartige Substanzen, von einfachen Edelgasen bis zu kompliziert gebauten Steroiden. Auf Grund dessen erschien es plausibel, dass sie alle auf unspezifische Weise an den Nervenzellen wirken müssten.

Inzwischen wissen wir aber, dass die Narkotika mit so genannten Rezeptormolekülen auf den Zellen reagieren, also mit speziellen, hochspezifischen Proteinen, die in vielerlei

Sorten und Varianten existieren und dazu beitragen, dass die Zelle ihr Verhalten verändert. Schon geringe Unterschiede zwischen den Mitgliedern einer Rezeptorfamilie können darüber entscheiden, ob sie mit einem Narkosestoff reagieren oder nicht. Auch sind die Versionen keineswegs gleichmäßig im Gehirn oder Rückenmark verteilt. Manche davon herrschen in bestimmten Gebieten vor. Nur wo der passende Rezeptor, der richtige Untertyp, vorhanden ist, kann das Anästhetikum angreifen.

### Wie das Narkotikum die Nervenzelle manipuliert

Um solche Rezeptoren kümmern sich Narkoseforscher gegenwärtig verstärkt. Sie möchten herausfinden, welche Rezeptorvarianten jeweils die Zielproteine von heutigen Anästhetika darstellen. Erst wenn sie das wissen, können sie weiter danach fragen, wie das Narkotikum mit seinem Rezeptor interagiert und so die Nervenzelle manipuliert. Das könnte dann helfen, die erwünschten und unerwünschten Wirkungen einer Narkose zu verstehen.

Von den vielfältigen Rezeptorsorten auf Nervenzellen interessieren am meisten diejenigen, die von so genannten Neurotransmittern oder neuronalen Botenstoffen aktiviert werden. Neurotransmitter übertragen an so genannten Synapsen (speziellen Kontaktstellen zwischen Nervenzellen) Signale von einer Zelle zur nächsten, dienen also der neuronalen Kommunikation. Der Botenstoff gelangt aus der vorgeschalteten, so genannten präsynaptischen Zelle durch den schmalen synaptischen Spalt zum Rezeptor auf der nachgeschalteten, postsynaptischen Zelle (siehe Kasten S. 54). Vielfach aktivieren solche Botenstoffe die Nervenzellen, wenn genügend gleiche Moleküle wirken: Das Neuron baut dann eine Erregung auf, die sie ein Signal an andere Neuronen im Netzwerk verschicken lässt.

Narkoseforscher interessieren sich aber besonders für den hemmenden Botenstoff Gaba (Gamma-Aminobuttersäure) oder richtiger gesagt für seine besonderen Rezeptoren. Gaba dämpft die Reaktion von Neuronen auf erregende Signale und hilft somit, das Erregungsniveau im Nervensystem auszubalancieren. Wie es aussieht, sind diese Rezeptoren an Narkosewirkungen entscheidend beteiligt. Die meisten postsynaptischen Gaba-Rezeptoren sind zugleich Ionenkanäle. Wenn sich ein Gaba-Molekül daran bindet, öffnet sich im Rezeptor vorübergehend ein Kanal, durch den negativ geladene Ionen in die Zelle strömen. So entsteht ein negatives elektrisches Potenzial, das die Zelle daran hindern kann, einen erregenden Impuls zu erzeugen (Kasten S. 54).

Unter diesen Rezeptoren ist das wichtigste Angriffsziel für Narkotika offenbar der Subtyp A, genannt Gaba<sub>A</sub>-Rezeptor. Er vermittelt auch die Wirkung anderer Klassen von Beruhigungs- und Schlafmitteln, allen voran Benzodiazepine wie Valium. Schon in sehr geringer Konzentration verstärken Benzodiazepine die Aktivität von Gaba<sub>A</sub>-Rezeptoren. Diese Wirkung tritt nicht ein, wenn man deren Bindung an den Rezeptor mit einem Hemmstoff verhindert.

Leider kennen wir keine Gegenmittel dieser Art für Substanzen zur Vollnarkose. Durch solche Versuche können wir also nicht herausfinden, mit welchen Rezeptoren ein Narkotikum wechselwirkt. An Schnittpräparaten verschiedener Hirnregionen und an Neuronen in Zellkultur lässt sich aber nachweisen, dass der durch Gaba<sub>A</sub>-Rezeptoren induzierte elektro-physiologische Effekt bei Gabe dieser Stoffe länger anhält als sonst. Narkosemittel verstärken die Funktion von Gaba<sub>A</sub>-Rezeptoren vermutlich dadurch, dass sie sich zusätzlich zum Botenstoff Gaba daran festheften – und zwar an einer anderen Stelle (siehe Kasten S. 54, Bild unten rechts). Bei genügend hoher Konzentration vermögen sie die Hemmwirkung sogar allein hervorzurufen.

Da die meisten Nervenzellen Gaba<sub>A</sub>-Rezeptoren besitzen, blieb lange rätselhaft, wieso Anästhetika selektiv nur bestimmte Hirnregionen beeinträchtigen. Erst in den letzten zehn Jahren entdeckten Molekularforscher, dass sich auch diese Untergruppe von Rezeptoren strukturell und pharmakologisch noch in mehrere Sorten untergliedert.

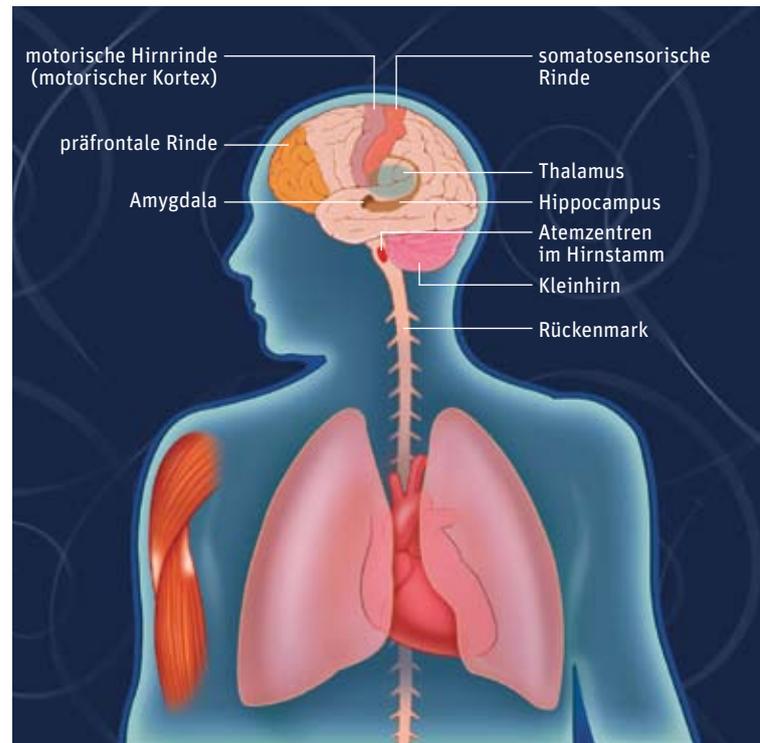
### Aufregende Entdeckung

Ein Gaba<sub>A</sub>-Rezeptor ist ein Proteinkomplex. Er besteht aus fünf Untereinheiten, von denen es etliche Typen gibt. Welche jeweils zusammenkommen, ist ganz unterschiedlich. Bei Säugetieren treten mindestens 19 Typen auf, die meisten davon zudem noch in mehreren Varianten oder Subtypen. Demnach wären theoretisch recht viele Kombinationen möglich. Die drei Untereinheiten Alpha, Beta und Gamma sind allerdings am häufigsten vertreten. Die meisten Gaba<sub>A</sub>-Rezeptoren bestehen aus zwei Alpha-, zwei Beta- und einer Gamma-Untereinheit. In manchen Hirnregionen tritt an die Stelle von Gamma ein Delta- oder Epsilon-Submolekül.

Die aufregendste Entdeckung war nun, dass die pharmakologischen Eigenschaften eines Rezeptors von seiner Zusammensetzung abhängen, und das bis in feinste Details. Unterscheiden sich zwei Gaba<sub>A</sub>-Rezeptoren in einer einzigen Untereinheit, so reagieren sie womöglich auf das gleiche Narkosemittel völlig

## ZU UNSPEZIFISCHE NARKOSEMITTEL

Die üblichen Anästhetika erzeugen auch unerwünschte Effekte, weil sie vielerorts in Gehirn und Rückenmark Nervenzellen hemmen. Sie dämpfen zum Beispiel Atmung und Herzschlag. Forscher suchen nun nach den Strukturen und Regionen im Zentralnervensystem, von denen die Teilerscheinungen einer Narkose ausgehen.



### Sedierung (geistig-seelische Ruhigstellung/Stressabschirmung)

Erregbarkeit ist gedämpft: Patient reagiert sehr langsam, spricht undeutlich, bewegt sich kaum noch. Die neuronale Aktivität in der gesamten Hirnrinde wird schwach.

### Bewusstlosigkeit (so genannte Hypnose)

Wahrnehmungen und Reizreaktionen setzen aus. Noch weniger Hirnrindenaktivität als im sedierten Zustand. Stark sinkt auch die Aktivität im Thalamus, wo sonst vieles zusammenläuft.

### Bewegungslosigkeit/Reglosigkeit

Patient zeigt etwa auf Hitzereiz oder Geschütteltwerden keine Bewegungsreaktion. Die Lähmung geht hauptsächlich vom Rückenmark aus, dessen neuronale Aktivität unterdrückt ist. Auch das Kleinhirn könnte daran beteiligt sein.

### Gedächtnisverlust (Amnesie)

Erinnerungslücke für die Narkosephase. Viele mit Gedächtnis befasste Hirnstrukturen verändern unter Narkose ihr Verhalten: so der Hippocampus, die Amygdala, der präfrontale Kortex, auch sensorische und motorische Areale.

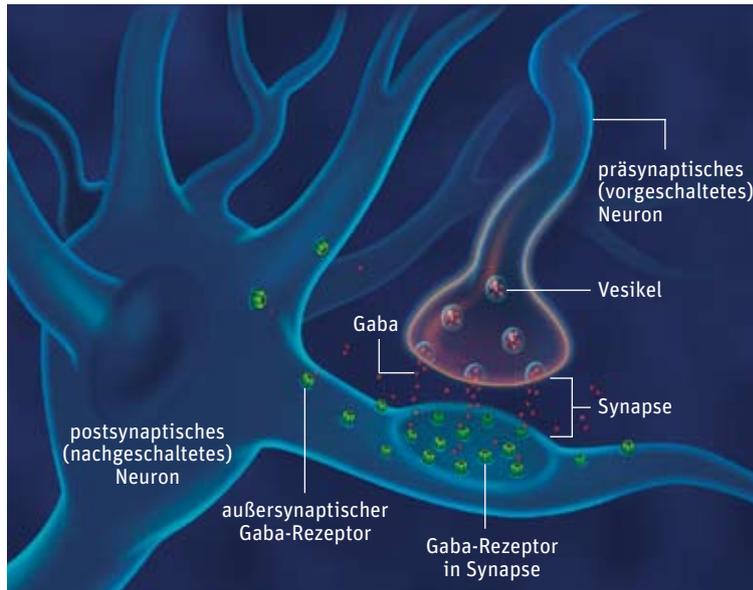
### Weitere Effekte

Manchmal werden in die Narkosedefinition die Muskeler schlaffung und die Schmerzempfindlichkeit (Analgesie) mit einbezogen. Das beruht größtenteils auf Rückenmarkshemmung. Zusätzliche Medikamente verhindern nötigenfalls Muskeleregungen durch periphere Nerven.

## VERSTÄRKUNG DER NATÜRLICHEN HEMMFUNKTION

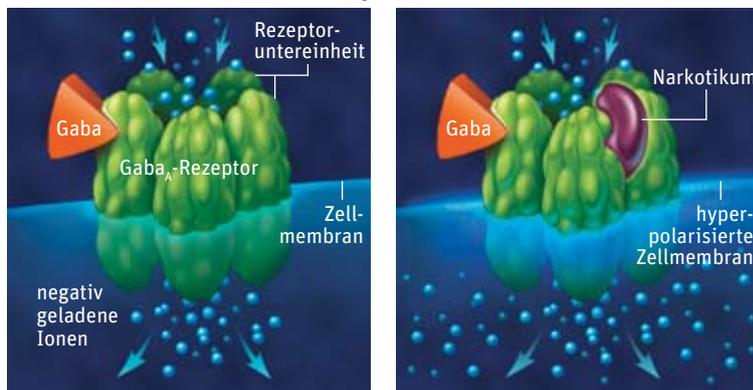
Narkotika dämpfen die neuronale Kommunikation sehr stark, indem sie die Hemmwirkung des Signalstoffs (Neurotransmitters) Gaba noch erhöhen. Entscheidend sind dabei die Unterformen des Gaba-Rezeptors.

### Wie Gaba Zellen zum Schweigen bringt



Ort: Synapse zwischen zwei Neuronen. Über den Ausläufer der vorgeschalteten (präsynaptischen) Zelle läuft ein elektrischer Impuls, woraufhin die Zelle den Botenstoff Gaba in die Synapse freisetzt. Die Signalmoleküle binden sich an Gaba-Rezeptoren auf der Gegenseite und helfen die zweite (postsynaptische) Zelle zu hemmen. Doch vielerorts tragen Hirnzellen auch fern von Synapsen solche Rezeptoren.

### Effekt mit Narkotika noch übertrumpfen



Der Rezeptorsubtyp Gaba<sub>A</sub> besteht aus fünf Untereinheiten und enthält einen Ionenkanal. Bindet sich ein Gaba-Molekül an den Rezeptor (links), öffnet sich dieser. Daraufhin strömen negativ geladene Ionen in die Zelle ein, was die elektrische Ladung über deren Membran so verändert, dass sie nun keinen elektrischen Impuls erzeugen kann. Narkotika lagern sich vermutlich an anderer Stelle in den Rezeptor (rechts). Der Ionenkanal scheint dadurch länger geöffnet zu bleiben, und die Ladung verschiebt sich noch mehr: Die Hyperpolarisation wird noch verstärkt.

anders. Forscher, die herausfinden wollen, was die Narkosestoffe jeweils im Einzelnen anrichten, machen sich zu Nutze, dass sich die diversen Gaba<sub>A</sub>-Rezeptoren so ungleich auf die Hirnregionen verteilen.

Meine Arbeitsgruppe beschäftigt sich speziell mit den Gedächtniseffekten unter Narkose. Wir untersuchen darum die Gaba<sub>A</sub>-Rezeptoren im Hippocampus, der erwähnten maßgeblichen Struktur für Gedächtnisbildung. Narkoseärzte erleben es eindrucksvoll, dass eine Amnesie schon bei weit geringeren Medikamentenmengen auftritt, als für Regungs- und Bewusstlosigkeit notwendig sind. Denn Patienten erinnern sich nur selten an ihre oft lebhaften Gespräche am Anfang oder Ende der Narkose. Warum sich einige Personen allerdings später an einzelne Ereignisse von der Operation erinnern können, ist bisher unerklärlich. Ließen sich die für die Amnesie verantwortlichen Rezeptoren ausfindig machen, dann könnten wir vielleicht vorher feststellen, ob ein Patient gefährdet ist aufzuwachen, weil ihm eben jene speziellen Rezeptoren fehlen. Auch würde man für diese Menschen sicherlich Behandlungsschemata finden können, die ein Wachwerden zwischendurch oder wenigstens das Erinnern daran verhindern.

### Überraschung mit Rezeptoren

Zu unserer Überraschung entdeckten wir, dass bei einer Narkose wohl auch Gaba<sub>A</sub>-Rezeptoren Einfluss nehmen können, die gar nicht in Synapsen sitzen (siehe Kasten links). Diese Rezeptoren befinden sich im weiteren Umfeld von solchen Kontaktstellen oder irgendwo auf dem Zellkörper. Das Merkwürdige: Sie sprechen noch auf die überaus geringen Konzentrationen des Botenstoffs Gaba an, die dort vorkommen. Offensichtlich treten außersynaptische Gaba<sub>A</sub>-Rezeptoren in manchen Hirngebieten in großer Zahl auf, so in Bereichen der Großhirnrinde und des Kleinhirns, im Hippocampus und im Thalamus, einer für Bewusstsein und Schmerzempfindung wichtigen Hirnstruktur.

Auf die Bedeutung jener Rezeptoren für die Gedächtniseffekte stießen wir zufällig. Ziemlich lange hatten wir vergeblich direkt an Synapsen nach Empfänger-molekülen gesucht, die auf die winzigen Mengen von Narkotika reagieren, welche Erinnerungen bereits verhindern. Doch schließlich half uns weiter, dass wir bei unseren Studien an Hippocampusneuronen elektrophysiologische Messungen durchführten. Schon früher hatten Forscher vom University College London und andere an solchen Zellen eine beständige elektrische Aktivität niedriger Amplitude beobachtet, die von außersynaptischen Gaba<sub>A</sub>-Re-

zeptoren herrührte. Wir erkannten nun, dass die geringen Wirkstoffkonzentrationen, die für eine Amnesie ausreichen, diese fortwährende Aktivität deutlich steigern. Man kann sich das ähnlich vorstellen, als würde ein Störgeräusch in einer Telefonverbindung stärker. Um die Amplitude dieser elektrischen Aktivität um das 35-Fache zu erhöhen, genügt von den geprüften Narkosemitteln ein Bruchteil der Menge, bei der Patienten aufhören, sich zu bewegen. Diese hohe Empfindlichkeit überraschte uns, denn von den Synapsen selbst ging bei solchen Konzentrationen keine nennenswerte Veränderung aus.

Erst später stellten wir fest, dass die außersynaptischen GABA<sub>A</sub>-Rezeptoren etwas anders aussehen als jene in Synapsen. Im Gegensatz zu Letzteren enthalten sie meistens eine Alpha-5-Untereinheit. Offenbar bestimmt bereits dieser kleine Unterschied ihr viel feineres Reaktionsvermögen auf Narkosestoffe. Wir waren begeistert, denn Gedächtnisforscher finden zunehmend Hinweise darauf, dass Rezeptoren mit eben dieser Untereinheit an den normalen Gedächtnisfunktionen des Hippocampus teilhaben. Sind derartige Rezeptormoleküle auch für die Amnesie bei einer Narkose verantwortlich?

Wir testeten diese Hypothese mit Gedächtnisstudien an Genmäusen, denen die Alpha-5-Untereinheit fehlte. Zur Kontrolle verwendeten wir Mäuse vom Wildtyp, die diese Untereinheit ausprägen können. Beide erhielten das Narkosemittel Etomidat in so kleiner Menge, dass sie noch wach blieben. Die Wildtypmäuse versagten daraufhin bei den Lernversuchen, die genetisch manipulierten Tiere nicht. Wie wir an den Nagern weiter nachwiesen, wirkt sich der Verlust jener Untereinheit auf die anderen Narkoseeffekte nicht aus: Eine entsprechende Menge Etomidat macht auch die Genmäuse völlig ruhig, bewegungslos, bewusstlos und auch ebenso schmerzempfindlich wie Artgenossen vom Wildtyp. Folglich hat der Gedächtnisausfall unter diesem Narkosemittel einen eigenen molekularen Hintergrund.

Noch bleibt abzuwarten, ob dies ein erstes Tiermodell für ähnliche Erscheinungen beim Menschen darstellen wird. Vielleicht gibt es jene Rezeptorvarianten ja auch bei uns: Das würde zumindest einige Fälle von Amnesieresistenz erklären. Gegenwärtig wird an Tieren erforscht, ob andere Narkosemittel auf den gleichen GABA-Rezeptor einwirken, wenn sie eine Gedächtnisbildung verhindern.

Verschiedene Forschergruppen untersuchen mit ähnlichen Ansätzen, wie unter Narkotika Bewusst- oder Bewegungslosigkeit zu Stande kommen. So erzeugte Gregg E. Homanics von



WOLLEN SIE IHN EINFACH SO AUFMACHEN?  
GANZ OHNE ANÄSTHESIE ?

der Universität Pittsburgh (Pennsylvania) Mäuse, denen die Delta-Untereinheit des GABA<sub>A</sub>-Rezeptors fehlt, die für so genannte Neurosteroid hochempfindlich macht. Tatsächlich wurden solche Mäuse durch das steroidbasierte Narkosemittel Alphaxalon nicht so leicht bewusstlos wie sonst. Narkotika aus anderen chemischen Gruppen hatten bei diesen Tieren nicht den Effekt. Steroidale Anästhetika benutzt man heute kaum. Die Versuche beweisen aber, dass Narkosestoffe aus verschiedenen chemischen Klassen tatsächlich unterschiedliche molekulare Angriffspunkte haben. Sie sprechen unterschiedliche Subpopulationen von GABA<sub>A</sub>-Rezeptoren an.

Die Ergebnisse besagen insgesamt: Überholt ist heute die frühere Vermutung, Narkotika würden ihre einzelnen Wirkungen über denselben allgemeinen Mechanismus erreichen, gerade weil sie so mannigfaltig daherkommen. Auf der Suche nach Betäubungstoffen stießen die Forscher früher zwar auf Substanzen mit ähnlichen Endeffekten, doch eine jede davon funktioniert letztlich auf ganz eigene Weise.

### Schwer narkotisierbare Mäuse

Zum Beispiel ist von den klinisch gebräuchlichen Anästhetika Etomidat das einzige, das selektiv auf GABA<sub>A</sub>-Rezeptoren wirkt, die Beta-2- oder Beta-3-, nicht aber Beta-1-Untereinheiten enthalten. Dabei unterscheiden sich die Varianten nur wenig. Unter anderem bestimmt eine einzige ausgetauschte Aminosäure an einer bestimmten Stelle darüber, ob Etomidat angreifen kann. Als Forscher des amerikanischen Pharma-Unternehmens Merck Sharp & Dohme Mäuse erzeugten, die an genau dieser Stelle in der Beta-2-Untereinheit eine Mutation aufwiesen, ließen die Tiere sich mit Etomidat schlechter narkotisieren. Regungslos macht das Mittel die Nager aber genauso gut wie sonst. Uwe Rudolph von der Universität Zürich erzeugte die gleiche Muta-

### WAS SOLLTE EINE NARKOSE LEISTEN?

- ▶ Bewusstlosigkeit (komaartiger Tiefschlaf, medizinisch Hypnose genannt);
  - ▶ Ausschalten von Schmerzempfindungen (Analgesie)
- außerdem:
- ▶ Ruhigstellen der Erregungs- und Stresssysteme (Sedieren, Sedation)
  - ▶ Ruhigstellen oder Dämpfen von Muskel- und vegetativen Reaktionen; häufig totale Muskelentspannung (Relaxation)
  - ▶ erst seit Kurzem mehr beachtet: Verhindern von Erinnerungen (Amnesie)

## SCHMERZ UND STRESS

Auch das Schmerzempfinden muss ausgeschaltet werden, denn Schmerz bedeutet für Herz und Kreislauf auch bei Bewusstlosigkeit eine große Belastung und damit gefährlichen Stress.

tion an der Beta-3-Untereinheit. Diese Mäuse wurden durch Etomidat und Propofol nicht so leicht bewusstlos und schmerzempfindlich. Doch auf Alphaxalon sprachen sie ebenso gut an wie der Wildtyp.

Ob sich die neue Aminosäure bei Beta-2 und Beta-3 auf den Amnesieeffekt durch jene Substanzen auswirkt, ist noch nicht geklärt. Auch wissen wir nicht, wo im Gehirn die Mutation überhaupt in Erscheinung tritt. Einige Hinweise deuten auf den Thalamus und dortige außersynaptische Gaba<sub>A</sub>-Rezeptoren hin. Insgesamt bestätigt sich durch diese Arbeiten, dass Gaba<sub>A</sub>-Moleküle bei einer Narkose eine zentrale Bedeutung haben. Im nächsten Schritt gilt es, die Erkenntnisse in neue Anästhetika mit genau gewünschten Wirkungen umzusetzen, die möglichst gar keine allgemeinen Nebeneffekte erzeugen.

Bisher zeigten unsere eigenen und die Arbeiten anderer Forscher: Damit eine Amnesie unter Etomidat eintritt, müssen im Hippocampus außerhalb von Synapsen gelegene Gaba<sub>A</sub>-Rezeptoren mit Alpha-5-Untereinheiten existieren. Das Gleiche mag für manche anderen Narkosemittel gelten. Wieder andere Narkosestoffe reagieren vielleicht nicht mit diesem speziellen Rezeptor. Mit gezielter Medikamentenwahl ließe sich somit möglicherweise steuern, ob das Gedächtnis während der Operation blockiert werden soll oder nicht.

## Zielgenaue Wirkstoffe

Für Schlaf- und Beruhigungsmittel beginnen Forscher schon Wirkstoffe zu testen, die nicht an dem genannten Rezeptoruntertyp angreifen und das Gedächtnis darum nicht beeinträchtigen sollten – was bei einigen her-

## RISIKOMANAGEMENT IM OPERATIONSSAAL

Vor einer Operation unter Vollnarkose wird der Patient an eine Reihe Überwachungsgeräte angeschlossen. Viele davon helfen, während des Eingriffs die Nebenwirkungen der Narkotika zu kontrollieren. Die Substanzen beeinträchtigen die Atmung und Herzfunktion, senken den Blutdruck und die Körpertemperatur. Weil die Narkose einerseits tief genug sein muss, andererseits aber lebenswichtige Funktionen nicht zu sehr dämpfen darf, muss der Anästhesist die Narkotikazufuhr immerfort nachregulieren.

### Nicht gezeigt:

#### Temperatursonde

Abhängig von Art und Dauer der Operation wird ein Temperaturfühler auf die Haut geklebt oder in Speiseröhre oder Enddarm eingeführt

#### Katheter in Arterie

Katheter in einer Arterie von Handgelenk oder Leiste misst Blutdruck; erlaubt auch, häufig Blutproben zu entnehmen

#### Elektroden für EKG

Elektroden an Brust und Extremitäten überwachen Herzfunktion

#### Wärmedecke

hält Körpertemperatur aufrecht. Auch Infusionslösungen und Blutkonserven werden häufig vorgewärmt

#### Pulsoximeter

Clip misst unblutig Sauerstoffgehalt des Bluts an Finger oder Ohrfläppchen

#### Beatmungsgerät

Der eine Schlauch führt eine Mischung aus einem Inhalationsanästhetikum mit Sauerstoff und Luft zu. Der andere zieht die ausgeatmeten Gase ab

#### Blutdruckmanschette

#### intravenöser Zugang

Verweilkanüle für Narkosemittel und andere Flüssigkeiten

kömmlichen Medikamenten dieser Art geschehen kann. Für manche chirurgischen Eingriffe dürften wiederum Substanzen erwünscht sein, die zwar das Gedächtnis völlig unterbinden, aber die Atem- und Herz-Kreislauf-Funktionen nicht dämpfen. Dazu würde man einen starken Gedächtnisblocker mit anderen Narkotika kombinieren.

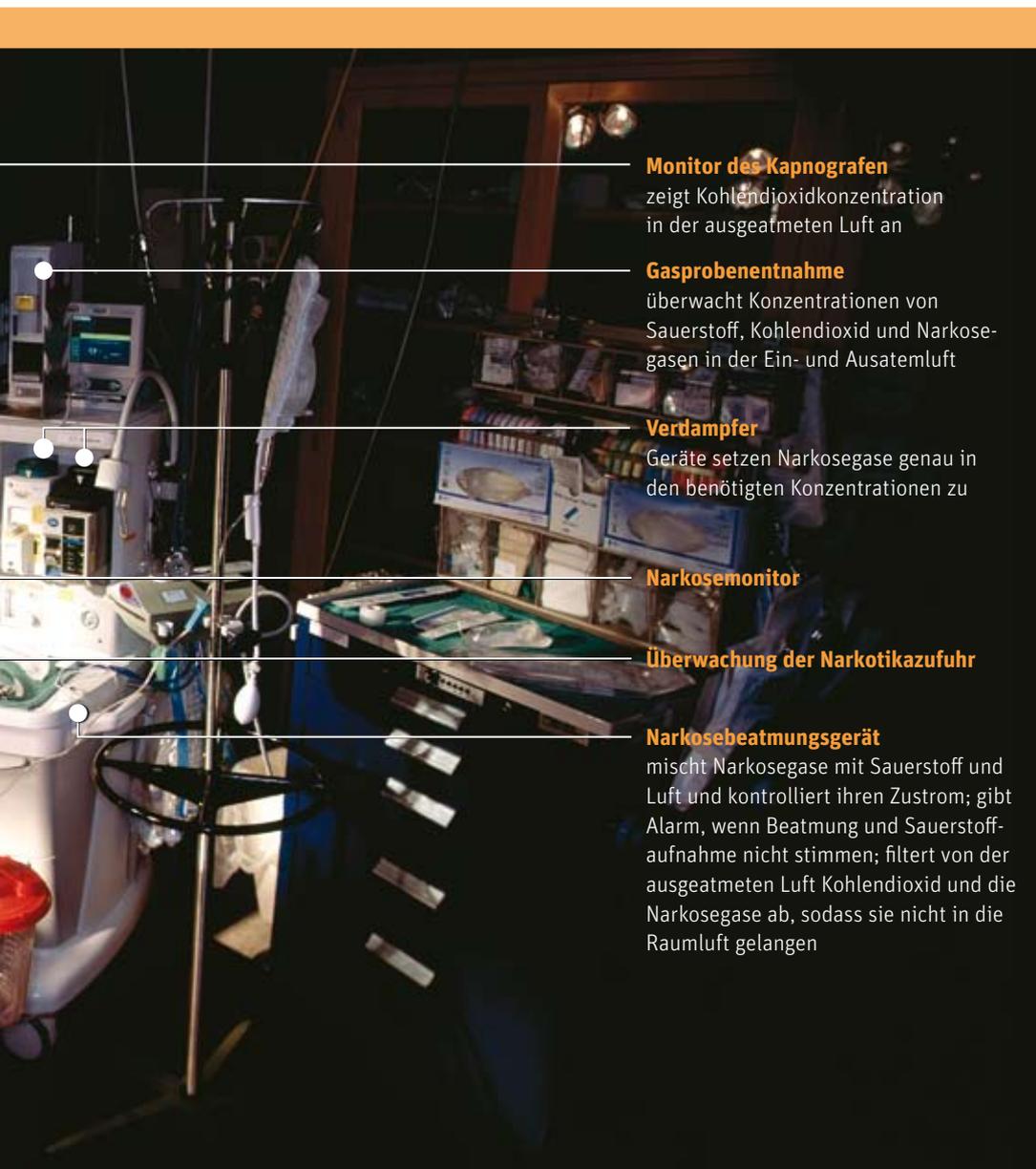
Für diesen Artikel habe ich die Amnesieforschung beispielhaft herausgegriffen. Der neue Ansatz soll aber auch für die anderen Narkoseziele neue Anästhetika bringen, die möglichst genau nur eine erforderliche Wirkung haben. Bei vielen Operationen ist es weder wünschenswert noch nötig, dass die Narkotika – wie bisher oft – die neuronale Aktivität allgemein intensiv unterdrücken. Uns Forschern schwebt vor, dass Ärzte eines Tages bedarfsgerecht Medikamente kombinieren

können, von denen das einzelne jeweils nur einen angestrebten Effekt hat. Dann bleibt der Patient mit dem gebrochenen Bein wach und kann sich während der Behandlung unterhalten, verspürt aber keine Schmerzen. Auch eine Hüftoperation erfordert nicht unbedingt Bewusstlosigkeit. Es könnte hierbei genügen, neben Schmerzfreiheit eine völlige geistige Entspannung und Gelassenheit herbeizuführen sowie störende Muskelregungen zu unterbinden. In diesem Sinne behandelt man oft schon nach einer Operation zum Beispiel Schmerzen mit Medikamentencocktails.

Eine Vollnarkose war zwar noch nie so sicher wie heute, doch ein Restrisiko besteht. Jetzt endlich hat die Anästhesiologie die große Chance, das Äther-Zeitalter endgültig zu verlassen und nach modernsten medizinischen Maßgaben zu handeln. ◀



**Beverley A. Orser** hat an der Universität Toronto (Kanada) eine Professur für Anästhesiologie und Physiologie. Sie arbeitet als Anästhesistin am gesundheitswissenschaftlichen Zentrum Sunnybrook, dem Lehrkrankenhaus der Universität, wo sie den kanadischen Lehrstuhl für anästhesiologische Forschung inne hat. Sie berät das amerikanische Pharma-Unternehmen Merck Sharp & Dohme.



**Monitor des Kapnografen**  
zeigt Kohlendioxidkonzentration in der ausgeatmeten Luft an

**Gasprobenentnahme**  
überwacht Konzentrationen von Sauerstoff, Kohlendioxid und Narkosegasen in der Ein- und Ausatemluft

**Verdampfer**  
Geräte setzen Narkosegase genau in den benötigten Konzentrationen zu

**Narkosemonitor**

**Überwachung der Narkotikazufuhr**

**Narkosebeatmungsgerät**  
mischt Narkosegase mit Sauerstoff und Luft und kontrolliert ihren Zustrom; gibt Alarm, wenn Beatmung und Sauerstoffaufnahme nicht stimmen; filtert von der ausgeatmeten Luft Kohlendioxid und die Narkosegase ab, sodass sie nicht in die Raumluft gelangen

Illustrierte Geschichte der Anästhesie. Von Ludwig Brandt. Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, 1997

Emerging molecular mechanisms of general anaesthetic action. Von Hugh C. Hemmings et al. in: Trends in Pharmacological Sciences, Bd. 6, Heft 10, S. 503, Okt. 2005

Molecular and neuronal substrates for general anaesthetics. Von Uwe Rudolph und Bernd Antkowiak in: Nature Reviews Neuroscience, Bd. 5, S. 709, Sept. 2004

Anaesthesia safety: model or myth? Von Robert S. Lagasse in: Anaesthesiology, Bd. 97, S. 1609, Dez. 2002

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/936495](http://www.spektrum.de/artikel/936495).

# Fehllalarm im Darm

## Wie Nahrungsmittelallergien entstehen

Bevor der erste Happen feste Nahrung in unseren Mund gelangt, lernt unser Immunsystem – angeleitet von Muttermilch und gewissen guten Bakterien – zwischen Lebensmitteln und Krankheitserregern zu unterscheiden. Ohne die richtige Anleitung steigt offenbar das Allergierisiko.

### In Kürze

- ▶ Eine allergische Reaktion des Immunsystems gegen einen **harmlosen Bestandteil in der Nahrung** tritt oft sehr früh im Leben auf und kann Wegbereiter weiterer Allergien werden.
- ▶ Forscher versuchen zu ergründen, wie das **unreife Immunsystem** von Neugeborenen speziell im Darm lernt, Nahrungsbestandteile zu tolerieren. Komponenten der Muttermilch und die natürliche Darmflora scheinen wichtige Hilfe zu leisten.
- ▶ Die verwickelten Mechanismen, die sich dabei abzeichnen, weisen mögliche Wege auf, die Entwicklung **regulatorischer Immunzellen** zu fördern, die allergischen Reaktionen vorbeugen.

Von Per Brandtzaeg

**K**eine Erdnüsse, Milchprodukte, Eier, Meeresfrüchte oder Soja. Weder Weizen noch Mais, Nüsse, Fisch, Sesamkörner oder irgendwelche Gewürze. Zwar müssen nur wenige Menschen eine derart strenge Diät einhalten, aber in den Industrieländern leidet mindestens jedes zwanzigste Kleinkind und jeder fünfzigste Erwachsene an einer Nahrungsmittelallergie. Mit steigender Tendenz: So verdoppelte sich einer Studie zufolge zwischen 1997 und 2002 die Häufigkeit von Erdnussallergien in den USA – Hauptursache für Notfallbehandlungen und Todesfälle in dieser Kategorie.

Wer allergisch auf Inhaltsstoffe der Nahrung reagiert, kann Symptome von einem Hautausschlag bis hin zu einem Kreislaufschock erleiden. Nahrungsmittelallergien variieren außer im Schweregrad auch darin, wie schnell sich Symptome bemerkbar machen. Die mitunter lebensbedrohlichen Sofortreaktionen treten insbesondere auf, wenn das Allergen, etwa ein Erdnussbestandteil, im Körper auf passende Antikörper der Klasse E trifft und sich anheftet. Spezielle Zellen schütten daraufhin Histamin aus – den berüchtigten Signalstoff, der eine akute Entzündung mit Juckreiz, Niesen und anderen Allergiesymptomen hervorruft. Verzögerte, so genannte Spätreaktionen treten dagegen unabhängig

von Antikörpern auf. Ein typisches Beispiel hierfür ist die Zöliakie: eine chronische Verdauungsinsuffizienz, ausgelöst durch Gluten, die Klebereiweiße bestimmter Getreidesorten.

Zu allem Übel kann eine Nahrungsmittelallergie auch den Beginn einer Allergiekarriere ankündigen, die zu entsprechenden Erkrankungen der Atemwege führt. Besonders groß ist das Risiko bei Menschen, die erblich bedingt zur Atopie, zur Überproduktion von Antikörpern der Klasse E, neigen. Vor allem in den Industrieländern haben Asthma und andere atopische Atemwegserkrankungen während der letzten zwanzig Jahre zugenommen.

Wie kommt es aber dazu, dass das Immunsystem einen eigentlich harmlosen Bestandteil etwa der Kuhmilch in einer Überreaktion abwehrt, statt ihn zu tolerieren? Was Forscher inzwischen an Puzzlesteinen dazu entdeckt haben, macht eines klar: Entscheidende Schritte dazu finden bereits ganz früh im Leben statt, auch wenn sich die Allergie erst später deutlicher äußern mag. Dies bietet Anhaltspunkte dafür, wie sich das Allergierisiko senken lässt.

Um das frühe Anbahnen von Nahrungsmittelallergien zu durchschauen, muss man zunächst verstehen, wie eng die Entwicklung von Immunsystem und die des Verdauungstrakts miteinander verknüpft sind. Erst nach der Geburt reifen beide durch gemeinsame Auseinandersetzung mit ihrer Umwelt aus. Das Immunsystem entnimmt ständig Proben aus

dem Darminhalt und trainiert daran, zwischen Gut und Böse zu unterscheiden. Es feilt gewissermaßen an seinem Weltbild, damit es den Darm und damit auch den Körper gezielt vor schädlichen Mikroorganismen schützen kann.

Die Akteure seiner gestaffelten Verteidigungslinien sind darauf geeicht, Fremdes abzuwehren, körpereigene Gewebe jedoch zu verschonen. Nun bedeutet fremd aber nicht zwangsläufig schädlich. Deshalb stellt die Nahrung mit ihrer Fülle gerade willkommener Stoffe eine besondere immunologische Herausforderung dar: Ein Erwachsener verzehrt jährlich rund eine Tonne Lebensmittel, deren Bestandteile sich auf molekularer Ebene praktisch alle von seinen eigenen unterscheiden. Nützlich ist auch die normale Darmflora aus so genannten kommensalen Bakterienstämmen. Diese »Tischgenossen« (lateinisch *commensalis*) helfen bei der Verdauung und schützen vor krank machenden Stämmen, indem sie als Konkurrenten deren ökologische Nischen im Darm besetzt halten. Die Fähigkeit des Körpers, seinen Killerinstinkt gegenüber fremden, aber harmlosen Substanzen im Verdauungstrakt zu unterdrücken, wird als orale Toleranz bezeichnet. Hierfür muss ein immunologisches Gleichgewicht aufgebaut werden. Intoleranz, weil die Suppression fehlt, bewirkt eine allergische Reaktion, mit manchmal lebensbedrohlichen Folgen.

### Mutter sei Dank

Im Mutterleib lebt ein Baby wohlbehütet in einer keimfreien Umgebung. Aber bereits beim Geburtsvorgang, noch vor seinem ersten Atemzug, beginnt der Kontakt mit Mikroorganismen und anderen Fremdstoffen. Die immunologische Auseinandersetzung mit diesen so genannten Antigenen findet dann meistens auf seinen Schleimhäuten statt – etwa in den Atemwegen und im Darm – und stimuliert das junge, noch unreife Abwehrsystem.

Die vorderste Verteidigungslinie im Verdauungstrakt eines Neugeborenen ist die als Immunausschluss bezeichnete Schutzeinrichtung. Dazu werden spezielle Antikörper in die Außenwelt exportiert – den Schleim, der das Innenrohr überzieht. Unter anderem sollen sie Krankheitserreger und potenziell gesundheitsschädliche Substanzen schon im Vorfeld abfangen. Hauptverantwortlich für einen derartigen Ausschluss von Unerwünschtem ist das sekretorische Immunglobulin der Klasse A (sIgA). Diese Sorte von Antikörpern agiert,

nachdem sie über die Deckzellen der Schleimhaut nach draußen befördert wurde, sehr schonend: Sie löst dankenswerterweise selten eine immunologische Entzündungsreaktion aus.

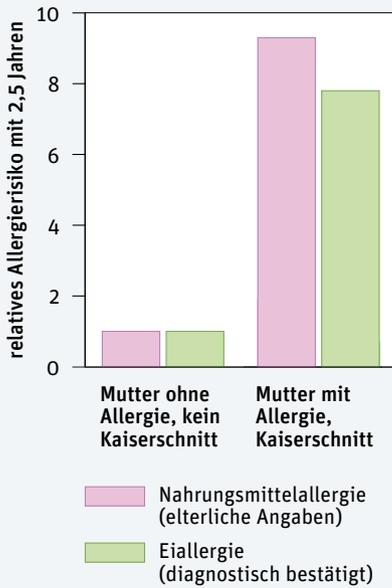
Ein Baby erzeugt jedoch anfangs bestenfalls ganz wenig davon. Während der ersten gefährlichen Lebensmonate stützt sich ein Säugling auf andere Sorten »eigener« Antikörper – vor allem auf einen Vorrat von mütterlichen Immunglobulinen der Klasse G (sie wurden durch die Plazenta in den Kreislauf des Kindes befördert) sowie auf geringe eigene Mengen an sekretorischen Antikörpern der Klasse M. Die einzige nennenswerte Quelle für sekretorisches IgA während dieser kritischen Zeit ist Muttermilch (es wird von Immunzellen in den Milchdrüsen erzeugt). Sie trägt zum Schutz bei, solange das Abwehrsystem noch heranreift. In Industrieländern können Kinder die volle Menge sIgA erst nach ein bis teils erst nach zehn Jahren selbst erzeugen. Anders in Entwicklungsländern: Hier ist die sekretorische Immunität oft schon viel früher voll

**Muttermilch fördert bei Neugeborenen die Entwicklung von Darm und Immunsystem, die beide noch nicht ausgereift sind. Sie stärkt die Barrierefunktion des Darmepithels und ist in den ersten Lebensmonaten die Hauptquelle für spezielle Antikörper. Außer als Infektionsschutz dienen diese Moleküle dazu, die Reaktivität des Immunsystems gegen Nahrungsbestandteile herabzusetzen.**

**Selbst wenn sich Nahrungsmittelallergien erst bei älteren Kindern und Erwachsenen auffälliger auswirken, wurden die Grundsteine dazu bereits sehr früh gelegt**



**KAISERSCHNITT UND ALLERGIERISIKO**



**Im Geburtskanal nimmt ein Kind harmlose Vaginal- und Darmbakterien auf**, was die Ausreifung des Immunapparats fördert. Bei Babys aus Allergikerfamilien senkt eine solche frühe Konfrontation mit harmlosen, uns besiedelnden Keimen das Risiko, einmal selbst eine Allergie zu entwickeln. Bei einer Kombination aus Kaiserschnittgeburt und mütterlicher Allergie entwickelten Kinder bis zu einem Lebensalter von zweieinhalb Jahren mindestens achtmal häufiger eine Nahrungsmittelallergie als Kinder, auf die keines der beiden Kriterien zutrifft (Grafik). Kein Faktor allein erhöhte bei dieser Studie das Risiko signifikant. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass sowohl genetische Faktoren als auch die frühe Auseinandersetzung mit Mikroorganismen wichtig sind für die Ausbildung einer immunologischen Toleranz gegenüber Nahrungsmitteln.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: MEHRETTI EGGERST ET AL., JOURNAL OF ALLERGY AND CLINICAL IMMUNOLOGY, 2003, 111, 5, 420-426

ausgebildet – vermutlich infolge einer stärkeren Auseinandersetzung mit stimulierenden Mikroorganismen.

Außer als Abfangjäger für schädliche Antigene dienen sekretorische IgA-Antikörper dem unreifen Darm auch als Entwicklungshelfer, indem sie die Barrierefunktion seines Epithels stärken, seiner Tapete aus Deckzellen. Bei den meisten Babys reift die zunächst sehr durchlässige Darmschleimhaut bereits während der ersten Lebensmonate aus. Bei manchen Kindern bleibt sie allerdings noch jahrelang eine unzureichende Barriere – und eine unvollstän-

dige sekretorische Immunität kann zu dieser Verzögerung beitragen. Entsprechend besitzen genmanipulierte Mäuse, die kein sIgA und sIgM als Antikörper herstellen können, »undichte« Schleimhäute.

Verzögert sich bei Kindern die Entwicklung von Immunzellen, die Antikörper der Klasse A produzieren, oder die volle Ausbildung der Darmbarriere, dann steigt das Risiko für eine Nahrungsmittelallergie. Babys, die zumindest während ihrer ersten vier Lebensmonate ausschließlich gestillt wurden, leiden offenbar seltener an gewissen allergischen Symptomen. Dies könnte an der von IgA geförderten Reifung des Darms liegen. Allerdings enthält Muttermilch daneben noch andere positiv wirkende biologische Komponenten: Abwehrzellen sowie als Cytokine und Wachstumsfaktoren bezeichnete Signalproteine, die das Verhalten der »angesprochenen« Zellen beeinflussen. Alles in allem scheinen sekretorische Antikörper der A-Klasse bedeutsam zu sein, um die individuelle Reaktionsschwelle gegenüber Nahrungskomponenten aufzubauen.

Der Verdauungstrakt verfügt über besondere Bereiche, in denen Immunzellen auf die Produktion eben dieser Antikörper eingestellt werden können. Zwar durchzieht ein Netzwerk körpereigener Abwehrzellen das ganze Darmgewebe, doch existieren auch eigens abgegrenzte Strukturen für die Immunüberwachung – im Dünndarm speziell die so genannten Peyerschen Plaques. Wie flache Maulwurfshügel liegen sie verstreut in dem hohen »Gras« aus Darmzotten (siehe Kasten rechte Seite). Sie gehören zum darmassoziierten lymphatischen Gewebe. Das Epithel über ihnen enthält spezialisierte Zellen mit einer taschenförmig eingestülpten Unterseite, einer »Mikrofalte«. Diese M-Zellen durchmustern permanent die Flut an Antigenen, die sich mit dem Darminhalt an ihnen vorbeischiebt, und schleusen Proben zur Gegenseite. Dort haben sich die Haupttypen von Immunzellen versammelt: B- und T-Lymphocyten und die so genannten antigenpräsentierenden Zellen wie Makrophagen oder dendritische Zellen. An eben diesen Stellen wird die Schleimhaut-Immunität induziert und reguliert.

Sobald ein Antigen identifiziert ist, folgt ein kompliziertes Zusammenspiel von biologischen Signalstoffen und Immunzellen, die verschiedene Abteilungen des Körpers durchwandern (siehe Kasten S. 62). Schlüsselfunktion haben hierbei die für die Präsentation zuständigen Akteure. Sie verschlingen die von den M-Zellen herbeigeschafften Antigenpartikel, häckseln sie in kleine Schnipsel und bieten diese dann auf ihrer Außenseite an –



zusammen mit einer ausgewählten Garnitur kostimulatorischer Moleküle. Dockt eine noch unerfahrene T-Zelle an, deren Antigenrezeptor zufällig zu dem angebotenen Bruchstück passt, wird sie erstmals aktiviert. Nach dieser Initialzündung setzt sie Cytokine und Wachstumsfaktoren frei, die dann B-Zellen dazu veranlassen, sich stark zu vermehren, sich weiterzuentwickeln und statt anderer möglicher Antikörper solche der Klasse A herzustellen. Aktivierte T- und B-Zellen wandern aus dem Darm in benachbarte Lymphknoten, wo sie weitere Instruktionen erhalten. Die meisten von ihnen treten schließlich in die Blutbahn über, und viele davon kehren dann in die Bindegewebsschicht unter dem Darmepithel zurück. (Im Fall stillender Mütter können sie sich aber auch in den Brustdrüsen ansiedeln.) Empfängt eine aktivierte B-Zelle an ihrem neuen Aufenthaltsort gewisse durch Antigene induzierte Sekundärsignale, durchläuft sie eine letzte, endgültige Verwandlung: zu einer regelrechten Antikörperfabrik, die rund 10000 Stück pro Sekunde erzeugt.

### Auf Toleranz einstimmen

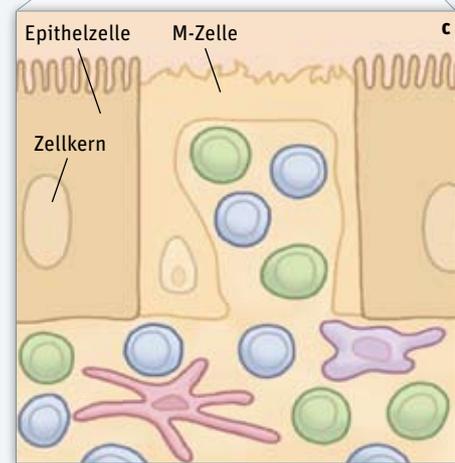
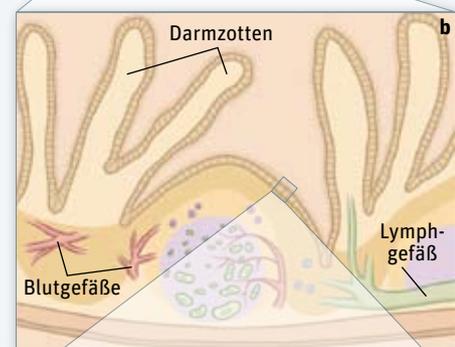
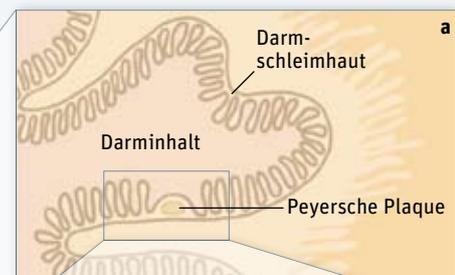
Bei Neugeborenen, die im Mutterleib noch nie Mikroorganismen ausgesetzt waren, ist die Situation jedoch anders. In ihrem Blut zirkulieren erst sehr wenige B-Zellen mit IgA-Produktion. Doch nach dem ersten Lebensmonat sind es bereits etwa 75-mal so viele. Während dieser Zeit wurde das darmassoziierte lymphatische Gewebe permanent durch ihm neue mikrobielle Antigene stimuliert. Damit die Präsentierzellen darin die geeignete Mixtur kostimulatorischer Signale für die Initialzündung von T-Zellen bereitstellen, die dann als Helfer für B-Zellen fungieren, bedarf es gewisser allgemeiner »Gefahrmeldungen«: in Form von Bruchstücken harmloser, kommensaler Darmbakterien. Ohne diese rechtzeitige »Beimpfung« mit Bakterien kann sich das IgA-System nicht normal entwickeln. Bakterien der Gattung *Bacteroides* (Angehörige der normalen Mund-, Darm- und Vaginalflora) und bestimmte Stämme von *Escherichia coli* (des wohl bekanntesten Darmbewohners) scheinen dem Schleimhaut-Immunsystem besonders gut auf die Sprünge zu helfen, auch Milchsäurebakterien (Laktobazillen und Bifidobakterien) tragen dazu bei. Außerdem helfen diese Keime, die Epithelbarriere der Darmschleimhaut aufzubauen und einzuregulieren.

Wie kommt diese richtige »Einstimmung« zu Stande? Zumindest bei Mäusen rühren etliche der vorteilhaften Effekte der Schleimhautbewohner daher, dass gewisse gängige bakterielle Bestandteile von so genannten Mustererkennungsrezeptoren erfasst werden, die sich

auf oder im Inneren der Epithelzellen befinden. Durch die Bindung kommt nämlich ein »Gespräch« mit darunter liegenden Zellen – einschließlich den Antigen-Präsentierern – in Gang, das durch die dabei ausgetauschten Signale einen immunologischen Gleichgewichtszustand zwischen Aggression und Toleranz im Darm fördert. Untersuchungen an Mäusen deuten darauf hin, dass Darmepithelzellen bereits vor der Geburt gewisse Komponenten zerlegter Mikroben erkennen können – vor allem das Lipopolysaccharid aus der Zellwand bestimmter Bakteriengruppen. Sie halten bereits zu diesem Zeitpunkt einen inneren Re-

## EIN IMMUNSYSTEM IM VERDAUUNGSTRAKT

AMERICAN SCIENTIST, STEPHANIE FRIESE



**Abwehrsystem und Verdauungstrakt sind eng miteinander verzahnt.** Besonders zeigt sich dies an den Stellen im Darm, wo die so genannte Schleimhaut-Immunität induziert wird: an den Peyerschen Plaques. Zwischen den fingerförmigen Zotten auf den Falten des Dünndarms sind sie als flache Kuppeln erkennbar (a, b). Dort werden der Immunabwehr Stichproben von Mikroorganismen und Nahrungspartikeln aus dem Darminhalt übermittelt. Das Einschleusen übernehmen taschenförmige Zellen zwischen den Deckzellen im Epithel. Diese so genannten M-Zellen geben das fremde Material (die Antigene) an die Hauptabwehrzellen weiter: T- und B-Zellen, Makrophagen (große Fresszellen) und dendritische Zellen (c). Der Austausch unterschiedlicher chemischer Signale zwischen den Akteuren der Abwehr bestimmt, ob dann ein Nahrungsantigen toleriert oder attackiert wird.

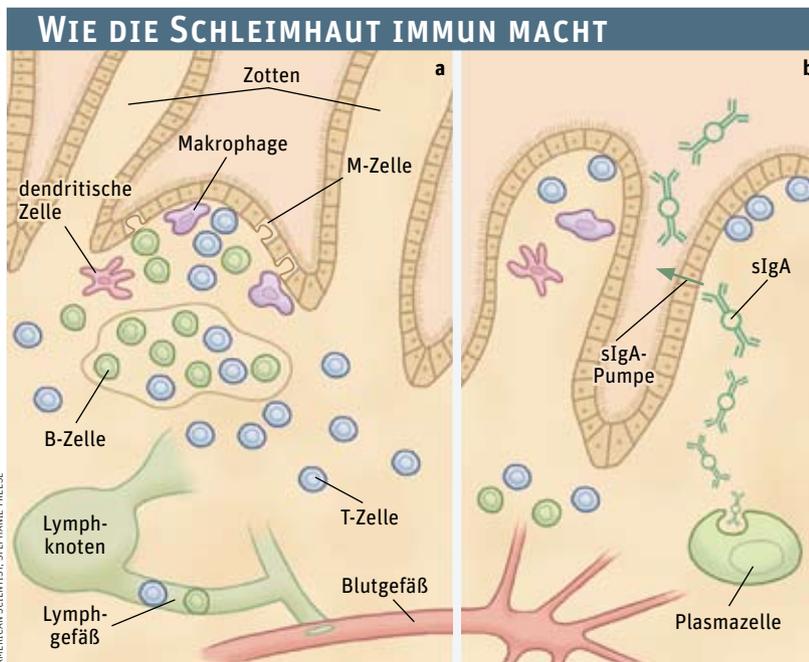


zeptor für dieses verbreitete bakterielle Erkennungszeichen bereit. Im Geburtskanal kommen die Tiere mit Lipopolysacchariden in Kontakt, die aus der mütterlichen Bakterienflora stammen. Daraufhin verändert sich ihr Darmepithel in einer Weise, dass es nach der Geburt mikrobielle Merkmalsmuster toleriert. Dagegen zeigen Mäuse, die per Kaiserschnitt zur Welt kommen, keinerlei Anzeichen für eine solche epitheliale Toleranz.

Diese Beobachtungen könnten auch für Menschen relevant sein: Kinder mit einer genetischen Prädisposition zur Atopie (festgemacht daran, dass ihre Mütter an verschiedenen Allergien litten) entwickelten achtmal häufiger eine Überempfindlichkeit gegenüber Nahrungsmitteln, wenn sie per Kaiserschnitt zur Welt kamen (Kasten S. 60).

Eine orale Toleranz kommt allerdings nicht in einem einzigen Schritt zu Stande, sondern über eine komplexe Abfolge von Ereignissen, die im Darm und im gesamten Körper zur Immunsuppression beitragen. Viele Faktoren beeinflussen die Ausbildung dieser Toleranz und damit auch die von Nahrungsmittelallergien: genetische Veranlagungen, das Alter, zu welchem Zeitpunkt und in welcher Dosis nach der Geburt Antigene über den Mund aufgenommen werden, Beschaffenheit und Mischung dieser Antigene, die Unversehrtheit der Epithelbarriere im Darm sowie das Ausmaß, in dem in der Schleimhaut ansässige Immunzellen zugleich dabei aktiviert werden.

Muttermilch hilft dem Darm in der ersten Zeit des Lebens, bestimmte Nahrungsmittelantigene zu tolerieren. Beispielsweise enthält sie Antikörper, die Glutenpeptide aus Weizen abfangen. Tatsächlich erkrankten Kinder, die gestillt wurden, deutlich seltener an Zöliakie. Dies weist darauf hin, dass ein längeres Zufüttern von Muttermilch, statt abrupt abzustellen, möglicherweise eine bessere Toleranz gegenüber Nahrungsproteinen allgemein fördert.



**Die Schleimhaut-Immunität wird lokal im Bereich der Peyerschen Plaques induziert (a), mit dem wichtigen Ergebnis, dass schließlich sekretorische Antikörper der Klasse A (sIgA) entstehen und auf breiter Front durch die Darmschleimhaut in die Schleimschicht transportiert werden (b).**

M-Zellen schleusen Antigenmaterial aus dem Darmlumen nach innen, wo Makrophagen und dendritische Zellen es verschlingen. Winzige Kostproben des zerlegten Materials werden dann zusammen mit bestimmten kostimulatorischen Signalmolekülen wieder zur Zelloberfläche befördert und T- wie B-Zellen regelrecht präsentiert. Erkennt deren Antigen-Rezeptor erstmals ein solches Bruchstück, wirkt das auf die noch unerfahrenen Immunzellen wie eine Initialzündung. Sie wandern nach einer solchen lokalen Primäraktivierung in nahe gelegene Lymphknoten, wo sie weitere Anweisungen durch Botenstoffe erhalten.

Die Mehrzahl der B- und T-Zellen begibt sich danach in den Blutkreislauf; viele davon kehren später in die Bindegewebsschicht unter der Darmschleimhaut zurück (b). An ihrem neuen Aufenthaltsort können sich B-Zellen, bei geeigneten antigenabhängigen Sekundärsignalen, in so genannte Plasmazellen umwandeln. Diese stellen große Mengen an Antikörpern her, die in den Schleim gepumpt werden.

**Schläfrige Sheriffs**

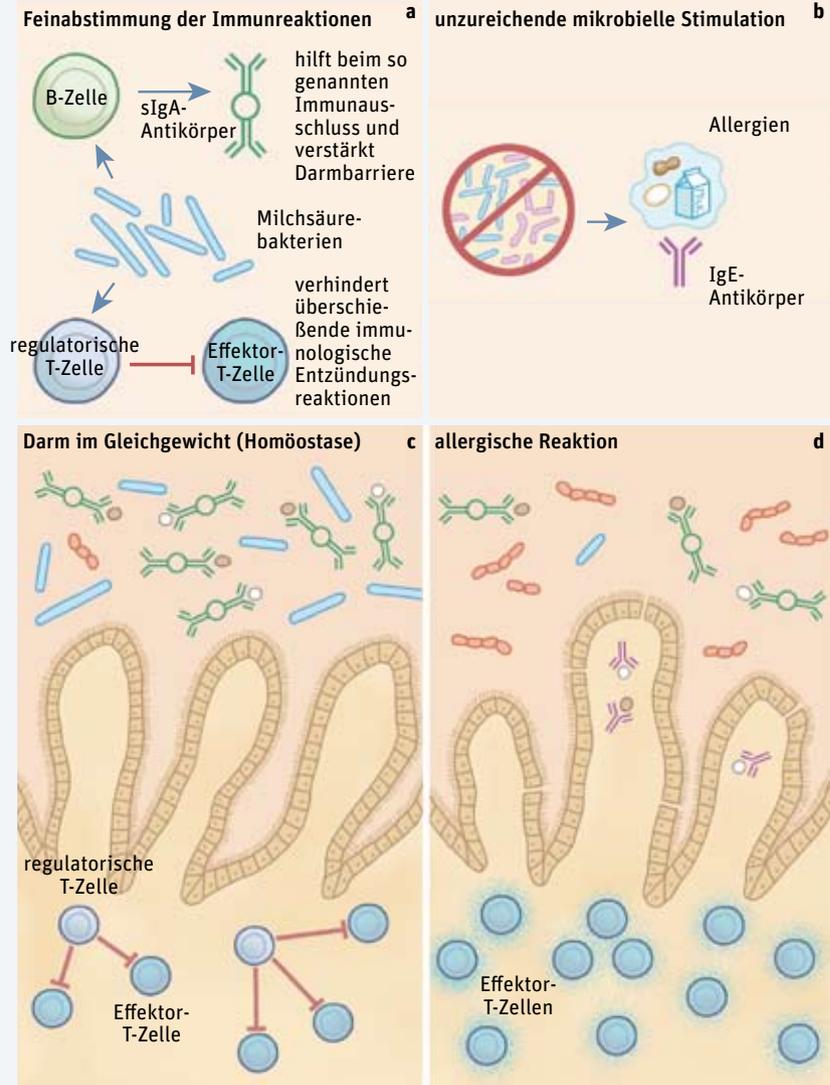
Wie eine Studie mit Stillkindern zeigte, hängt diese Toleranz teilweise auch von der mütterlichen Immunlage ab: Bei einem niedrigen mütterlichen Spiegel von Antikörpern gegen Rinderproteine entwickelten die Kinder später häufiger eine Kuhmilchallergie. Außer Antikörpern enthält Muttermilch Sorten von Cytokinen und Wachstumsfaktoren, die für ihre Toleranz fördernden Eigenschaften verantwortlich sein könnten – indem sie die Aktivierung des darmassoziierten lymphatischen Gewebes modifizieren und die Barrierewirkung des Darmepithels stärken. Auch wenn der Punkt weiterhin umstritten bleibt – die meisten epidemiologischen Studien stützen die Ansicht, dass Stillen vor Asthma und Neurodermitis schützt. Jedenfalls ist der positive Effekt von Muttermilch auf die Barrierfunktion der frühkindlichen Darmschleimhaut deutlich und hat eine besondere Bedeutung bei Familien, in denen gehäuft Allergien auftreten.

Nach heutigem Verständnis wird orale Toleranz aber hauptsächlich über Etappen im Reifungsprozess von T-Zellen erwirkt: So werden T-Zellen mit einem unerwünschten Feindschema ausgemerzt oder dauerhaft ruhiggestellt; zugleich vervielfältigen sich insbesondere so genannte regulatorische T-Zellen (sie zügeln die Abwehr). Bei gesunden Menschen kommen daher in der Darmschleimhaut praktisch keine überaktivierten Effektor-T-Zellen vor. Auch werden dort nur wenige entzündungsfördernde IgG-Antikörper an sich er-

## HARMLOSE DARMBEWohner FÜR DIE IMMUNBALANCE

**Nach der so genannten erweiterten Hygienehypothese** bewirken Milchsäurebakterien und andere »gute« Darmbewohner eine Feinabstimmung der Immunreaktionen durch die vermehrte Bildung regulatorischer T-Zellen und IgA sezernierender B-Zellen (a). Die Regulatoren unterdrücken die Aktivität von Effektor-T-Zellen, die als Antwort auf bestimmte Antigene entzündungsfördernde chemische Signale freisetzen. Ohne ausreichende mikrobielle Stimulation (b) entstehen keine regulatorischen T-Zellen. Das Ergebnis ist eine aggressive Immunantwort, die mit der Produktion von IgE-Antikörpern einhergehen kann. Sie spielen eine Hauptrolle bei akuten allergischen Reaktionen gegen Nahrungsmittel wie etwa Erdnüsse, Eier oder Milch.

Ein Darm, der sich im immunologischen Gleichgewicht befindet (c), enthält viele nützliche, gute Bakterien. Sie fördern die Aktivität regulatorischer T-Zellen, unterstützen die Bildung sekretorischer IgA-Antikörper und verhelfen der Darmschleimhaut zu einer dichten Epithelbarriere. Bei Allergikern ist der Darm dagegen aus dem Gleichgewicht geraten (d). Kennzeichen dafür sind: große Mengen unerwünschter Bakterien wie Clostridien, eine unzügelle Ausschüttung entzündungsfördernder Signale durch Effektor-T-Zellen, Bildung von IgE-Antikörpern gegen Nahrungsbestandteile sowie eine dürftige Barrierefunktion des Schleimhautepithels.



zeugt. Und im Blut zirkulieren nur geringe Mengen solcher Antikörper gegen Nahrungsmittelantigene.

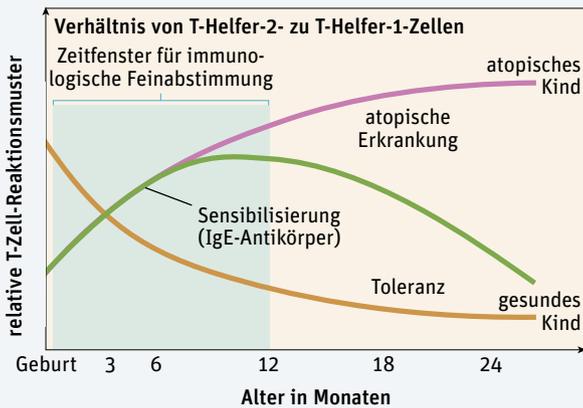
Bei jedem neuartigen Antigen muss das Immunsystem entscheiden, ob die Sache bedrohlich (wie im Fall eines Erregers) oder harmlos ist, ob es also eine schlagkräftige Antwort zwecks Elimination aufbauen oder sie unterdrücken soll. Hat die Bakterienflora des Darms via Mustererkennungsrezeptoren bereits antigenpräsentierende Zellen feinetuned, agieren diese mit größerer Wahrscheinlichkeit zu Gunsten von Regulatoren. In einem gesunden Darm, wo die präsentierenden Zellen immer Komponenten der normalen Bakterienflora ausgesetzt sind, wird ein bloßer Hauch von bakteriellem Lipopolysaccharid die dendritischen Zellen nicht mehr sonderlich aufregen: Sie schütten nur geringe Mengen entzündungsfördernder Alarm-Cytokine aus. Sie verhalten sich wie ein schläfriger Sheriff in einem friedlichen Städtchen. Wenn dendritische

Zellen in diesem gelassenen Zustand dann aus dem Darm aufgenommenes Antigenmaterial zu nahe gelegenen Lymphknoten befördern, werden sie dort – über einen normalen Reifungsvorgang – noch stärker auf Toleranz gedrillt. Was sie an Sorten kostimulatorischer Moleküle ausprägen oder an Arten von Cytokinen abgeben, fördert die Vermehrung geeigneter regulatorischer T-Zellen – und somit auch die Entwicklung von Toleranz. Einige der Regulatoren wandern durch Lymph- und Blutgefäße bis in die Darmschleimhaut, um dort den Gleichgewichtszustand aufrechtzuerhalten.

Alles in allem vermeidet der Körper eine unnötige Überaktivierung seiner Immunwächter sowie potenziell schädliche Entzündungen demnach in zwei Etappen: anfangs durch verhaltenen Alarm; später durch zurückwandernde aktivierte regulatorische T-Zellen, die in der Schleimhaut das immunologische Gleichgewicht steuern. Gleichzeitig

## SCHIEFLAGE DER HELFER

**Das Verhältnis zwischen zwei verschiedenen Typen von T-Helferzellen – Typ 1 und 2 – ist bei Kleinkindern mit Allergien anders.** Bei gesunden Kindern wird die Immunantwort nach und nach immer stärker von Helfer-1-Signalen bestimmt (braune Kurve), obwohl im Neugeborenenalter noch die Helfer-2-Reaktion stark dominierte. Bei Kindern mit Allergien (violette Kurve) mag die fortgesetzte Dominanz von T-Helfer-2-Signalen zu Krankheiten wie Neurodermitis (atopisches Ekzem) geführt haben (Foto). Mikroorganismen scheinen einen modulierenden Einfluss auf das Einstellen eines angemessenen Th2:Th1-Verhältnisses zu haben, insbesondere während eines schmalen Zeitfensters nach der Geburt (hellgrüner Bereich). Sogar bei bereits sensibilisierten Kindern mit hohem IgE-Antikörperspiegel bewirkt möglicherweise eine Zunahme nützlicher Darmbakterien die Freisetzung bestimmter Zellsignale, die das Helferzellverhältnis abstimmen und dadurch eine immunologische Homöostase fördern (grüne Kurve).



AG-FOCUS / SPL, P. MARAZZI

AMERICAN SCIENTIST, STEPHANIE FRIESE, NACH: SAMULI RAUTAVA ET AL., JOURNAL OF PEDIATRIC GASTROENTEROLOGY AND NUTRITION 2004, BD. 38, S. 378-388

parasiten wie Saug- und Bandwürmern. (Gut zu wissen, dass derartige Plagegeister auch für etwas nützlich sind!) Dies ist ein stützendes Indiz für die so genannte erweiterte Hygienehypothese. Sie besagt, dass eine zu hygienische Lebensweise, typisch für Industrieländer, ein Ausreifen des Schleimhaut-Immunsystems verhindern kann. Und das führe zu unzureichender sekretorischer Immunität und einer geringeren Anzahl regulatorischer T-Zellen. Befürworter der Hypothese vermuten, dass diese Defizite die Zunahme von Allergien und anderen immunbedingten entzündlichen Störungen in Gesellschaften mit westlichem Lebensstil miterklären könnten. Unsere Abwehr hat gewissermaßen ihre sie stimulierenden »alten Freunde« verloren.

### Ein Pakt mit harmlosen Mikroben

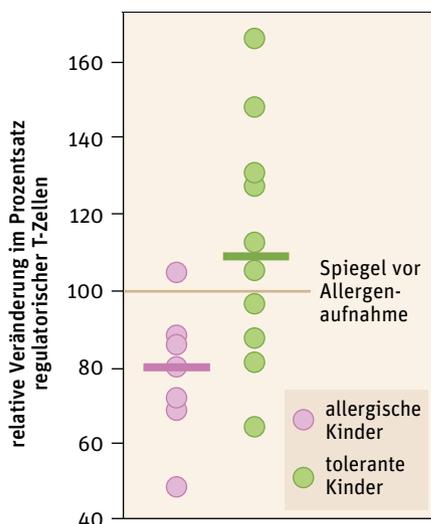
Geprüft wurde die Hygienehypothese in verschiedenen klinischen Studien durch Einsatz so genannter probiotischer Präparate. Diese enthalten oft bestimmte Stämme kommensaler Bakterien, die sich im Darm ansiedeln und das Immunsystem stimulieren sollen (wie das Milchsäurebakterium *Lactobacillus rhamnosus* Stamm GG, kurz LGG). Andere Probiotika enthalten Eier von Darmparasiten, deren eigentlicher Wirt nicht der Mensch ist – etwa Eier des Schweine-Peitschenwurms, die sich im Menschen nicht zu fertigen Würmern entwickeln können und daher kein Infektionsrisiko bergen.

Untersuchungen an Menschen und Tieren deuten darauf hin, dass Laktobazillen und Bifidobakterien die Bildung von sekretorischen IgA-Antikörpern ankurbeln – anscheinend über einen von T-Zellen abhängigen Mechanismus. Bei einer Doppelblindstudie mit familiär belasteten Kindern, die in den ersten sechs Lebensmonaten täglich das Probiotikum LGG verabreicht bekommen hatten, litten die Teilnehmer im Alter von zwei Jahren nur halb so oft unter Neurodermitis wie Babys, die ein unwirksames Placebopräparat erhalten hatten. Noch vier Jahre später unterschied sich die Allergiehäufigkeit in den beiden Gruppen. Ob dieses bemerkenswerte Ergebnis auf einer durch sIgA gestärkten Barrierefunktion der Darmschleimhaut beruht, auf einer gesteigerten oralen Toleranz oder auf beidem, ist allerdings noch unklar.

Unser Immunsystem geht auf eine lange Reihe tierischer Vorfahren zurück, die entstanden, als Mikroorganismen bereits Milliarden Jahre existierten. Im Lauf der Evolution schloss das Abwehrsystem einen Pakt mit harmlosen Stämmen, die im Darm oder auf anderen Körperoberflächen den krankheitsereggenden Stämmen Nährstoffe und Lebens-

greifen sich die Makrophagen als Hilfsheriffs jedes kommensale Bakterium, das durch das Darmepithel zu schlüpfen vermochte. Sie erfüllen weiterhin ihre Aufgabe, eingedrungene Mikroben zu verschlingen und dann im Inneren zu vernichten.

In den benachbarten Lymphknoten des Darms hängt die Konditionierung zur oralen Toleranz davon ab, welches Menü mikrobieller Bestandteile die dendritischen Zellen vorgesetzt bekamen. Toleranz gegenüber Nahrungsproteinen entwickelt sich eher in Gegenwart gewisser Komponenten: Die können aus bestimmten Vertretern der Darmflora stammen, aber auch aus harmlosen Bakterien im Boden und in Gewässern, sogar aus Darm-



AMERICAN SCIENTIST, STEPHANIE FRIESE, NACH: MALIN KARLSSON ET AL., J. EXP. MED. 2004, BD. 199, S. 1679-1688

**Bei den meisten Kindern mit Kuhmilchallergie verschwindet die Unverträglichkeit nach einigen Jahren wieder, teils schon nach mehreren Monaten. Dieser Übergang von Allergie zu Toleranz zeigte sich auch im Blutspiegel der regulatorischen T-Zellen, wenn die Kinder nach mehrmonatiger Karenz Kuhmilch zu trinken bekamen. Bei nicht mehr allergischen Kindern bewirkte der Provokationstest einen Anstieg der regulatorischen T-Zellen im Blut. Bei weiterhin allergischen Kindern kam es dagegen zu einer Abnahme.**

raum streitig machen würden. Allein der Darm eines erwachsenen Menschen beherbergt durchschnittlich 100 Billionen kommensale Bakterien – zehnmal mehr, als der Körper an eigenen Zellen enthält. Verständlich also, dass das Bündnis zum gegenseitigen Nutzen auch unsere immunologischen Verteidigungsmechanismen mitgestaltet.

Ein zu geringer oder fehlgeleiteter Kontakt mit Keimen in der frühen Kindheit begünstigt – so die ursprüngliche Hygienehypothese – eine Schiefelage bei zwei Typen von T-Helferzellen: Der Typ 1 werde nicht genügend stimuliert und könne daher dem Typ 2 nicht ausreichend entgegenwirken, der durch seine Cytokine seinerseits B-Zellen veranlasst, zu viele IgE-Antikörper herzustellen – was schließlich zur Atopie führe. Die richtige Darmflora würde demnach eine Homöostase, ein immunologisches Gleichgewicht, in der Schleimhaut fördern, indem sie das Abwehrsystem des Neugeborenen umdirigieren hilft: von einem Zustand, in dem Signale der Typ-2-Helfer dominieren, zu einem Zustand mit ausgeglichenerem Cytokinprofil (siehe Kasten linke Seite).

Die erweiterte Hygienehypothese postuliert nun, dass regulatorische T-Zellen, die auf ihrer Oberfläche als ein Kennzeichen so genannte CD25-Rezeptoren tragen, ein wichtiges Element des Homöostase-Mechanismus sind. Die Regulatoren halten Helfer beider Typen in Schach, wenn diese als entzündungsfördernde Effektor-T-Zellen agieren. So vermeiden sie Entzündungen und Gewebeschädigungen. Außerdem unterdrücken sie auch indirekt Immunreaktionen – entweder indem sie die Funktion antigenpräsentierender Zellen herabsetzen oder indem sie hemmende Cytokine abgeben.

### Die Milch macht's

Die Feinabstimmung der Schleimhaut-Immunität eines Babys geschieht in einem schmalen Zeitfenster. Sie beginnt mit der Geburt, wenn sich mütterliche Vaginal- und Stuhlbakterien im Kind ansiedeln. Bei gesunden Individuen verschiebt dieser erste Kontakt das Cytokinprofil des Neugeborenen in Richtung Typ-1-Signale – ein Zeichen für die Reifung des Immunsystems. Bei atopischen Kindern herrschen dagegen weiterhin Cytokine aus Typ-2-Helferzellen vor: Sie steigern den Ausstoß von IgE-Antikörpern, die das Neugeborene für spätere Allergien anfällig machen. Glücklicherweise bewahrt das System allerdings noch etwas Flexibilität. Kleinkinder können das Verhältnis der Typ-1- zu Typ-2-Reaktionen noch korrigieren, und bei den meisten Kindern verschwindet eine ausgebrochene Nahrungs-

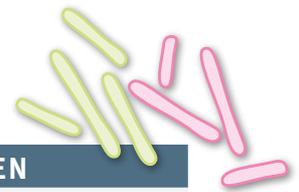
mittelallergie nach einiger Zeit wieder. (Einige Überempfindlichkeiten wie die gegenüber Erdnüssen halten sich allerdings als hartnäckiger als andere.)

Ein Beispiel: Bei vier von fünf Kindern, die allergisch gegen Kuhmilch sind, verwächst sich das Problem noch vor dem Schulalter. Kuhmilchallergie eignet sich daher gut als Modell, um die Komplexität der oralen Tole-

## Allein der Darm eines erwachsenen Menschen beherbergt durchschnittlich 100 Billionen mitbewohnende Bakterien – zehnmal mehr, als der Körper an eigenen Zellen enthält

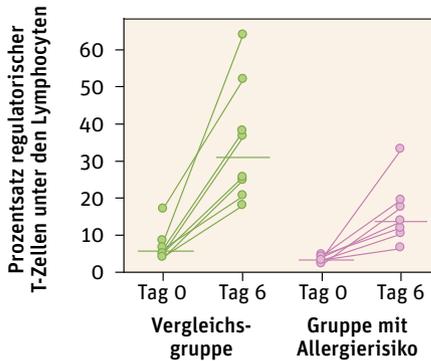
ranz zu erforschen. Experimente mit Mäusen deuteten darauf hin, dass orale Toleranz hauptsächlich durch das Eingreifen regulatorischer T-Zellen mit dem CD25-Oberflächenmarker hervorgerufen wird (wenn auch noch andere Mechanismen mitwirken können). Menschen sind aber keine Mäuse. Daher untersuchte unser Team an der Universität Oslo eine Gruppe von 21 Kindern, die zunächst alle gegen Kuhmilch allergisch waren. Nach einer zweimonatigen Diät ohne jegliche Milchprodukte gaben wir den Kindern eine Woche lang Kuhmilch zu trinken. Mehr als die Hälfte hatte keine Probleme mehr. Gegenüber Kindern mit fortbestehender Allergie enthielt ihr Blut tatsächlich nicht nur mehr, sondern auch funktionstüchtigere regulatorische T-Zellen. Und ihre Effektor-T-Zellen reagierten im Reagenzglas schwächer auf Kuhmilchprotein.

Entfernten wir daraus jedoch alle Zellen mit CD25-Rezeptoren – also auch die regulatorischen T-Zellen –, fiel die Immunantwort



### GUTE BAKTERIEN, SCHLECHTE BAKTERIEN

**Gewisse mikrobielle Stimuli** eignen sich offensichtlich besser als andere dazu, das Immunsystem auszubalancieren. Verschiedenen Studien zufolge enthalten atopische Kleinkinder in ihrem Stuhl vermehrt Darmbakterien der Gattung *Clostridium* und weniger Bifidobakterien. Ähnliches ergab eine länderübergreifende Untersuchung: Schwedische Kindern hatten im Schnitt mehr Clostridien im Stuhl und neigten stärker zu Allergien als Kinder einer gleichaltrigen Vergleichsgruppe aus Estland, die weniger unter Allergien litten und hohe Konzentrationen von Laktobazillen und bestimmten anderen nützlichen Darmbakterien aufwiesen. Es ist also denkbar, dass unterschiedliche Ernährungsweisen und medizinische Behandlungsarten (insbesondere Antibiotikagaben) eine Langzeitwirkung auf das sich entwickelnde Immunsystem ausüben, indem sie die Zusammensetzung der Darmflora beeinflussen. Die Möglichkeit, dass sich das immunologische Gleichgewicht durch probiotische Anpassung der Darmflora fördern ließe, ist somit sicherlich weiterer Untersuchung wert.



AMERICAN SCIENTIST, STEPHANIE FRESE, NACH: UNNI HADDELAND ET AL., PEDIATRIC ALLERGY AND IMMUNOL. 2005, BD.16, S.104-112

**Abwehrzellen aus dem Nabelschnurblut können den Immunstatus eines Neugeborenen anzeigen. Im Vergleich zu Kindern ohne erbliche Vorbelastung besaßen Babys aus Allergikerfamilien bereits bei der Geburt signifikant weniger an induzierbaren regulatorischen T-Zellen. Und nach sechs Tagen in einem Kulturmedium, das Kuhmilchprotein und bakterielle Zellwandbestandteile enthielt, hatten sich in ihren Proben die regulatorischen T-Zellen auch weniger stark vermehrt.**

auf Milchprotein fünfmal stärker aus als vorher. Daraus schließen wir, dass eben diese Untergruppe der T-Zellen maßgeblich zur Toleranzentwicklung gegen Kuhmilchantigene beigetragen hatte. Unsere Studie war die erste, die bei Menschen eine Verbindung zwischen der Induktion einer oralen Toleranz und der Entwicklung regulatorischer T-Zellen mit diesen Rezeptoren aufzeigte. Daraus könnte ein nützliches diagnostisches Instrument erwachsen, und möglicherweise dienen regulatorische T-Zellen einmal als Ansatz, Allergien vorzubeugen oder sie zu behandeln.

Es besteht Hoffnung, diese Zellen eines Tages gezielt durch Probiotika auf der Basis von Bakterien oder Parasiten stimulieren zu können, und gewisse Stimulanzien eignen sich, wie es aussieht, besser als andere dazu, das Immunsystem auszubalancieren (siehe Kasten S. 65).

In einer anderen Untersuchung wollten wir prüfen, wie sich Lipopolysaccharid aus Bakterien auf die Ansprechbarkeit von T- und B-Zellen Neugeborener auswirkt – einschließlich der Aktivierung regulatorischer T-Zellen durch ein Nahrungsmittelantigen. Bestanden in dieser Hinsicht vielleicht Unterschiede zwischen Neugeborenen mit hohem Allergierisiko (auf Grund familiärer Belastung) und solchen ohne erbliche Vorbelastung? Eine gängige Methode zur Analyse der Immunreaktionen von Neugeborenen ist die Entnahme von Nabelschnurblut bei der Geburt. Da die Immunzellen in solchen Proben, so genannte mononukleäre Nabelschnurblutzellen (englisches Kürzel: CBMCs), fast ausschließlich vom Baby stammen, kann man sie – gewissermaßen als Stellvertreter seines Immunsystems – in Kultur halten und untersuchen.

Ergebnis: Nach einer Stimulation durch Kuhmilchprotein vermehrten sich die CBMCs von Risikokindern stärker und unkontrollierter – vielleicht sagt dieser Test tatsächlich spätere Allergien voraus. Wir werden dazu die weitere Entwicklung der Kinder verfolgen. Noch andere Unterschiede fanden sich, und zwar bei verschiedenen Untergruppen von T-Zellen, die anhand ihrer immunologischen

Oberflächenmarker bestimmbar sind. Die Zellen von Babys aus Atopikerfamilien prägten insgesamt weniger dieser Moleküle auf ihrer Oberfläche aus, wenn man sie einer Mischung aus Milchantigenen und Lipopolysaccharid aussetzte. Und das deutet auf eine verzögerte Entwicklung zu einem ausgeglicheneren Immunsystem hin. Und schließlich zeigte sich auch die Induktion regulatorischer T-Zellen stark beeinträchtigt.

Diese Ergebnisse stützen die Vorstellung, dass die Immunitätsinduktion normalerweise bereits sehr früh im Leben – beeinflusst von Genen und Mikroorganismen – moduliert wird. Das CBMC-Modell kann jedoch nur kleine Steinchen in dem großen Puzzle an Mechanismen offenbaren. Was im Darm immunologisch passiert, ist weitaus komplexer, und an der Schleimhaut-Homöostase wirkt vermutlich eine Vielzahl von Prozessen mit.

### Allergie als Epidemie

Wenn man von der ganzen Komplexität einmal absieht, beruht die orale Toleranz auf einigen wenigen grundlegenden Dingen: sekretorischen IgA-Antikörpern, der Barrierefunktion des Darmepithels, dem Zeitpunkt des Erstkontakts mit kommensalen Bakterien und der aufgenommenen Menge sowie auf genetischen Faktoren. Diese Faktoren greifen ineinander und sind allesamt gleich wichtig für die Aufrechterhaltung des Gleichgewichts in der Schleimhaut. Eine Nahrungsmittelallergie entsteht demnach nie durch nur eine einzelne Ursache.

Aus evolutionärer Sicht sind Intoleranzen gegenüber gewissen Nahrungsantigenen nicht allzu überraschend. Schließlich ist es in der Menschheitsgeschichte noch nicht lange her, dass wir, statt als Jäger und Sammler zu leben, zu Ackerbau und Viehzucht übergingen. Kuhmilch etwa gehörte vorher nicht ins Repertoire. Außerdem arbeitet die Auslese ziemlich langsam, wenn ein unerwünschtes Merkmal sich nur sehr selten tödlich auswirkt.

Bei all dem dürfen wir auch nicht vergessen, dass die derzeitige »Allergie-Epidemie« in den Industrieländern letztendlich nur ein kleiner Preis ist für den beachtlichen Rückgang der Kindersterblichkeit, der durch verbesserte sanitäre Bedingungen und Hygiene zu Stande kam. Zu wenige Mikroben um uns herum zu haben erscheint zwar problematisch – ein Umfeld voller Krankheitserreger aber ist viel, viel schlimmer. Angesichts des wissenschaftlichen Fortschritts besteht durchaus die Hoffnung, dass ein Ausgleich für die uns fehlenden nützlichen Mikroorganismen zu finden ist, der es zur Entwicklung einer ausgewogenen Schleimhaut-Immunität bedarf. ◀



**Per Brandtzaeg** leitete bis vor kurzem den Fakultätsbereich der Rikshospitalet Universitätsklinik in Oslo und ist der Begründer des dortigen Labors für Immunhistochemie und Immunpathologie. Ihn interessiert die Biologie und Pathologie des schleimhautassoziierten Immunsystems. Brandtzaeg war in den vergangenen zwanzig Jahren Norwegens meistzitiertester Wissenschaftler und ist der erste europäische Präsident der Internationalen Gesellschaft für Schleimhautimmunologie.

© American Scientist  
[www.americanscientist.org](http://www.americanscientist.org)

Weißbuch Allergie in Deutschland. Von DGAI, ÄDA, und DAAU (Hg.). 2. aktual. und erweiterte Auflage, Urban&Vogel, München 2004

Mechanisms of disease. The hygiene hypothesis revisited. Von F. Guarner et al. in: Nature Clinical Practice Gastroenterology & Hepatology, Bd. 3, S. 275, 2006

Recognition of commensal microflora by toll-like response is required for intestinal homeostasis. Von S. Rakoff-Nahoum et al. in: Cell, Bd. 118, S. 229, 2004

Weblinks unter [www.spektrum.de/artikel/936496](http://www.spektrum.de/artikel/936496).

# Hotspots entfesselt

Lange galten Hotspots als ortsfeste Quellen von Magma, das tief aus dem Erdinneren aufsteigt. Doch nun erweisen sich die vermeintlichen Fixpunkte, mit denen Geologen die Verschiebungen von Krustenplatten ermittelten, als überraschend mobil.

Von John A. Tarduno

Die Inseln und Tiefseeberge der Hawaii-Emperor-Kette galten neben den zueinanderpassenden Küstenlinien von Südamerika und Afrika lange als sichtbares Zeugnis der Plattentektonik – des Wanderns großer Krustenblöcke über die Oberfläche unseres Planeten. Sie bilden eine Linie quer durch den Pazifik, die über 3500 Kilometer hinweg erstaunlich gerade verläuft. Außerdem werden ihre Gesteine in Richtung Nordwesten sukzessive älter: angefangen bei dem sich immer noch vergrößernden Hawaii (Big Island) über Maui, Oahu und Kauai bis zum Kure-Atoll, dessen schon lange erloschener Vulkan so weit abgesunken ist, dass er kaum noch aus dem Meer herausragt. Dahinter knickt die Linie ab und setzt sich über die Emperor Seamounts in nördlicher Richtung bis zur Spitze der Aläuten fort.

Die Standarderklärung für dieses Muster lieferte schon 1963 der kanadische Geophysiker J. Tuzo Wilson. Demnach dokumentieren die Inseln das Wandern der Pazifischen Platte über einen vulkanischen Hotspot hinweg (Spektrum der Wissenschaft 6/1985, S. 62). Diesen »heißen Fleck« kann man sich als eine Art Kerze im Erdinneren vorstellen, deren Flamme ein Loch in die Kruste brennt. Durch die Öffnung tritt Lava aus und baut eine Insel auf. Die Platte, die über den Hotspot hinwegwandert, trägt die Insel mit der Zeit von ihm fort. Die Kerze brennt sich daher an einer anderen Stelle durch die Kruste und lässt dort die nächste Insel entstehen. Das geht immer so weiter. Gemeinsam produzieren Hotspot und Plattentektonik somit quasi Inseln am Fließband.

Im Jahr 1971 deutete Jason Morgan von der Universität Princeton (New Jersey) die »Kerze« als Spitze eines Pilzes aus geschmolzenem Gestein, das tief aus dem Erdmantel aufsteigt. Dieser so genannte Plume (nach eng-



Auslöser des Vulkanismus auf Hawaii ist ein so genannter Hotspot, ein heißer Fleck. Er markiert die Spitze einer Magmasäule im Erdmantel, die sich wie ein Schneidbrenner durch die Kruste »frisst«.

lisch: Rauchfahne) bewegt sich nicht, weil er im Erdinneren verankert ist; nur die Platte wandert. Demnach lag der Hotspot von Hawaii die ganze Zeit unveränderlich bei etwa 19 Grad Nord, während die Pazifische Platte um etwa zehn Zentimeter pro Jahr Richtung Nordwesten darüber hinwegdriftete. Dabei änderte sie, wie der Knick in der Vulkankette nahelegt, vor etwa 47 Millionen Jahren offenbar plötzlich ihre Bewegungsrichtung.

Die unverrückbare Position der Hotspots erklärte nicht nur die Entwicklung der Hawaii- und anderer Inselketten, sondern gab den Geowissenschaftlern auch einige hochwillkommene Orientierungspunkte an die Hand. Damit gelang es, Plattenbewegungen zu rekonstruieren und die ursprüngliche Lage von geologischen Proben zu ermitteln – darunter Sedimentkerne zur Bestimmung des früheren Klimas und Gesteine, mit denen sich die Bewegung der Erdkruste in Relation zur Rotationsachse unseres Planeten bringen lässt.

Daher war es ein Schock, als meine Kollegen und ich kürzlich herausfanden, dass Hotspots keineswegs so ortsfest sind, wie sie scheinen. Die Geophysiker müssen jetzt neue Orientierungspunkte ausmachen – und vor allem herausbekommen, warum die Hotspots wandern.

### Miniaturmagneten im Gestein

Den Durchbruch für die Theorie der Plattentektonik brachte in den 1960er Jahren die Entdeckung, dass die Magnetisierung von Gesteinen ein Archiv der Plattenbewegungen enthält. Wenn Lava sich abkühlt, kristallisieren magnetische Minerale darin aus, vor allem Magnetit und Titanomagnetit. Diese Miniatur-Stabmagneten orientieren sich parallel zum momentan an der betreffenden Stelle herrschenden Magnetfeld. Diese Richtung behalten sie nach dem völligen Erstarren der Lava bei. Da das Erdmagnetfeld sowohl zeitlich als auch räumlich variiert, bietet das zwei Möglichkeiten zur Rekonstruktion von Plattenbewegungen.

Erstens lässt sich die Veränderung über die Zeit hinweg untersuchen. In unregelmäßigen Abständen kehrt sich das Erdmagnetfeld nämlich um: Nord- und Südpol tauschen ihre Position. Stellen Sie sich vor, was das für mittelozeanische Rücken bedeutet. Dort bewegen sich zwei Platten auseinander. In die Lücke dringt Gesteinsschmelze aus der Tiefe, erstarrt und bildet frische Kruste. Dabei reihen sich die magnetisierten Minerale auf wie Eisenfeilspäne in der Nähe eines Magneten. Beispielsweise zeigen sie alle nach Norden. Mit den auseinanderdriftenden Platten entfernt sich das Gestein allmählich vom Rücken.

Nach einigen hunderttausend Jahren polt sich dann das Erdmagnetfeld um. Von diesem Moment an werden neu gebildete Gesteine in entgegengesetzter Richtung magnetisiert. Auch sie wandern mit der Zeit vom Rücken fort. Schließlich klappen die Pole erneut um, sodass die Minimagnete wieder nach Norden zeigen.

Dieses Wechselspiel setzt sich über viele Jahrmillionen fort. Das Ergebnis ist eine Serie horizontaler Streifen in der ozeanischen Kruste, deren magnetisierte Minerale abwechselnd nach Norden oder Süden weisen – eine geologische Version der Baumringe. Man kann sie abzählen und mit den Daten der Polumkehrungen abgleichen, um ihr Alter zu bestimmen. Aus den so ermittelten Zeitangaben und der Breite der Streifen lassen sich Richtung und Geschwindigkeit benachbarter Platten relativ zueinander berechnen.

Zweitens kann man sich zu Nutze machen, dass die Richtung des Erdmagnetfelds zwei Komponenten hat: horizontal (Deklination) und vertikal (Inklination). Wenn Sie mit einem Kompass die Nordrichtung bestimmen, verwenden Sie die Deklination. Beim genauen Blick auf die Kompassnadel erkennen Sie jedoch, dass sie leicht gekippt, also gegen die Horizontale geneigt ist. Wie Neil Opdyke von der Universität von Florida in Gainesville Ende der 1960er Jahre in einer klassischen Untersuchung bewies, hängt die Inklination direkt von der geografischen Breite ab (Kasten S. 71). Ihre Messung verrät also den Breitengrad, auf dem das Vulkangestein erstarrt ist und damit die Strecke, um die sich die Platte seither mindestens verlagert haben muss. (Die geografische Länge wird nicht angezeigt.)

Die Ergebnisse sind allerdings mit Fehlern behaftet, weil das Erdmagnetfeld nicht völlig gleichmäßig wie bei einem riesigen, in Nord-Süd-Richtung orientierten Stabmagneten verläuft. Es zeigt ein komplexeres Muster, in dem sich nach Ansicht von Geophysikern Unregelmäßigkeiten in der Bewegung des flüssigen Eisens im Erdkern widerspiegeln. Beim Mitteln über mehrere Jahrtausende heben sich diese Abweichungen jedoch auf. Deshalb braucht man viele Proben, die einen genügend langen Zeitraum repräsentieren. Allerdings enthalten nur wenige Inseln an ihrer Oberfläche Gesteine, die weit genug in die Vergangenheit zurückreichen. Darum müssen Geologen alten Meeresboden anbohren.

Doch das bringt eigene Probleme mit sich. So kann ozeanische Kruste geneigt sein und dadurch eine falsche magnetische Inklination vortäuschen. Die Gesteinsproben sollten deshalb aus Regionen stammen, wo seismische Untersuchungen belegen, dass die Schichten

## In Kürze

► **Vulkanische Hotspots** wie derjenige unter den Hawaii-Inseln dienten bisher als ortsfeste Referenzpunkte für die Bewegung der tektonischen Platten, aus denen sich die feste Gesteinsschale der Erde zusammensetzt.

► Nun aber zeigt sich, dass auch diese heißen Flecken wandern können. Belege dafür liefern vor allem magnetische Untersuchungen an **Tiefseebergen** der Hawaii-Emperorkette. Diese erloschenen Vulkane entstanden demnach nördlich der heutigen Position des Hotspots – und zwar bei umso höheren Breiten, je älter sie sind. Folglich muss sich der heiße Fleck nach Süden bewegt haben.

► Ursache seiner Wanderung dürften Strömungen im **zähplastischen Erdmantel** tief unter der Erdoberfläche sein.

► Diese Erkenntnis zwingt nicht nur zum Umschreiben von Lehrbüchern; auch Paläoklimadaten und Rekonstruktionen der so genannten **Polwanderung**, einer Drehung der gesamten Erde relativ zu ihrer Rotationsachse, erscheinen dadurch revisionsbedürftig.

## DAS STANDARDMODELL DER ENTSTEHUNG HAWAIIIS

**In den Lehrbüchern steht**, die Kette der Hawaii-Inseln und Emperor Seamounts (rechts) sei entstanden, als die Pazifische Platte über einen ortsfesten Hotspot wanderte. Von diesem gespeister Vulkanismus schuf eine Insel, die dann von der Platte Richtung Nordwesten verfrachtet wurde. Dabei kam frische Kruste über den Hotspot zu liegen, und der Vorgang wiederholte sich (unten). Der Knick in der Kette wurde auf eine Richtungsänderung der Platte zurückgeführt. Doch nach verschiedenen neueren Erkenntnissen scheint diese Erklärung nur teilweise



zu stimmen. Wäre sie korrekt, sollte die Kette beispielsweise anders verlaufen. Sie müsste dann eine Anordnung haben, die sich aus der Lage von Hotspots im Indischen und Atlantischen Ozean rekonstruieren lässt (gestrichelte Linie).

### Die Entstehungsorte der Emperor Seamounts passen nicht zu einem ortsfesten Hawaii-Hotspot

horizontal lagern. Tiefbohrungen in solchen Gebieten wurden bisher jedoch kaum durchgeführt.

Alternativ kann man ein Magnetometer im Schlepptau eines Schiffs über den Meeresboden ziehen. Leider misst das Gerät dabei aber neben der Magnetisierung, die sich dem Gestein bei seiner Bildung eingeprägt hat, weitere Komponenten – so die induzierte Magnetisierung durch das heutige Erdmagnetfeld sowie den Effekt der spontanen Neuorientierung einiger magnetischer Domänen innerhalb der Kristalle über längere geologische Zeiträume hinweg. Magnetometerdaten müssen deshalb immer anhand direkt entnommener Gesteinsproben geeicht werden.

#### Gebrochene Symmetrie

Erste Zweifel an der Ortsstabilität des Hotspots von Hawaii weckten Anfang der 1970er Jahre Untersuchungen von Tanya Atwater und Peter Molnar, die damals am Massachusetts Institute of Technology arbeiteten. Sie wollten aus den magnetischen Streifen am Meeresboden und der Anordnung von Inselketten die Bewegungen einzelner Platten rekonstruieren. Wenn sich zwei solche Krustenblöcke in entgegengesetzter Richtung von einem mittel-

ozeanischen Rücken wegbewegen, entsteht dazwischen eine symmetrische Serie von magnetischen Streifen am Meeresboden. Falls sich unter beiden Platten jeweils ein Hotspot befindet, bilden sich zudem zwei Inselketten. Aus der Position der einen sollte sich dann rein geometrisch die Lage der anderen ergeben.

Atwater und Molnar fanden jedoch deutliche Abweichungen zwischen dem derart errechneten und dem tatsächlichen Ort der Vulkaninseln. Eine Bewegung der Hotspots wäre die einfachste Erklärung dafür. Auch Joann Stock vom California Institute of Technology in Pasadena und ihre Kollegen, die das Verfahren seither verfeinert und erweitert haben, kamen im Wesentlichen zum selben Ergebnis. Prognosen für die Hawaii-Emperor-Kette mit Hilfe von Hotspots im Atlantik stimmen nur mit demjenigen Teil annähernd überein, der in den letzten 30 Millionen Jahren entstanden ist (siehe Kasten oben). Für weiter zurückliegende Zeiträume treten dagegen Abweichungen auf. Bei Inseln, die älter als 60 Millionen Jahre sind, ergeben sich sogar sehr große Diskrepanzen.

Viele Geologen ließen sich von diesen Untersuchungen allerdings nicht überzeugen. Sie erklärten die fehlende Übereinstimmung zwi-

schen den beiden Datensätzen mit anderen Effekten. Das pazifische und das atlantische Becken bestehen aus Platten, die an den antarktischen Kontinent grenzen. Der aber setzt sich seinerseits aus mindestens zwei Platten zusammen, die wie ineinandergreifende Zahnräder rotieren und so den geometrischen Zusammenhang zwischen den Hotspot-Spuren im Atlantik und im Pazifik stören können. Leider ist die geologische Geschichte der Antarktis großenteils unter dicken Eiskappen begraben und somit unbekannt – was eine komplette Rekonstruktion der Plattenbewegungen verhindert.

Die Streitfrage ließ sich also nur auf andere Weise beantworten: mit Gesteinsproben, deren Magnetismus ihren Entstehungsort verrät. Gemeinsam mit meinem Kollegen Rory Cottrell von der Universität Rochester (New York) nahm ich 1995 diese Herausforderung an. Wir begaben uns in das Archiv des internationalen Tiefseebohrprogramms ODP (*Ocean Drilling Program*) an der Texas A&M University in College Station und suchten unter den Sediment- und Vulkangesteinsbohrkernen, die über mehrere Jahrzehnte hinweg gezogen worden waren, geeignete Kandidaten für unsere Untersuchungen aus.

Am aussichtsreichsten schien uns einer, den Forscher 1992 aus einem 81 bis 75 Millionen Jahre alten Seamount der Emperor-Kette namens Detroit gewonnen hatten. Er bestand aus Basalt ähnlich demjenigen, der heute auf der Insel Hawaii neu entsteht. Die magnetischen Signale dieses Gesteinstyps sind am besten untersucht. Die Forscher hatten den Bohrkern zunächst kaum beachtet; ihnen erschien er zu kurz, um genügend akkurate Informationen über die magnetische Inklination zu enthalten.

Eine erneute Analyse widerlegte diese Einschätzung. Um die ursprüngliche Magnetisierung der Minerale festzustellen, mussten wir die Effekte der induzierten Magnetisierung und der spontanen Reorientierung magnetischer Domänen korrigieren. Deshalb untersuchten wir die Proben mit einem hochempfindlichen Magnetsensor, einem abgeschirmten supraleitenden Quanteninterferometer (Squid), und nahmen eine schrittweise Demagnetisierung vor. Wie sich herausstellte, war der Bohrkern gerade lang genug, um exakte Daten der magnetischen Inklination zu liefern. Damit konnten wir den Breitengrad, auf dem die Minerale auskristallisiert waren: 35 Grad Nord.

Schon 1980 hatte Masaru Kono von der Technischen Universität Tokio eine ähnliche Untersuchung durchgeführt. Er vermaß damals Proben vom Deep Sea Drilling Project,

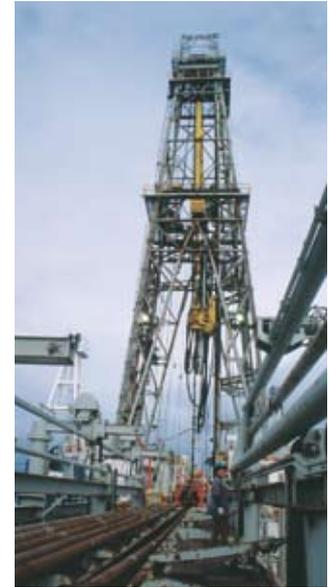
dem Vorgänger des ODP, die von dem 61 Millionen Jahre alten Suiko Seamount in der Emperor-Kette stammten. Dabei stellte sich heraus, dass dieser Vulkan bei 27 Grad nördlicher Breite entstanden war.

Weder dieses Ergebnis noch unser neueres passt zu einem ortsfesten Hotspot von Hawaii. Heute befindet sich der heiße Fleck bei 19 Grad Nord. Hätte er sich in den vergangenen 80 Millionen Jahren wirklich nicht bewegt, müssten sich die Seamounts Detroit und Suiko auch auf diesem Breitengrad gebildet haben. Die drei Werte differieren aber. Die Emperor Seamounts zeichnen somit den Weg eines wandernden Plumes nach.

So zwingend uns selbst dieser Schluss vor kam, ließen sich unsere Kollegen nicht beeindrucken. Immerhin konnten wir als Ergebnis Tausender von Labormessungen nichts als zwei lächerliche Punkte in einer Grafik vorweisen – zu wenig, um eine etablierte Theorie zu erschüttern.

### Der finale Beweis

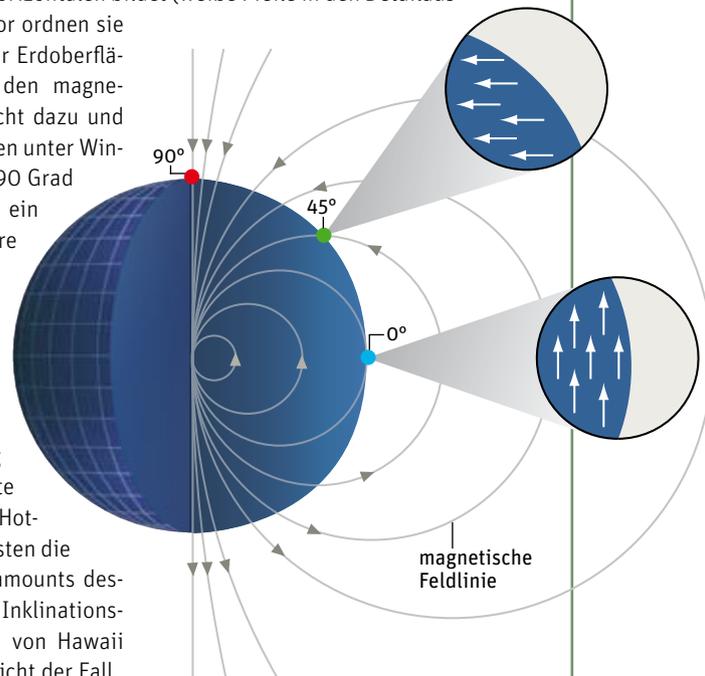
Ende 1997 begannen Cottrell und ich über neue, eigene Bohrungen in den Meeresgrund nachzudenken. Die Zielpunkte wählten wir gemeinsam mit David Scholl von der Universität Stanford (Kalifornien). Zudem luden wir Bernhard Steinberger, der in seiner Doktorarbeit an der Harvard-Universität in Cambridge



Von diesem Bohrturm an Deck der JOIDES Resolution wurde der Bohrstrang (Vordergrund) zum Meeresboden abgesenkt, mit dem der Autor und sein Team Gesteinsproben von Tiefseevulkanen gewannen.

## WAS DIE GESTEINSMAGNETISIERUNG VERRÄT

**Beim Erstarren von Lava** werden gewisse Minerale in demjenigen Winkel – fachsprachlich: Inklination – ausgerichtet, den das Erdmagnetfeld auf diesem Breitengrad mit der Horizontalen bildet (weiße Pfeile in den Detailausschnitten). Am Äquator ordnen sie sich daher parallel zur Erdoberfläche an (unten), an den magnetischen Polen senkrecht dazu und in den mittleren Breiten unter Winkeln zwischen 0 und 90 Grad (oben). Auch wenn ein Gestein in eine andere Breitenlage gelangt, behält es seine ursprüngliche magnetische Orientierung bei. Wäre die Hawaii-Emperor-Kette bei der Wanderung der Pazifischen Platte über einen ortsfesten Hotspot entstanden, müssten die Gesteine aus den Seamounts deshalb die gleichen Inklinationswerte wie diejenigen von Hawaii haben. Dies ist aber nicht der Fall.



(Massachusetts) die Strömungen im Erdmantel am Computer simuliert hatte, zur Teilnahme an dem Projekt ein. Und so stachen wir im Sommer 2001 auf der Joides Resolution, einem ODP-Bohrschiff, zu einer zweimonatigen Expedition mit Namen Leg 197 in See. Sie führte uns zu drei der Emperor Seamounts: Detroit, Nintoku und Koko.

Vor dem Bohren führten wir kurze seismische Sondierungen durch, um sicherzustellen, dass wir horizontal liegende Lavaschichten vorfinden würden. Damit eliminierten wir eine potenzielle Fehlerquelle. Bei der Analyse der erbohrten Proben half uns dann eine Gruppe von Experten: Robert Duncan von der Universität von Oregon in Portland, Thorvaldur Thordarson, damals an der Universität von Hawaii in Manoa, Frederick Frey vom Massachusetts Institute of Technology und Clive Neal von der Universität Notre Dame (Indiana).

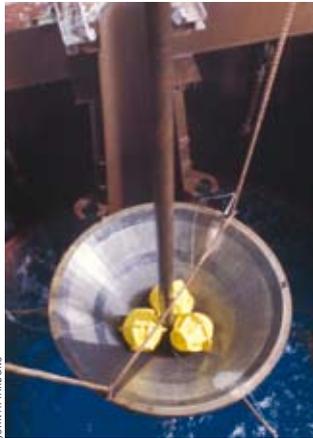
Um das Gesteinsalter zu ermitteln, bestimmten wir Mikrofossilien aus Sedimenten, die auf oder zwischen den Lavaschichten lagen. Die Magnetisierung des Gesteins maßen wir in einem eigenen Magnetismus-Labor an Bord des Schiffs. Die endgültigen Ergebnisse würden zwar noch monatelange Laborarbeiten an Land erfordern, darunter genaue geochronologische Untersuchungen anhand von Isotopen. Doch die Grundzüge standen schon fest, als wir in Yokohama von Bord gingen.

Demnach war der Hotspot ohne Zweifel mit hoher Geschwindigkeit nach Süden gewandert (Kasten unten). Vor 81 bis 47 Milli-

onen Jahren bewegte er sich nach unseren Abschätzungen um mehr als vier Zentimeter pro Jahr – also etwa genauso schnell wie tektonische Platten. Dieser Befund wurde dadurch untermauert, dass wir bei Detroit und Nintoku gar keine und bei Koko nur geringfügige Überreste von Korallen fanden. Wären diese ehemaligen Inseln auf der tropischen Breitenlage von Hawaii entstanden, sollte man erwarten, dass um sie herum Korallenriffe wuchsen.

Josep M. Parés und Ted C. Moore von der Universität von Michigan in Ann Arbor lieferten 2005 eine unabhängige Bestätigung unserer Ergebnisse, indem sie mit einem neuartigen Verfahren die Wanderung der Pazifischen Platte rekonstruierten. Dabei nutzten sie aus, dass die Sedimente am Meeresgrund in Äquatornähe ungewöhnlich viele Schalen von Kalkplankton enthalten, das dort besonders gut gedeiht. Anhand dieses Markers bestimmten Parés und Moore die Bewegung der ehemaligen Äquatorialregion im Pazifik in den vergangenen 53 Millionen Jahren. Diese Zone wanderte demnach nur um 2,5 Zentimeter im Jahr nach Norden – sehr viel langsamer, als wenn man ihre Geschwindigkeit relativ zu einem ortsfesten Hawaii-Hotspot ermittelt. Für den heißen Fleck bedeutet das, dass er sich um durchschnittlich 3,2 Zentimeter im Jahr nach Süden verlagert haben muss.

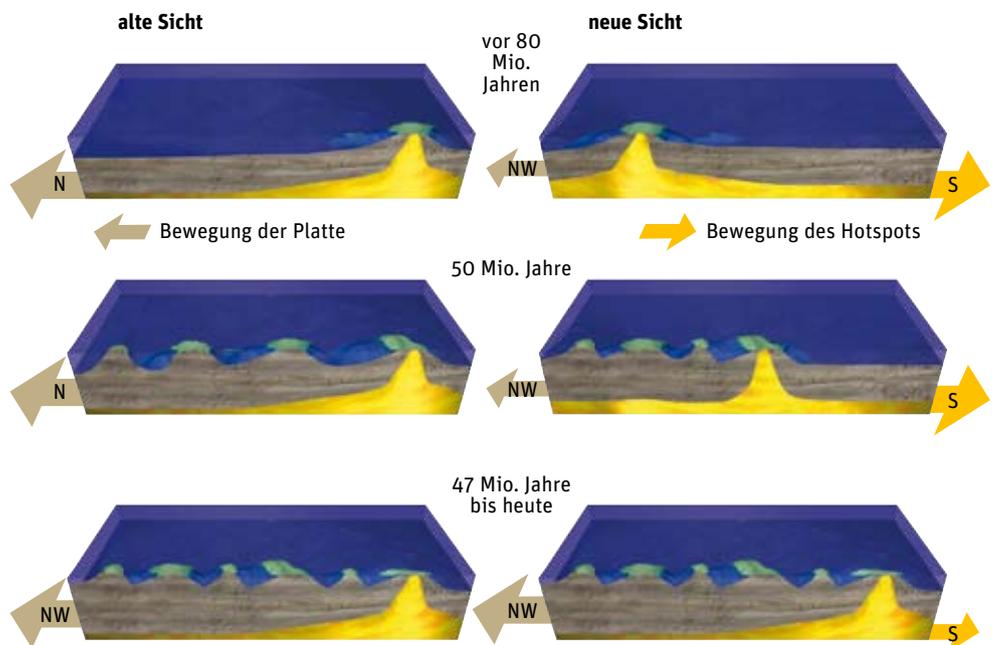
Diese Erkenntnis hat weit reichende Folgen – unter anderem für die Geschichte Nordamerikas. Schon lange weiß man, dass große Teile des amerikanischen Westens fremder Herkunft (allochthon) sind. Diese so genann-



Durch eine Vorrichtung namens »moon pool« (»Mondteich«) wurden vor jedem Wechsel des Bohrmeißels von der Joides Resolution »Hütchen« (gelb) an der Bohrlochöffnung platziert. Diese Markierungen halfen, die Bohrstelle anschließend wiederzufinden.

### WAS WIRKLICH GESCHAH

**Nach bisheriger Lehrmeinung** schuf ein ortsfester Hotspot die Hawaii-Emperor-Kette, als die Pazifische Platte über ihn hinwegglitt (links). Magnetische Untersuchungen ergaben jedoch, dass die Emperor Seamounts mit zunehmendem Alter bei immer höheren Breitengraden entstanden sind, beginnend mit Koko (etwa 22 Grad Nord) bis hin zu Detroit (35 Grad Nord). Demnach muss der Hotspot ebenfalls gewandert sein (rechts), und zwar in südlicher Richtung. Die Pfeilstärken symbolisieren Relativgeschwindigkeiten.



ten Terrane wurden durch Platten, die einst das Becken des Pazifischen Ozeans bildeten und inzwischen unter Nordamerika abgetaucht sind, an den Westrand des Kontinents geschoben (siehe Spektrum der Wissenschaft 1/1983, S. 66). Wechselwirkungen zwischen ozeanischen und kontinentalen Krustenblöcken sind auch für die Bildung größerer geologischer Strukturen wie der Rocky Mountains verantwortlich. Schätzungen über Art und Ausmaß dieser Interaktionen beruhten bisher auf der Annahme, Hawaii sei ein fester Referenzpunkt. Nachdem sich das als falsch erwiesen hat, müssen die Geologen ihre Vorstellungen darüber, wie und wann der Westen Nordamerikas entstand, noch einmal überdenken und sicher teilweise revidieren.

### Pole Positions

Global gesehen, berühren wandernde Hotspots auch die Frage, ob und wie stark sich die feste Erdschale relativ zur Rotationsachse unseres Planeten gedreht hat. Fachleute sprechen von Polwanderung. Das ist allerdings ein missverständlicher Ausdruck, weil er den Eindruck erweckt, der Pol selbst verschiebe sich. Tatsächlich nehmen sowohl die Rotations- als auch die Magnetachse der Erde bis auf eine leichte Taumelbewegung (Präzession), bedingt durch die Wechselwirkung mit den anderen Planeten, stets die gleiche Orientierung im absoluten Raum ein. Stattdessen wandern Landmassen und Meeresböden.

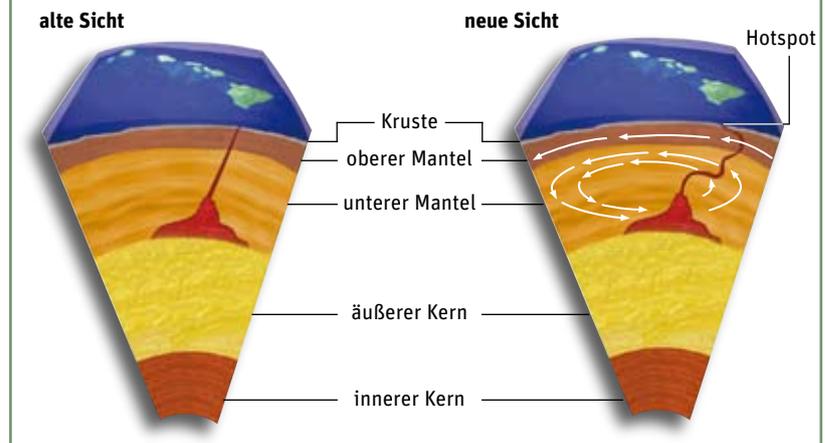
Durch die Kontinentalverschiebung kann es nämlich zu einer Ungleichverteilung der Massen auf der Erde kommen. Die Folge ist eine Unwucht wie bei einer einseitig beladenen Waschmaschine. Sie verursacht eine Drehung der gesamten Hülle des Globus, bis das Massengleichgewicht wiederhergestellt ist. Im Extremfall könnte so etwa Florida am Nordpol landen oder Grönland zur Tropeninsel werden. Dieser Vorgang unterscheidet sich von der Plattentektonik, weil die relative Anordnung der Krustenblöcke dabei unverändert bleibt.

Auf der Basis ortsfester Hotspots rekonstruierten Geologen in den 1980er Jahren Plattenbewegungen und bestimmten die ehemaligen Positionen der Pole. Demnach sollte sich die Stelle, an der die Erdachse aus dem Globus ragt, in den letzten 130 Millionen Jahren um bis zu 20 Grad gedreht haben. Unsere Funde widersprechen dem: Statt des Pols sind nur die Hotspots gewandert.

Die gravierendsten Konsequenzen hat die Beweglichkeit von Hotspots jedoch für den Erdmantel. Dass die Plumes tief unten aus ihm aufsteigen, scheint zwar weiterhin denkbar. Doch ihre Quellregion müsste umherwandern oder die aufsteigende Magmasäule durch

## VOM WINDE (DES ERDMANTELS) VERWEHT

**Nach der Entdeckung**, dass Hotspots wandern, stellt sich die Frage nach ihrer Natur neu. Gemäß der alten Vorstellung (links) handelt es sich um die Spitzen von aufsteigenden Magmasäulen (Plumes), die nahe der Grenze zwischen dem flüssigen äußeren Erdkern und dem darüberliegenden, viskosen Erdmantel entspringen und ihre Position relativ zum tiefen Erdinneren beibehalten. Nach neuer Sicht (rechts) werden sie durch Konvektionsströmungen im Erdmantel abgelenkt. Möglicherweise wandert aber auch die Quelle des Plumes selbst.



Fließvorgänge im Mantel verbogen werden (siehe Kasten oben).

Das Konzept der Plumes steht jedenfalls auf dem Prüfstand. Am radikalsten stellt es Don Anderson vom California Institute of Technology in Frage. Seiner Ansicht nach entspringen die Plumes nicht an der Grenze zum Erdkern, sondern wurzeln im oberen Mantel oder sogar in der unteren Kruste. Möglicherweise kommen sie auch in allen Formen und Größen vor und reichen unterschiedlich weit ins Erdinnere hinab.

Die Grundfesten der modernen Geologie bringen unsere Erkenntnisse über die Mobilität der Hotspots trotz allem nicht ins Wanken. Ein komplettes Weltbild stürzt in der Wissenschaft nur selten ein. Wie die bemerkenswerte Altersprogression und das enorme Volumen des an der Hawaii-Emperor-Kette emporgestiegenen Magmas zeigen, kommt Hawaii dem idealen Hotspot, wie er Wilson und Morgan vorschwebte, immer noch sehr nahe. Nur ist er eben nicht fest im unteren Mantel verankert, sondern unerwartet mobil.

Ein einfaches Bild weicht also einem komplizierteren: Platten und Hotspots wandern gleichermaßen und wir sehen den kombinierten Effekt beider Vorgänge. Ihren jeweiligen Anteil zu bestimmen ist die neue Herausforderung für Geologen und Geophysiker. Bislang wurde die Unruhe im Erdmantel unterschätzt. Unsere Ergebnisse zeigen: Sie verdient größere Beachtung.



**John A. Tarduno** ist Professor für Erd- und Umweltwissenschaften sowie für Physik und Astronomie an der Universität Rochester (New York). Dort hat er das Paläomagnetiklabor gegründet.

New evidence for the Hawaiian hot-spot plume motion since the Eocene. Von Josep M. Parés und Ted C. Moore in: Earth and Planetary Science Letters, Bd. 237, S. 951, 2005

The Emperor Seamounts: Southward motion of the Hawaiian hot-spot plume in earth's mantle. Von John A. Tarduno in: Science, Bd. 301, S. 1064, 22. 8. 2003

Geophysics – hotspots come unstuck. Von Joann Stock in: Science, Bd. 301, S. 1064, 22. 8. 2003

Fixed hotspots gone with the wind. Von Ulrich Christensen in: Nature, Bd. 391, S. 739, 26. 2. 1998

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/936497](http://www.spektrum.de/artikel/936497).

**1958**

## Radioaktiver Mensch

»Jedes Lebewesen hat regelmäßig einige radioaktive Elemente als Bausteine und weist daher eine gewisse, wenn auch sehr geringe Radioaktivität auf. Die vom Menschen normalerweise ausgehende Gamma-Strahlung be-

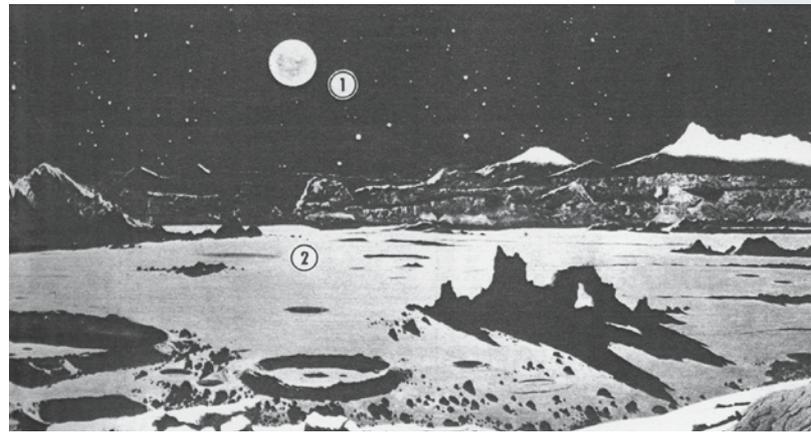
trägt rund  $10^{-10}$  C je kg Körpergewicht. Die beiden wichtigsten normalen radioaktiven Bausteine sind  $K^{40}$  und  $C^{14}$ . ... Als drittes radioaktives Element kommt noch das Radium hinzu, da mit dem Trinkwasser regelmäßig Radium aufgenommen und im Skelett gespeichert wird. ... Die Strahlenbelastung des Menschen auf Grund der natürlichen Eigenradioaktivität ist außerordentlich gering.« *Naturwissenschaftliche Rundschau*, 11. Jg., Heft 2, S. 60, Februar 1958

## Einschienebahn in Köln

»Ende Juli des vergangenen Jahres wurde die erste Alweg-Bahn (finanziert von Axel Lennart Wenner-Gren) in Originalgröße auf einer 1,8 km langen Strecke auf dem Versuchsfeld bei Köln in Betrieb genommen. ... Die windschnittig gebauten Alweg-Wagen ›reiten‹ gewissermaßen mit Gummirädern auf dem Betonbalken: die oberen Zwillingreifen nehmen das Transportgewicht auf und übertragen die Antriebskräfte, während je zwei Seitenräder der Führung und Balance dienen. ... Die Versuchsfahrten in Köln-Fühlingsen haben eine ganze Reihe technischer Fragen praktisch geklärt.« *Westermanns Monatshefte*, 99. Jg. Nr. 2, S. 74, Februar 1958

## Auf zum Mond!

»Die Expedition zum Mond ist Wernher von Brauns kühner Traum – trotz V 1 und 2, trotz Jupiter-C-Rakete. ... Sein großer Plan ist schon bis ins kleinste vorbereitet: Brauns Mondrakete würde im ebenen Feld eines Kraters landen. Im fahlblauen Licht der Erde (1, unten) zeigt sich den Wissenschaftlern eine staubtrockene Wüste aus zerfallenem Lavagestein (2), unter deren erstarrten Felsen große Bodenschätze an wertvollen Mineralien vermutet werden. Doch auch diese Weltraum-Expedition wäre für Wernher von Braun nur ein Sprungbrett zu noch größeren Abenteuern der Menschheit: Seine bisherigen Erfolge ermutigen ihn, auch die Fahrt zu anderen Planeten unseres Sonnensystems zu planen.« *Quick*, 11. Jg., Nr. 7, S. 12, 15.2. 1958



Geplanter Landeplatz auf dem Mond

**1908**



Ein Mantel hindert die Ziege, ihren Euter auszusaugen.

## Eutermantel für Ziegen

»Der Ziege ... haftet leider eine Unart an, die bei dem Schaf seines gedrungenen Körperbaues wegen unmöglich ist – ›das Selbstaussaugen der Milch‹. ... In der landwirtschaftlichen Versuchsstation in Hohenheim hat deshalb Dr. Carl Beger ... den Eutermantel als die durchgreifendste Abhilfe gegen die geschilderten Mißstände befunden ... Er liegt glatt aber bequem über Brust und Euter. Hals und Hinterteil bleiben frei; um das hintere Euter ist der Stoff sackartig ein wenig eingezogen und durch eine Schnur resp. ein kleines Gummiband der Form angepaßt, so daß Kot und Harn sich möglichst wenig darin verfangen können.« *Die Umschau*, 12. Jg., Nr. 5, S. 95, 1. Februar 1908

## Ein neues chemisches Element

»G. Urbain, der als Nachfolger des verstorbenen Professors Moissan von der Pariser Chemischen Gesellschaft in den internationalen Atomgewichtsausschuß gewählt worden ist, veröffentlicht die Spaltung des bisher als Element angesehenen Stoffes ›Ytterbium‹ in ein neues Element, Lutetium, und in ein anderes, das den Namen Ytterbium beibehalten soll.« *Beilage zur Allgemeinen Zeitung*, Nr. 18, S. 144, 5.2. 1908

## Unter Wasser durch Boston

»Vor kurzem ist endlich ein Tiefseetunnel fertiggestellt, der erste der Erde. Mit diesem technischen Wunder kann sich die berühmte nordamerikanische Großstadt Boston brüsten. ... Die Ausführung dieses hervorragenden Ingenieurkunstwerks dauerte  $4\frac{3}{4}$  Jahre und kostete 3 300 000 Doll. Seine Länge beträgt rund 2,4 km, die Breite 7 m, die Höhe über 5 m. Zweigleisig angelegt, befindet sich der Tunnel an seinem tiefsten Punkt ca. 25 m unter dem durchschnittlichen Wassertiefstand. ... Aus Konkret erbaut, besitzt der Tunnel ein vollständiges Blocksignalsystem, Telegraphen- und Fernsprechleitungsrohren und längs der Mitte der gewölbten Decke einen großen Ventilationskanal. An den niedrigsten Punkten sorgen selbsttätige Pumpen für vollkommene Entwässerung.« *Himmel und Erde*, 20. Jg., Heft 2, S. 92, Februar 1908

# TRIUMPH DES EDELMUTS

Wie ist der »romantische Abend zu zweit« verlaufen? Hier kommt die Auswertung des wirtschaftswissenschaftlichen Experiments, zu dem wir in der vergangenen Juliausgabe mit einem Preisausschreiben aufgerufen haben.

Von Miguel Costa-Gomes,  
Vincent Crawford und Rosemarie Nagel

**W**ir hatten Sie in unserem Preisausschreiben (Spektrum der Wissenschaft 7/2007, S. 96) gebeten, sich auf ein unbekanntes Spiel einzulassen. Eingekleidet in die Geschichte einer Verabredung mit einer reizvollen Person, bestand die Aufgabe darin, durch Wählen einer Zahl in einem gewissen Intervall eine möglichst hohe Punktzahl zu erreichen. Dieselbe Aufgabe stellt sich auch dem Spielpartner, den man nicht kennt und mit dem man sich nicht verständigen kann. Die Punktzahl, die jeder Spieler erhält, hängt nicht nur von der eigenen Wahl, sondern auch von der des Partners ab.

Ein Spieler – nennen wir ihn Alex – muss also versuchen, die Zahl, die seine unbekannt Partnerin wählen wird, möglichst genau einzuschätzen. Dabei wird er berücksichtigen, dass diese – die im Folgenden Bianca heißen soll – ihrerseits eine hohe Punktzahl erzielen will und zu diesem Zweck versucht, Alex' Zahl vorherzusagen.

Diese Situation ist genau das, was die Spieltheorie ein »Spiel« nennt. Durch die romantische Rahmenhandlung wollten wir klarmachen, dass es nicht darum geht, besser abzuschneiden als der Partner oder auf dessen Kosten einen Vorteil zu ergattern. Jeder sollte nur daran interessiert sein, seine Punktzahl zu maximieren.

Wie verhalten sich Menschen, wenn sie das Verhalten ihres unbekannt Partners abzuschätzen haben und ihnen keine anderen Anhaltspunkte zur Verfügung stehen als die Spielregeln selbst? Das ist insbesondere dann der Fall, wenn die Situation so neu ist, dass es ein »übliches« oder »zu erwartendes« Verhalten nicht gibt. Solche Fragen untersuchen wir in unseren Experimenten, deren jüngstes das hier zu besprechende »Spektrum«-Preisausschreiben ist.

Die Spieltheorie bietet ein Standardverfahren zur Entscheidungsfindung an, die so genannte iterierte Elimination dominierter Strategien (Kasten S. 78). Einer der Spieler, sagen wir Alex, stellt fest, dass er gewisse verfügbare Spielzüge von vornherein ausschließen (»eliminieren«) kann, weil sie, einerlei was Bianca sagt, ungünstiger sind als andere (von diesen anderen »dominiert werden«). Bianca vollzieht diese Elimination gedanklich nach, und beide denken über ein entsprechend reduziertes Spiel nach.

Nun stellen sich möglicherweise für Bianca gewisse Strategien als dominiert heraus; es ergibt sich ein abermals reduziertes Spiel, in dem vielleicht wieder Alex dominierte Strategien vorfindet, und so weiter.

Am Ende bleibt möglicherweise beiden Spielern nur noch eine Option übrig. Das ist dann ein so genanntes »Nash-Gleichgewicht« oder einfach »Gleichgewicht«, benannt nach John Nash, der für seine Forschung über diese und andere Fragen 1994 (zusammen mit John Harsanyi und Reinhard Selten) den Nobelpreis für Wirtschaftswissenschaften erhielt. Ein Nash-Gleichgewicht ist ein Punkt, an dem keiner der Spieler seine Situation durch einseitige Änderung seiner Strategie verbessern kann.

Ein Spiel kann mehrere Gleichgewichte haben. In unseren 16 Spielen gibt es allerdings jeweils nur ein einziges; man findet es durch Elimination dominierter Strategien in 2 bis 23 Schritten.

Ein Beispiel: In Szenario 14 ist das (einzige) Nash-Gleichgewicht  $(a, b) = (150, 300)$ . Das kann man direkt überprüfen: Wenn Alex davon ausgeht, dass Bianca 300 spielt, kann er nichts Besseres tun, als 150 zu wählen, denn das macht seinen Abweichungswert  $d = a - v_a b = 150 - 0,5 \cdot 300$  zu null und bringt ihm die vollen 300 Punkte. Wenn andererseits Bianca erwartet, dass Alex 150 spielt, wäre  $0,7 \cdot 150 = 105$  ihr optimaler Zug, aber das liegt unterhalb ihrer unteren Grenze. Die beste Nähe-



AMIR KALIKOVIC / FOTOLIA

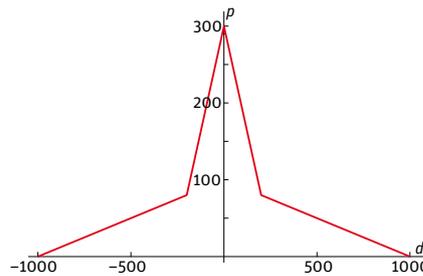


FRANZ PELEGGI / FOTOLIA

## DIE SZENARIEN

**Wir hatten die Teilnehmer** unseres Preisausschreibens gebeten, sich in den folgenden 16 Situationen in die Rolle des ersten Spielers zu versetzen, den wir diesmal willkürlich Alex nennen. Aber die Sache ist geschlechtsneutral, denn zu jedem Szenario gibt es das »spiegelbildliche« Szenario mit vertauschten Rollen. So ist zum Beispiel Szenario 14 das Spiegelbild von Szenario 10. Dadurch konnten wir untersuchen, wie Menschen ein Entscheidungsproblem aus verschiedenen Perspektiven wahrnehmen. Jeder Teilnehmer hatte also in acht verschiedenen Situationen einmal Alex und einmal Bianca zu spielen.

Alex hatte sich für eine Zahl  $a$  (den »Beitrag zum Abendessen«) zu entscheiden, die zwischen einer unteren und einer oberen Grenze liegen musste. Ebenso hatte Bianca eine Zahl  $b$  zu wählen; aber ihre Grenzen waren andere als die von Alex. Für Alex kam es darauf an, dass das Verhältnis  $a/b$  der beiden Beiträge einem vorgegebenen Wert  $v_a$  möglichst nahekam: Je näher der Wert  $d = a - v_a b$  an null lag, desto mehr Punkte bekam er (siehe Grafik links). Im Idealfall  $d = 0$  gab es 300 Punkte. Entsprechend war es in Biancas Interesse, mit dem Verhältnis  $b/a$  möglichst genau den für sie vorgegebenen Wert  $v_b$  zu treffen. Ihre Punkteauszahlung war umso größer, je näher der Betrag von  $b - v_b a$  der Null kam.



Die so genannte **Auszahlungsfunktion**  $p = \max(0, 200 - d) + \max(0, 100 - d/10)$  bestimmt, wie die Abweichung  $d$  vom Idealwert in eine Punktzahl  $p$  umzurechnen ist. Mit zunehmender Abweichung vom Ideal fällt  $p$  zunächst steil, dann flacher ab.

Für jedes der 16 Szenarien galten unterschiedliche Grenzen und  $v$ -Werte.

Die Teilnehmer unseres Preisausschreibens gebeten, sich in den folgenden 16 Situationen in die Rolle des ersten Spielers zu versetzen, den wir diesmal willkürlich Alex nennen. Aber die Sache ist geschlechtsneutral, denn zu jedem Szenario gibt es das »spiegelbildliche« Szenario mit vertauschten Rollen. So ist zum Beispiel Szenario 14 das Spiegelbild von Szenario 10. Dadurch konnten wir untersuchen, wie Menschen ein Entscheidungsproblem aus verschiedenen Perspektiven wahrnehmen. Jeder Teilnehmer hatte also in acht verschiedenen Situationen einmal Alex und einmal Bianca zu spielen.

Alex hatte sich für eine Zahl  $a$  (den »Beitrag zum Abendessen«) zu entscheiden, die zwischen einer unteren und einer oberen Grenze liegen musste. Ebenso hatte Bianca eine Zahl  $b$  zu wählen; aber ihre Grenzen waren andere als die von Alex. Für Alex kam es darauf an, dass das Verhältnis  $a/b$  der beiden Beiträge einem vorgegebenen Wert  $v_a$  möglichst nahekam: Je näher der Wert  $d = a - v_a b$  an null lag, desto mehr Punkte bekam er (siehe Grafik links). Im Idealfall  $d = 0$  gab es 300 Punkte. Entsprechend war es in Biancas Interesse, mit dem Verhältnis  $b/a$  möglichst genau den für sie vorgegebenen Wert  $v_b$  zu treffen. Ihre Punkteauszahlung war umso größer, je näher der Betrag von  $b - v_b a$  der Null kam.

### Die Tücken des Nash-Gleichgewichts

Auch die Teilnehmer unseres Preisausschreibens haben zahlreiche Alternativen zur Gleichgewichtsstrategie erwogen. Eine davon ist die folgende: Alex denkt nicht besonders intensiv darüber nach, was Bianca tun wird. Vielmehr unterstellt er – in Ermangelung einer besseren Theorie –, dass sie jede der ihr zur Verfügung stehenden Zahlen mit gleicher Wahrscheinlichkeit ansagt, und wählt seinen Beitrag so, dass er unter dieser Annahme optimal ist. Bei der einfachen Struktur unserer Auszahlungsfunktion ist das äquivalent der Annahme, dass Bianca genau die Mitte des ihr zur Verfügung stehenden Intervalls wählt. In unserem Beispielszenario 14 würde Alex annehmen, dass Bianca 400 sagt, und daraufhin 200 (=  $0,5 \cdot 400$ ) wählen. Bianca dagegen würde von Alex die Ansage 500 erwarten und die unter dieser Voraussetzung für sie optimale Wahl 350 (=  $0,7 \cdot 500$ ) treffen.

Bemerkenswerterweise schränkt Alex sich dadurch stärker ein als mit dem oben genannten Eliminationsverfahren. Dieses würde ihm nach einem Schritt immerhin noch alle Werte zwischen 150 und 250 offenlassen, statt ihn auf den Wert 200 festzulegen.

Wir nennen dieses Verfahren L1 (L wie *level*), weil es genau einem Denkschritt in einer

Szenario Nr.	spiegelb. Szenario	ALEX			BIANCA		
		untere Grenze	obere Grenze	$v_a$	untere Grenze	obere Grenze	$v_b$
1	8	100	900	1,5	300	500	0,7
2	9	300	900	1,5	300	500	0,4
3	12	100	500	1,1	300	900	1,2
4	13	300	500	1,4	300	900	0,8
5	7	100	900	1,1	100	500	1,3
6	15	100	500	0,7	100	900	0,5
7	5	100	500	1,3	100	900	1,1
8	1	300	500	0,7	100	900	1,5
9	2	300	500	0,4	300	900	1,5
10	14	300	500	0,7	100	900	0,5
11	16	100	500	1,5	100	900	0,5
12	3	300	900	1,2	100	500	1,1
13	4	300	900	0,8	300	500	1,4
14	10	100	900	0,5	300	500	0,7
15	6	100	900	0,5	100	500	0,7
16	11	100	900	0,5	100	500	1,5

ALLE GRAFIKEN DES ARTIKELS: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: M. COSTA-GOMES, V. CRAWFORD UND R. NAGEL

WEGE ZUM NASH-GLEICHGEWICHT

STRATEGIEN

- ▶ **Gleichgewicht:** Wähle den Spielzug, der dem Nash-Gleichgewicht entspricht
- ▶ **L1:** Optimierte unter der Annahme, dass der Partner den Mittelwert seines Intervalls wählt
- ▶ **L2:** Optimierte unter der Annahme, dass der Partner L1 spielt
- ▶ **D1:** Optimierte unter der Annahme, dass der Partner einen Eliminationsschritt vollzieht und den Mittelwert des verbleibenden Intervalls wählt
- ▶ **D2:** wie D1, mit zwei Eliminationsschritten
- ▶ **Allwissend:** Wisse, wie der Partner sich im Erwartungswert verhalten wird, und optimiere daraufhin
- ▶ **MaxSum:** Maximiere die Summe aus eigener Punktzahl und der des Partners
- ▶ **MaxMin:** Maximiere die kleinere der beiden Punktzahlen

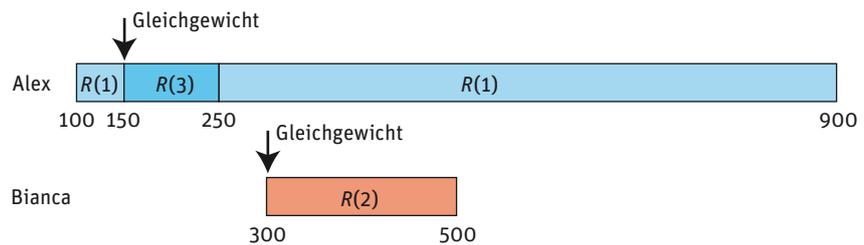
**Alex spielt Szenario 14 mit Bianca** (für die dasselbe Spiel als Szenario 10 erscheint). Wählt er  $a = 250$ , so kommt er auf eine Abweichung  $a - v_a b = 250 - 0,5b$  zwischen 0 (für  $b = 500$ ) und 100 (für  $b = 300$ ). Für jede Wahl oberhalb von 250 kann, einerlei was Bianca wählt, die Abweichung nur größer und entsprechend Alex' Punktzahl nur kleiner werden. Also ist für Alex jede Wahl oberhalb von 250 durch die Wahl 250 dominiert. Eine ähnliche Rechnung zeigt, dass die Wahl 150 alle Strategien unterhalb von 150 dominiert, das heißt, durch Abweichen nach unten von 150 kann sich Alex nur verschlechtern, unabhängig von Biancas Wahl.

Im ersten Eliminationsschritt wird also das Spiel reduziert, indem die Menge  $R(1)$  der do-

minierten Strategien aus den für Alex verfügbaren Strategien gestrichen wird.

Bianca hat im ursprünglichen Spiel keine dominierten Strategien und entsprechend nichts zu reduzieren, wohl aber nach dem ersten Eliminationsschritt. Nachdem nämlich für Alex nur noch Wahlen zwischen 150 und 250 in Frage kommen, ist für sie jede Strategie oberhalb von 300 ungünstiger als 300 selbst. Sie streicht daher aus der Menge ihrer Strategien das ganze Intervall  $R(2)$  und behält als einzige Option den Punkt 300 selbst übrig.

Unter dieser Voraussetzung ist für Alex wiederum 150 die unzweifelhaft beste Wahl; er streicht also das Intervall  $R(3)$ . Damit sind beide Spieler bei dem Nash-Gleichgewicht (150, 300) angelangt.



Folge entspricht. Einen Schritt weiter zu gehen heißt anzunehmen, dass der Partner seinen Beitrag nach der Regel L1 bestimmt, und daraufhin den eigenen Beitrag zu wählen. Dieses Verfahren haben wir mit L2 bezeichnet.

In den genannten Beispiel kommt Alex als L2-Spieler zu dem Schluss, dass die L1-Spielerin Bianca 350 sagen wird, und wählt daraufhin 175 ( $= 0,5 \cdot 350$ ). Bianca als L2-Spielerin dagegen erwartet von Alex, den sie für einen L1-Spieler hält, die Ansage 200 und würde gerne darauf mit 140 ( $= 0,7 \cdot 200$ ) antworten; da das aber unterhalb ihrer unteren Grenze liegt, wählt sie die beste ihr mögliche Näherung, nämlich 300.

Strategien mit einer höheren Anzahl an Denkschritten sind denkbar. So würde ein L3-Spieler annehmen, dass sein Partner L2 spielt, und so weiter. Aber anscheinend gibt es keinen guten Grund, ausgerechnet nach dem dritten Schritt mit Denken aufzuhören. Jedenfalls haben wir unter unseren Einsendern keinen Vertreter einer Strategie L3 (oder mit höheren Nummern) vorgefunden.

Es gab allerdings eine Art »gemischtes« Denken. Man vollzieht einen oder zwei Schritte der Elimination dominierter Strategien, wodurch sich – möglicherweise – das für

den Partner in Frage kommende Intervall verkleinert, nimmt dann an, dass der Partner den Mittelwert dieses reduzierten Intervalls nimmt (oder, was auf dasselbe hinausläuft, irgendeine Zahl aus diesem Intervall, wobei alle Zahlen gleich wahrscheinlich sind), und wählt dann den zu diesem Mittelwert optimalen Beitrag. Wir nennen diese Strategien D1 und D2 je nach der Anzahl der Eliminationsschritte.

In unserem Beispielszenario ist für Alex die Strategie D1 nicht von L1 zu unterscheiden, denn im ersten Eliminationsschritt ändert sich nichts an Biancas Intervall. Bianca dagegen berücksichtigt als D1-Spielerin, dass Alex' Intervall im ersten Schritt auf  $[150, 250]$  zusammenschmilzt, rechnet mit dem Mittelwert dieses Intervalls von 200 und wählt daher – wie oben als L2-Spielerin – 300 statt der eigentlich optimalen 140.

Als D2-Spieler glaubt Alex, dass Bianca in zwei Eliminationsschritten ihr Intervall schon auf den Punkt 300 reduziert hat, und wählt entsprechend 150. Biancas D2-Strategie dagegen ist identisch mit ihrer D1-Strategie, weil sich an Alex' Intervall im zweiten Eliminationsschritt nichts ändert.

Zusätzlich zu den bisher genannten Strategien – Gleichgewicht, L1, L2, D1 und D2 –

ist es hilfreich, eine weitere zu betrachten, die wir allwissend (*sophisticated*) nennen. Ein allwissender Spieler verfolgt nach den klassischen Regeln der Spieltheorie nur seinen eigenen Vorteil; vor allem aber kann er, woher auch immer, in jeder Situation das Verhalten seines Partners vorhersagen und wählt die entsprechend optimale Strategie. Wenn er, wie die Teilnehmer unseres Preisausschreibens, mit einer Vielzahl unbekannter Partner konfrontiert ist, kann er zumindest den Erwartungswert ihrer Ansagen berechnen und sich entsprechend verhalten.

**Passt die Praxis zur Theorie?**

Wenn alle anderen Spieler Gleichgewicht spielen würden – was nicht der Fall ist –, wäre die allwissende Strategie identisch mit der Gleichgewichtsstrategie. Aus den Einsendungen unseres Preisausschreibens kann man eine allwissende Strategie herleiten (die dann zumindest gegenüber einem durchschnittlichen Teilnehmer des Preisausschreibens optimal wäre). Im Beispielszenario 14 wäre das 162 (statt der Gleichgewichtsstrategie 150) für Alex, während Bianca auch bei Allwissenheit nichts Besseres als 300 wählen kann.

So weit die theoretischen Vorüberlegungen. Die Auswertung des Experiments ergab zunächst, dass die Teilnehmer die – nicht ein-

fachen – Spielregeln weit gehend richtig verstanden und sich ihre Antworten sorgfältig überlegt haben. Anders ist nicht zu erklären, dass ihre Antworten sich bei den Zahlenwerten häufen, die den genannten Strategien entsprechen (Grafik S. 80). Etliche Teilnehmer haben auch in ihren Kommentaren ausdrücklich erklärt, welche Strategie sie verfolgten.

Wo Kommentare fehlten, konnten wir Strategien erschließen – nicht aus einzelnen Antworten, denn im Einzelfall kommen häufig verschiedene Strategien zum selben Ergebnis. Wenn jedoch die Antwort eines Teilnehmers in allen oder fast allen Szenarien mit der einer bestimmten Strategie übereinstimmt, kann man zuverlässig davon ausgehen, dass er diese Strategie – mehr oder weniger explizit – im Sinn hatte.

Wir haben daher ausgezählt, wie oft der Beitrag eines Teilnehmers zur Vorhersage einer Strategie passt, und ihm diejenige Strategie zugeschrieben, die in mehr Fällen mit seinen Antworten übereinstimmt als jede andere.

Nach dieser Auszählung haben – vermutlich – 17 Teilnehmer die Strategie Gleichgewicht angewandt. Es folgen sieben Anhänger von D2, je zwei von L1 und L2, einer von D1 und eine »Allwissende« namens Katja Felke. Sie schickte uns auch einen der längsten Kommentare:

**In Kürze**

- ▶ Die Teilnehmer des Preisausschreibens waren aufgerufen, 16 Spiele im Sinn der Spieltheorie mit unbekanntem Partnern zu spielen.
- ▶ Die Regeln der Spiele waren neu und erlaubten keinen Rückgriff auf vergleichbare Erfahrungen. Es gab auch keine offensichtlich optimale Strategie.
- ▶ Das Ergebnis ist überraschend: Vermutlich folgte ein Drittel der Teilnehmer einer der üblichen Strategien, ein weiteres Drittel war nicht zu klassifizieren; aber ein Drittel praktizierte eine edelmütige Strategie: Bewerte den Vorteil deines Partners genauso hoch wie deinen eigenen.

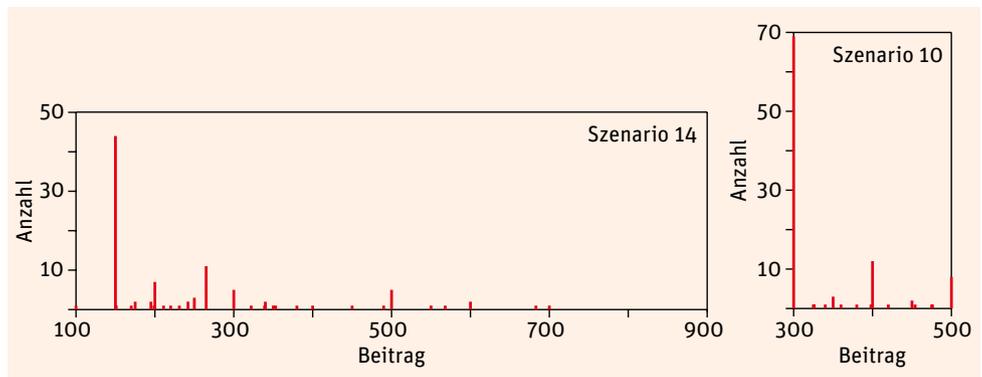
**DIE GEWINNER UND IHRE SPIELE**

Unter den 104 Einsendungen zum Preisausschreiben zogen wir per Zufall sechs Gewinner. Außerdem wählten wir, ebenfalls per Zufall, fünf aus den 16 Szenarien aus und ließen jeden Gewinner mit jedem anderen eins dieser Szenarien spielen – was nichts weiter heißt, als dass wir die Punkte ausrechneten, die beide Spieler in dieser Paarung erzielt hätten. Diese Punktzahlen wurden dann addiert und – 50 Cent pro Punkt – den Gewinnern ausgezahlt.

Die Tabelle führt auf, wer welches Spiel mit wem spielte und wie viele Punkte er dabei erzielte. Beispiel (Zeile »Martin Schmidt«, Spalte »Szenario 2«): Martin Schmidt hatte für Szenario 2 den Beitrag 450 gewählt und spielte mit Paul von der Heyde. Der hatte im spiegelbildlichen Szenario 9 den Beitrag 300 gewählt. Für Martin Schmidt ergibt sich aus dieser Kombination  $d = a - v_p \cdot b = 450 - 1,5 \cdot 300 = 0$ , ein »Volltreffer«, der ihm 300 Punkte einbringt.

	Szenario										Summe
	2		4		6		13		16		
<b>Martin Schmidt</b>	450; <b>300</b>	PH: 300	420; <b>300</b>	AH: 300	100; <b>267</b>	RR: 100	300; <b>225</b>	AT: 460	100; <b>240</b>	JS: 308	<b>1332</b>
<b>Joachim Semmrich</b>	562,8; <b>175</b>	RR: 300	500; <b>283</b>	AT: 368	164; <b>196</b>	AH: 100	334,8; <b>228</b>	PH: 500	164; <b>202</b>	MS: 150	<b>1084</b>
<b>Alexander Thaller</b>	495; <b>250</b>	AH: 300	460; <b>290</b>	JS: 334,8	188; <b>194</b>	PH: 132,09	368; <b>264</b>	MS: 420	216; <b>150</b>	RR: 160	<b>1148</b>
<b>Ralf Renz</b>	491,38; <b>254</b>	JS: 300	402,44; <b>224</b>	PH: 336,8	100; <b>267</b>	MS: 100	300; <b>260</b>	AH: 420	100; <b>265</b>	AT: 263	<b>1270</b>
<b>Axel Hoff</b>	450; <b>250</b>	AT: 330	420; <b>300</b>	MS: 300	100; <b>292</b>	JS: 152,8	300; <b>275</b>	RR: 402,44	100; <b>240</b>	PH: 154,24	<b>1357</b>
<b>Paul von der Heyde</b>	559,21; <b>179</b>	MS: 300	500; <b>212</b>	RR: 300	161,69; <b>197</b>	AT: 364	336,8; <b>230</b>	JS: 500	154,24; <b>212</b>	AH: 150	<b>1030</b>

Die von den Teilnehmern gewählten Beiträge in den Beispielszenarien 14 und 10 waren, wie auch in den anderen Szenarien, offensichtlich nicht vom Zufall, sondern von Überlegungen bestimmt, die jeweils mehreren Teilnehmern gemeinsam waren. So wählten 69 Teilnehmer in Szenario 10 den Beitrag 300.



**Miguel Costa-Gomes, Vincent Crawford** (rechts) und **Rosemarie Nagel** arbeiten zusammen an der Klärung der Frage, welche Überlegungen das Verhalten der Menschen in wirtschaftlichen Dingen bestimmen (*behavioral economics*). Vincent Crawford hat am Massachusetts Institute of Technology (MIT) promoviert und ist Professor an der Universität von Kalifornien in San Diego. Miguel Costa-Gomes hat bei Crawford in San Diego promoviert und ist seit Anfang dieses Jahres Professor für Wirtschaftswissenschaften an der Universität Aberdeen (Schottland). Sein Spezialgebiet ist strategisches Denken. Rosemarie Nagel hat in Bonn bei Reinhard Selten promoviert und ist Professorin an der Universität Pompeu Fabra in Barcelona. Zurzeit untersucht sie insbesondere das Zusammenspiel zwischen Gehirnaktivität und Verhalten in spieltheoretischen Experimenten (*neuroeconomics*).

Cognition and behavior in two-person guessing games: an experimental study. Von Miguel A. Costa-Gomes und Vincent P. Crawford in: *American Economic Review*, Bd. 96, S. 1737, 2006

How real people think in strategic games. Von Sara Robinson in: *SIAM News*, Bd. 37, Heft 1, Januar/Februar 2004

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/936498](http://www.spektrum.de/artikel/936498).

»Ich bin in mehreren Schritten vorgegangen. Zuerst habe ich mittels einer Monte-Carlo-Simulation die Kombination gesucht, welche gemeinsam die höchste Auszahlung hatte. Im zweiten Schritt habe ich geschaut, ob in dieser Kombination die Punkte »relativ« gerecht verteilt waren ... Dann habe ich geschaut, ob bei meinem Partner starke Antriebe vorliegen könnten, diese Kombination zu verlassen, auf welche ich reagieren sollte ... Grundsätzlich lässt sich sagen, dass ich zwar mit Excel gerechnet habe, die genauen Beträge dann aber Gefühl waren.«

Mit dieser Mischung aus Rechnen und Gefühl ist es ihr gelungen, den Durchschnitt der Beiträge sehr präzise zu treffen. Beim Spiel mit einem Durchschnittsteilnehmer hätte sie sicher die höchste Punktzahl aller Beteiligten erreicht.

## Liebe deinen Spielpartner wie dich selbst

Das ist bemerkenswert, aber die größte Überraschung war eine andere. Unerwartet viele Einsender haben sich ausdrücklich gegen die Grundannahme der Spieltheorie – »Jeder sucht nur seinen eigenen Vorteil« – verhalten. Vielmehr folgten sie einem Prinzip, das wir »edelmütig« nennen wollen: Bewerte einen Punkt für deinen Partner genauso hoch wie einen für dich selbst. Das äußert sich bei Jörn Weichert in einer Strategie, die wir MaxSum nennen: »Ich habe die Einsätze so gewählt, dass die Summe der Punkte beider Spieler maximal wird.« Ein äquivalentes Verfahren ist, die Summe der Abstände vom idealen Wert zu minimieren. Dabei nimmt man an, dass der Partner das gleiche Vorgehen wählt.

In einer anderen edelmütigen Strategie, die wir MaxMin nennen, versuchen die Spieler die kleinere der beiden Punktzahlen (der eigenen und der des Partners) zu maximieren. Wiederum wird angenommen, dass der Partner auf die gleiche Weise verfährt. Helmut Hubert: »Beide Personen wünschen nicht nur für sich, sondern auch für den Partner einen möglichst perfekten Abend. Beide könnten

nur dann zugleich das Maximum von 300 Punkten erreichen, wenn das Produkt ihrer  $v$ -Werte = 1 sein würde. Da dies nicht erfüllt ist, werden also beide Personen Abstriche machen. Es ist fair, wenn beide gleichzeitig die dann noch höchstmögliche Punktzahl erreichen ...« Im Beispielszenario würden nach der Strategie MaxSum Alex 150 und Bianca 300 wählen. Nach der Strategie MaxMin ergeben sich die Werte 264,7 für Alex und wiederum 300 für Bianca.

Wohlgemerkt: Edelmut ist etwas anderes als Altruismus. Wie die Diskussion zum Urlauberdilemma klargemacht hat, ist er fast dasselbe wie schlichter Egoismus – allerdings mit dem Vertrauen, dass der andere genauso denkt wie man selbst. Spieler im Urlauberdilemma berücksichtigen dann nur Fälle, in denen beide Spieler dasselbe ansagen; in unseren – unsymmetrischen – Szenarien ist Edelmut nicht so einfach zu charakterisieren.

Immerhin ist er mühelos vom klassischen Egoismus zu unterscheiden. In acht der 16 Szenarien kommt MaxSum zu einem anderen Ergebnis als die Gleichgewichtsstrategie; der Unterschied ist sogar krass in den Szenarien 1 (450 statt 750) und 5 (100 statt 550).

Nach der Auszählung haben 26 Teilnehmer MaxSum und 11 MaxMin gespielt. Mehr als ein Drittel aller Beteiligten war also edelmütig. Bei den restlichen 37 Teilnehmern passte keine Strategie zu mehr als sechs Antworten. Sie folgten anderen Theorien, benutzten verschiedene Regeln in verschiedenen Situationen oder entschieden einfach nach dem Zufall.

In unserem vorigen Experiment, das wir an der Universität von Kalifornien in San Diego unter Laborbedingungen durchgeführt haben, war dagegen kein einziger MaxSum-Vertreter zu finden. Lag es daran, dass die romantische Rahmenhandlung edelmütigen Gedanken Vorschub leistete, oder hatten die Leute diesmal einfach mehr Zeit zum Nachdenken?

Weitere Experimente werden zur Klärung erforderlich sein. <

# Im Wirbel der Beschleunigungsspirale

Dass die materiellen, sozialen und geistigen Verhältnisse in immer raschere Bewegung versetzt werden, ist eine kulturelle Grunderfahrung, die den Prozess der Modernisierung begleitet. Doch die Dynamisierung der Welt erweist sich darüber hinaus als das Fundamentalprinzip unserer Zeit.

Von Hartmut Rosa

*»In ewiger  
Unsicherheit und  
Bewegung  
verdampft alles  
Ständische  
und Stehende«*

Modernisierung wird fast immer als Beschleunigung erfahren. Das verdeutlicht ein Blick in die Kulturgeschichte. Jean-Jacques Rousseau (1712–1778) beobachtete einen »sozialen Wirbelsturm«, der um die Mitte des 18. Jahrhunderts von Paris aus die Verhältnisse in ganz Frankreich in einen wilden Strudel zu ziehen begann. Sein Zeitgenosse Goethe klagte gerne über den »veloziferischen«, den teuflisch-geschwinden Charakter der Neuzeit. Deren Hauptmerkmal sei es, nichts mehr »reif werden zu lassen«.

Ein Jahrhundert später beurteilte der Dichter Charles Baudelaire (1821–1867) die Moderne als das »Vergängliche, Flüchtige und Zufällige«. Im 19. Jahrhundert zieht sich die Spur dieser Erfahrung bis zu Marx und Engels. Im Kommunistischen Manifest schreiben sie, die kapitalistische Moderne sei gekennzeichnet durch die »ewige Unsicherheit und Bewegung«, in deren Konsequenz »alles Ständische und Stehende verdampft«.

Auch unser heutiges Globalisierungszeitalter wird davon nicht verschont. Der Wissenschaftsjournalist Gundolf S. Freyermuth bemerkte kürzlich, wir alle seien »Zeitgenossen eines Beschleunigungsschubs, der in der Geschichte der Menschheit einmalig ist – und die Industrialisierung im Nachhinein gemächlich erscheinen lässt«. Woher rührt diese allge-

genwärtige moderne Erfahrung? Was beschleunigt sich da eigentlich – und was nicht? Wird die Welt wirklich immer schneller? Beschleunigt sich gar die Zeit selbst, wie immer wieder behauptet wird?

Die genaue soziologische Analyse moderner Zeitverhältnisse enthüllt, dass wir es mit drei logisch und kausal voneinander unabhängigen und zum Teil sogar einander widersprechenden Prozessen zu tun haben. Erst im Verein bringen sie die immer schnellere Veränderung der Welt hervor. Dies sind, so meine These, die technische Beschleunigung, die Beschleunigung des sozialen Wandels sowie die Beschleunigung des Lebenstempos.

## Technische Beschleunigung

Die technische und vor allem technologische (das heißt maschinelle) Beschleunigung zielgerichteter Vorgänge umfasst Transport, Kommunikation und Produktion. Diese Form der Beschleunigung lässt sich am einfachsten messen und nachweisen. Von der Fußreise über den Ritt zu Pferd, das Dampfschiff und die Eisenbahn hin zum Automobil, zum Flugzeug und zum Raumschiff, das um die Erde kreist, wächst das Tempo um viele Größenordnungen. Es vervielfacht sich dabei von vielleicht fünf auf 28 000 Kilometer pro Stunde. Abgesehen von solchen Spitzenwerten stiegen dabei zugleich die Geschwindigkeitsgrenzen innerhalb der einzelnen Fortbewegungsarten: Autos, Lokomotiven, Flugzeuge, Raumschiffe



HANS F. MEIER / ISTOCKPHOTO; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

und sogar Fahrräder erzielen heute weit höhere Geschwindigkeiten als bei ihrer Einführung, wengleich sich hier Grenzen des Möglichen (und des Sinnvollen) abzeichnen.

Für die These einer generellen Mobilisierung moderner Gesellschaften ist jedoch die Steigerung der durchschnittlichen Geschwindigkeiten wichtiger, auch wenn deren Ermittlung weit schwerer fällt. Das genaueste Maß bestünde in der Ermittlung der Menge an Gütern und Personen, die pro Zeiteinheit bewegt werden, und ihrer mittleren Transportgeschwindigkeit. Interessanterweise stehen diese beiden Werte mitunter in einer negativen Beziehung: Je mehr Personen sich gleichzeitig fortbewegen wollen, umso niedriger wird ihre Durchschnittsgeschwindigkeit, wenn es infolge überlasteter Infrastrukturen zu Staus kommt. Dennoch widerlegt der Stau in seinen vielfältigen Erscheinungsformen die Beschleunigungsthese keineswegs: Wenn und weil alles schneller gehen soll, kommt es zu dysfunktionalen Nebeneffekten mit vorübergehender Verzögerungswirkung.

Das zunehmende Transporttempo liegt an der Wurzel jener für die Moderne so charakteristischen Erfahrung der »Raumschrumpfung«, denn die Raum-Erfahrung ist in erheblichem Maß eine Funktion der Dauer, derer es zu seiner Durchquerung bedarf. Dies zeigt sich etwa in zeitlichen Entfernungsangaben. Dauerte es um 1750 noch mehrere Wochen, um von Europa nach Amerika zu gelangen, so

braucht es heute nur noch gut sechs Flugstunden. Infolgedessen scheint die Welt seit der industriellen Revolution auf etwa ein Sechzigstel ihrer ursprünglichen Größe geschrumpft zu sein. Beschleunigungsinnovationen im Transportwesen sind daher hauptverantwortlich für das, was seit Heinrich Heine als »die Vernichtung des Raumes durch die Zeit« erfahren wird.

### **U-topisches, also raumloses Internet**

Für diese Veränderung der Raumerfahrung spielt aber natürlich auch die Beschleunigung der Kommunikation beziehungsweise der Informationsübermittlung eine entscheidende Rolle. Diese Steigerungsgeschichte verläuft vom Läufer von Marathon über berittene Boten, Rauchzeichen und Brieftauben zu Telegrafien und Telefonen und schließlich zum im Wortsinn u-topischen, also raumlosen Internet, in dem Daten ihren Ort verlieren und mit Lichtgeschwindigkeit übermittelt werden. Dabei nimmt nicht nur die Geschwindigkeit der Übermittlung von Nachrichten, sondern auch die Menge der pro Zeiteinheit übermittelbaren Informationen stetig zu. Forscher schätzen die Steigerung allein im 20. Jahrhundert auf das Zehnmillionenfache. Für den Charakter zwischenmenschlicher Kommunikation entscheidend ist dabei die Tatsache, dass asynchroner (etwa bei E-Mail oder Anrufbeantworter) und synchroner Austausch jederzeit unabhängig vom jeweiligen Ort der

**Nach oben oder nach unten – Hauptsache schneller. Jeder erlebt die soziale Beschleunigung im Alltag.**



EGODITAL / ISTOCKPHOTO; BEARBEITUNG: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Nach einer Studie von 2006 wird sich die Zahl der Autos von weltweit 600 Millionen bis 2050 auf weit über eine Milliarde erhöhen. Ob alle dann auch schneller an ihr Ziel kommen, darf bezweifelt werden.

Gesprächspartner möglich sind. Technische Beschleunigung bezeichnet jedoch auch die raschere Herstellung von Gütern, die zügigere Umwandlung von Stoffen und Energien und, allerdings in geringerem Maße, die Beschleunigung von Dienstleistungen.

Die industrielle Revolution des 19. sowie die digitale des 21. Jahrhunderts erweisen sich so letztlich zuerst und vor allem als Beschleunigungsrevolutionen, deren Schlüsselmaschine, wie der amerikanische Techniksoziologe Lewis Mumford einst bemerkte, weniger die Dampfmaschine als vielmehr die Uhr war. Tatsächlich fließen in der digitalen Revolution die drei Formen technologischer Beschleunigung – Transport, Kommunikation und Produktion – in der Virtualisierung und Digitalisierung von Prozessen und Produkten dort zusammen, wo nicht mehr Materie transportiert, sondern stattdessen Informationen digital übertragen werden. Die Geschwindigkeit der Datenverarbeitung ist dabei im 20. Jahrhundert auf das Millionfache gestiegen.

In einem kapitalistischen Wirtschaftssystem geht indessen das erhöhte Produktionstempo Hand in Hand mit der Zunahme der Verteilungs- und Konsumtionsgeschwindigkeiten, sodass materiale Strukturen der modernen Gesellschaft in immer kürzeren Zeiträumen reproduziert und verändert werden. Eine Voraussetzung dafür war und ist jedoch,

dass der Prozess der Modernisierung über diese Grundformen technologischer Beschleunigung hinaus zugleich gekennzeichnet ist durch die Beschleunigung und Rationalisierung von Organisations-, Entscheidungs- und Kontrollprozessen. Diese fallen hier ebenfalls unter die Kategorie der technischen Beschleunigung.

Unser Leben beschleunigt sich nun aber nicht nur durch die genannten technischen Tempozuwächse, sondern auch deshalb, weil die Art und Weise, wie wir zusammenleben, also unsere Beziehungs- und Praxisformen, sich in der Neuzeit immer rascher ändern. Unsere Nachbarn ziehen in immer schnellerer Folge ein und aus, unsere Lebens(abschnitts-)partner und Arbeitsstellen haben eine immer kürzere Halbwertszeit, Kleidermoden, Automodelle und Musikstile lösen einander in wachsendem Tempo ab. Das ist jedoch keine logische Folge der technischen Beschleunigung, sondern ein Phänomen, das sich als Beschleunigung des sozialen Wandels beschreiben lässt. Sie bewirkt, dass die Halbwertszeit unseres Wissens sinkt – das betrifft vor allem praktisches Alltagswissen: Unser Wissen über die Wohnorte, Lebensgemeinschaften und Telefonnummern von Freunden, über den Gebrauch von Computerprogrammen, Handys und Mikrowellen, über Parteiprogramme, Spitzensportler, Geldanlagen und Bildungsprogramme muss in immer kürzeren Zeitabständen aktualisiert werden.

### Gesteigerter sozialer Wandel

In allen Lebensbereichen laufen wir Gefahr, nicht mehr auf dem Laufenden zu sein. Der Philosoph Hermann Lübbe beschreibt das als fortwährende »Gegenwartsschrumpfung«: Wenn Gegenwart als das Heute all das bezeichnet, was Gültigkeit hat, rücken das Gestern – dasjenige, was nicht mehr gilt – und das Morgen – das, was noch nicht gilt – immer näher an uns heran. Beschleunigung des sozialen Wandels lässt sich damit definieren als Steigerung der Verfallsraten von handlungsorientierenden Erfahrungen und Erwartungen und als Verkürzung der für die jeweiligen Funktions-, Wert- und Handlungssphären als Gegenwart zu bestimmenden Zeiträume.

Der so gewonnene Maßstab für Stabilität und Wandel lässt sich dann auf soziale und kulturelle Institutionen und Praktiken aller Art anwenden: Die These einer allgemeinen Beschleunigung des sozialen Wandels besagt, dass die Gegenwart in Politik und Wirtschaft, Wissenschaft und Kunst, in Jobs und Familien, aber auch in moralischen und alltagspraktischen Orientierungen schrumpft. Wir

müssen uns in immer kürzeren Abständen umorientieren.

Illustrieren lässt sich die Beschleunigung des Wandels an der Verbreitung von Neuerungen: Von der Erfindung des Rundfunkgeräts Ende des 19. Jahrhunderts bis zu seiner Verbreitung auf 50 Millionen Empfänger dauerte es 38 Jahre. Das ein Vierteljahrhundert später eingeführte Fernsehen erreichte denselben Verbreitungsgrad bereits nach 13 Jahren, während es vom ersten bis zum fünfzigmillionsten Internetanschluss gar nur noch vier Jahre dauerte. Dass sich die Strukturen der sozialen Wirklichkeit beschleunigt ändern, lässt sich aber auch an der abnehmenden Stabilität von Beschäftigungs- und Familienstrukturen ablesen. Während in frühmodernen Gesellschaften die Berufe häufig einfach von den Vätern auf die Söhne übergingen – also intergenerationale Stabilität aufwiesen –, galt für die klassische Moderne das Motto: ein Mann (und später auch eine Frau), ein Beruf beziehungsweise eine Arbeitsstelle, die zwar individuell gefunden werden musste, dann aber, zumindest der Idee nach, über ein Erwerbsleben hinweg Bestand hatte. Berufe besaßen also immerhin generationale Stabilität. In der heutigen US-amerikanischen Arbeitswelt beispielsweise wechselt dagegen ein Akademiker im Schnitt seine Arbeitsstelle elfmal.

Dieselbe Steigerung von einem intergenerationalen über ein generationales hin zum intragenerationalen Wandlungstempo lässt sich auch für Familien beobachten: Waren die tragenden Familienstrukturen der Vormoderne noch auf übergenerationale Stabilität hin angelegt – die Generationen durchliefen vom Kind über den Junior bis zum Senior festgeschriebene Rollenmuster –, war die klassische Familie der Moderne als Kernfamilie entworfen, die sich über eine Generation hinweg nicht veränderte. An deren Stelle tritt heute tendenziell die wechselnde Lebensabschnittspartnerschaft beziehungsweise eine serielle Monogamie, wie sie sich in zunehmenden Scheidungen und Wiederverheiratungen spiegelt.

Beispiele für ein zunehmendes Tempo des sozialen Wandels und mithin für eine abnehmende Gegenwartsdauer in unterschiedlichen Lebensbereichen finden wir aber auch dort, wo Unternehmen ihre Bilanzen einst jährlich, dann halbjährlich und heute bereits vierteljährlich veröffentlichen, wo in Film und Fernsehen Kameraeinstellungen und Schnittfolgen immer rascher wechseln oder wo sich die mittlere Verweildauer eines Touristen am Urlaubsort von einigen Wochen auf wenige Tage oder sogar Stunden verkürzt. Dass wir buchstäblich schneller zu leben versuchen, in-

dem wir die Zahl der Handlungs- und Erlebnisepisoden pro Zeiteinheit erhöhen, also mehr Dinge in weniger Zeit erledigen, stellt die dritte kategoriale Form der sozialen Beschleunigung dar – die Beschleunigung des Lebenstempos.

Diesem Beschleunigungswunsch liegt das Gefühl einer wachsenden Zeitknappheit zu Grunde. In der modernen Gesellschaft wird Zeit immer mehr als Mangelware erlebt, was angesichts der technischen Zeitgewinne paradox erscheint. Das Gefühl, bei allem, was wir tun, immer schon zu spät dran zu sein, wird zur modernen Grundbefindlichkeit. Es ist ein Phänomen, das sich mit wachsendem Wohlstand unaufhaltsam zu vermehren scheint. So stellte der schwedische Ökonom Staffan Linder schon in den 1970er Jahren ein Axiom auf, nach dem sich Güterwohlstand und Zeitwohlstand umgekehrt proportional zueinander verhalten. Je reicher ein Land oder eine Bevölkerungsgruppe wird, desto knapper wird die Zeit, desto stärker entwickelt sich ihr Zeit hunger. Das aber bedeutet, dass das, was wir tun wollen oder tun müssen, sich so rasch vermehrt, dass die Zeitgewinne, die uns die technische Beschleunigung beschert, nicht ausreichen. Dies ist das einzigartige Kennzeichen moderner Gesellschaften: Ihre Zeitressourcen

*Zeit wird immer mehr als Mangelware erlebt, was angesichts des technischen Zeitgewinns paradox erscheint*

Im Dreieck des Wandels: Beschleunigungsprozesse und ihre Motoren bedingen und verstärken sich gegenseitig – ein unaufhaltsamer Vorgang?



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

verknappen sich trotz permanenter technischer Zeiteinsparungen.

Der Grund dafür liegt in einem exponentiellen Wachstum von Aufgaben und Möglichkeiten, denen nur lineare Temposteigerungen gegenüberstehen. Das beste Beispiel dafür liefert uns die Erfindung des E-Mail-Verkehrs. Nehmen wir an, es dauere im Vergleich zum Briefschreiben nur halb so lang, eine E-Mail zu verfassen und zu verschicken. Bei gleich bleibender Anzahl von Korrespondenzen halbiert sich damit die Zeit, die wir für ihre Erledigung täglich einsetzen. Wenn wir indessen die Menge der verschickten und empfangenen Nachrichten im Zuge der Einführung der neuen Technologie nicht nur verdoppeln, sondern vervierfachen, verdoppelt sich natürlich der tägliche Zeitaufwand trotz der schnelleren Technik; unsere Zeit wird knapper. Dafür ist indessen nicht die Technik selbst, sondern die Steigerungslogik der Moderne verantwortlich. Die wachsende Zeitnot lässt uns dann nach weiteren technischen Beschleunigungsmöglichkeiten suchen.

Grundsätzlich stehen uns drei Wege zur Verfügung, unser Lebenstempo zu steigern: Erstens können wir mehr Dinge innerhalb eines Zeitraums erledigen, wenn wir die Handlungsgeschwindigkeit erhöhen, indem wir beispielsweise schneller kauen oder beten. Moderne Lebensstile offerieren dazu Fast Food, Speed-Dating, Power Naps (angeblich maximal-effizienter Kurzschlaf) oder Quality Time mit Kindern – dahinter verbirgt sich das Bestreben, dem Nachwuchs möglichst wenig Zeit zu widmen, ohne ihn emotional zu vernachlässigen.

Zweitens können wir Pausen und Leerzeiten durch geschickte Zeitorganisation verkürzen oder vermeiden, also Wartezeiten abschaffen. Alles muss Schlag auf Schlag gehen. Aus den damit verbundenen Planungsstrategien folgt, dass jede unvorhergesehene Verzögerung zu verpassten Anschlüssen führt und damit zeitökonomisch teuer wird. Die vielversprechendste und aktuellste Form der Erhöhung des Lebenstempos besteht drittens im Multitasking: Je mehr Dinge wir gleichzeitig tun, desto mehr Handlungen können wir in einer Zeitspanne unterbringen.

Alles in allem ist der Befund dieser Zeitdiagnose damit eindeutig: Die Moderne ist in der Tat durch einen vieldimensionalen und anhaltenden Prozess der Beschleunigung und Dynamisierung gekennzeichnet, der zwar auf allerhand – natürliche und kulturelle – Grenzen und Widerstände, aber auf keine gleichrangigen Gegenkräfte trifft. Beschleunigung ist der Moderne als ihr heimliches Grundprinzip kulturell wie strukturell eingraviert.

Wie aber ist dieser Prozess entstanden? Viele Faktoren wirkten zusammen, um die moderne Beschleunigungsspirale in Gang zu setzen. Dabei spielte die Staatenkonkurrenz eine gewichtige Rolle, die sich nach dem Westfälischen Frieden von 1648 entwickelte. Denn Herrschaft ist, wie der französische Medientheoretiker Paul Virilio gezeigt hat, immer auch die Herrschaft des Schnelleren. Dasselbe galt für die sich herausbildende Wirtschaftsform des Kapitalismus: In ihr wurde Zeit zu einem Produktionsfaktor und damit zu einer knappen Ressource, deren Einsparung unmittelbar der Profitsteigerung dient. »Zeit ist Geld« lautet die Grundformel dieses Wirtschaftssystems.

### Die Konkurrenz schläft nicht

Die Beschleunigung des Wettbewerbs entwickelte sich aber auch über die Ökonomie hinaus zu einem Antriebsmotor des Steigerungsspiels. Weil die moderne Gesellschaft Güter und Geld, Positionen und Privilegien, Ansehen und Anerkennung nicht einfach nach ständischen Prinzipien zuteilt, sondern je nach Leistung im Konkurrenzkampf vergibt, zwingt sie ihre Mitglieder, zunehmend mehr Zeit und Energien in die Aufrechterhaltung ihrer Wettbewerbsfähigkeit zu investieren. Weil die Konkurrenz niemals schläft, bedeutet jedes Ausruhen und Stillstehen immer schon ein Zurückfallen.

Auch die Logik der Arbeitsteilung beziehungsweise der funktionalen Differenzierung trug ihren Teil dazu bei, die neuzeitliche Beschleunigungsspirale in Gang zu setzen: Arbeitsteilung erhöhte die Geschwindigkeit der Produktion, indem sie selbst eine Art des gesellschaftlichen Multitasking darstellte. Die Menschen der Neuzeit waren und sind aber keineswegs nur die Opfer eines ungeplanten Steigerungsexzesses, der über sie hereingebrochen ist.

In der kulturellen Logik der Moderne erschien Beschleunigung vielmehr stets auch als eine Verheißung, der eine ähnliche Funktion zukommt wie religiösen Verheißungen des ewigen Lebens. Wenn ein Leben definiert wird durch seine Summe an ausgekosteten Erfahrungen und Erlebnissen, dann lässt es sich durch Beschleunigung verdoppeln: Wer doppelt so schnell lebt, so die nie ausgesprochene Grundüberzeugung der diesseitsorientierten, säkularen Moderne, bringt dann gleichsam zwei Lebenspensen in der Zeitspanne eines Erdenlebens unter. Und wer unendlich schnell wird, kann auf ein ewiges Leben vor dem Tod hoffen. Beschleunigung trägt in sich daher auch die moderne Antwort auf den Tod.



**Hartmut Rosa**, Jahrgang 1965, studierte in Freiburg, London und Berlin und lehrt seit 2004 an der Friedrich-Schiller-Universität Jena Soziologie und Politikwissenschaft.

Alles. Gleichzeitig. Und zwar sofort. Von Karlheinz Geißler. Herder, Freiburg 2007

Beschleunigung. Die Veränderung der Zeitstrukturen in der Moderne. Von Hartmut Rosa. Suhrkamp, Frankfurt a. M. 2005

Das Tempo-Virus. Eine Kulturgeschichte der Beschleunigung. Von Peter Borscheid. Campus, Frankfurt a. M. 2004

Vom Tempo der Welt. Am Ende der Uhrzeit. Von Karlheinz Geißler. Herder, Freiburg 2004

Zeitschichten. Studien zur Historik. Von Reinhart Koselleck. Suhrkamp, Frankfurt a. M. 2000

Rasender Stillstand. Von Paul Virilio. Hanser, München 1992

Geschwindigkeit und Politik. Ein Essay zur Dromologie. Von Paul Virilio. Merve, Berlin 1980

[www.sociologie.uni-jena.de/homepage/rosa/cms](http://www.sociologie.uni-jena.de/homepage/rosa/cms)

In ihrem Zusammenwirken haben all diese Faktoren die neuzeitliche Beschleunigungsspirale inzwischen tief in den Strukturen und Handlungsweisen unserer Gesellschaft verankert – so tief, dass sie zu einem stahlharten Gehäuse geworden ist, gegen das individuelle Bemühungen um Entschleunigung ebenso wenig auszurichten vermögen wie politische Programme oder religiöse Appelle.

Was aber steht am Ende dieser Beschleunigungsspirale? Logisch gesehen bildet der »rasende Stillstand«, also das Ineinanderfallen von totaler Bewegung und absoluter Beharrung, den nur mathematisch fassbaren Endpunkt des Dynamisierungsspiels. Denn Bewegung lässt sich nur beobachten vor einem stabilen Hintergrund. Wenn aber alles in Bewegung ist, gibt es auch keine Dynamik mehr. Empirisch betrachtet werden wir diesen Endpunkt natürlich niemals erreichen. Denn lange vorher wird uns die Klimakatastrophe drohen, die selbst eine Manifestation der Beschleunigung ist, da Erwärmung molekulare Beschleunigung bedeutet. Alternativ könnten entweder unsere kulturelle Reproduktionsfähigkeit überfordert werden oder die politischen Kontrollmöglichkeiten zusammenbrechen. Auch darf nicht übersehen werden, dass eine wachsende Zahl von Menschen – die Mehrheit in der so genannten Dritten Welt, aber auch benachteiligte Gruppen wie Kranke, Behinderte, Arbeitslose und Ausgegrenzte in den Industriestaaten – kulturell und strukturell vom Beschleunigungsspiel ausgeschlossen bleibt oder abgehängt wird. Ihre Chance, diese Spirale gewaltsam anzuhalten, wächst insbesondere dort, wo das System durch Temposteigerungen störanfälliger wird.

### Ein Ende im Ökokollaps?

Aber der Übergang von einer Gesellschaft der dynamischen Entwicklungen zu einem System von chaotischen Veränderungen lässt sich möglicherweise schon heute in einigen Sozialbereichen beobachten. Wenn technische Neuerungen so schnell aufeinander folgen, dass weder Nutzer noch Hersteller ihrer Schnittstellen sie mehr bewältigen können, dann führt dies nicht selten zu einem organisatorischen Kammerflimmern, das nur noch mühsam den Schein dynamischer Entwicklung aufrechtzuerhalten vermag. Das gilt auch für Situationen etwa in großen Unternehmen, die sich auf allen Ebenen gleichzeitig zu restrukturieren versuchen, sodass die Reformen der einen Ebene durch die unvorhersehbaren Entwicklungen der nächsten Ebene immer wieder zur Makulatur werden. Ähnliches kann man auch im Hochschulbereich beobachten, sobald Institute, Fakultäten, Univer-



sitäten, Länder, Bund und EU gleichzeitig und unkoordiniert Reformprogramme zur Reorganisation von Forschung und Lehre auflegen.

Das kulturelle Projekt der Moderne gründet in dem Versprechen der reflektierten individuellen, kulturellen und politischen Selbstbestimmung. Die Beschleunigungskräfte der Modernisierung haben bis ins 20. Jahrhundert hinein die ökonomischen und sozialen Spielräume dieser Selbstbestimmung stetig und gewaltig vergrößert. Heute aber erodiert der unaufhörliche Beschleunigungs- und Steigerungszwang wie eine gewaltige Feuerwalze immer mehr die Möglichkeiten wirksamer politischer und individueller Gestaltung. Die Beschleunigungsspirale saugt nach und nach alle Kräfte und Energien auf und bindet sie zu ihrer eigenen Aufrechterhaltung.

Daher hat es den Anschein, als sei die Moderne an einem Scheitelpunkt angekommen, an dem sich entscheiden muss, ob sie dem kulturellen Projekt der Selbstbestimmung oder der strukturellen Logik der Beschleunigung folgen wird. Noch ist dabei unklar, ob die moderne Gesellschaft ausreichend über Selbststeuerungsvermögen verfügt, um jenes Versprechen gegen die entfesselte Dynamik überhaupt zur Geltung zu bringen.

Ihre derzeitigen politischen Institutionen sind dieser Aufgabe jedenfalls in keiner Weise gewachsen. So wird die Beschleunigungsspirale wohl erst durch den Ökokollaps, durch klimatische oder nukleare Katastrophen oder durch ungeahnte Pandemien gestoppt werden. ◁

**Immer schneller im Bild: Film, Fernsehen und nun auch das Internet ertränken uns in einer steigenden Flut von Informationen, Bildern, E-Mails und Offerten.**

## ENERGIESPARLAMPEN

## Elektronen mögen's heiß

1500 Grad Celsius und mehrere hundert Volt Spannung zünden die kompakten Leuchtstoffröhren.

Von Bernhard Gerl

Kurze Tage, düstere Wolken – in der Winterzeit haben Leuchtmittel Hochkonjunktur. Auch wenn in den Privathaushalten Europas noch etwa 85 Prozent aller Lampen mit Glühbirnen ausgestattet sind – Edisons Erfindung hat ihre Zukunft hinter sich. Denn 93 Prozent der zugeführten elektrischen Energie gehen als Wärmestrahlung verloren, wenn der Glühfaden auf meist 2700 Grad Celsius erhitzt wird.

Energiesparlampen hingegen erreichen die vier- bis fünffache Energieausbeute. Meist versteht man darunter so genannte Kompaktleuchtstoffröhren, gefüllt mit 1,5 bis 4,5 Milligramm Quecksilber und dem Gas Argon. Elektrischer Strom heizt zuerst Wolframwendeln an ihren Enden auf etwa 1500 Grad Celsius. An einer davon liegt der negative Spannungspol an, sie dient als Glühkathode: Durch die Hitze können Elektronen leicht austreten und werden dann im elektrischen Feld zur Anode hin beschleunigt. Überdies verdampfen nahe den Elektroden die bei Raumtemperatur flüssigen Quecksilberatome.

Sobald die nötige Temperatur erreicht ist, also ausreichend Ladungsträger und gasförmiges Quecksilber vorhanden sind, zündet das Elektronische Vorschaltgerät (EVG) durch einen kurzen, mehrere hundert Volt hohen Spannungsimpuls die Gasentladung: Die hohe Spannung beschleunigt die Elektronen derart, dass sie Argonatome durch Stoß ionisieren – immer mehr Elektronen fliegen durch die Röhre, die ihrerseits aktiv werden. Außerdem kollidieren diese Teilchen mit Quecksilberatomen und versetzen sie in einen angeregten Zustand. Aus einem neutralen Gas ist ein 40 bis 50 Grad heißes Plasma geworden. Weil das EVG nun eine 40-Kilohertz-Wechselspannung erzeugt, fließen die Ladungsträger hin und her und erhalten diesen Zustand aufrecht, ein weiterer Spannungsimpuls ist nicht erforderlich.

Andererseits rekombinieren Argon-Ionen und Elektronen auch zu elektrisch neutralen Atomen, und angeregtes Quecksilber wechselt wieder in den Grundzustand. In beiden Fällen wird Energie in Form ultravioletter Strahlung freigesetzt.

Diese lässt im letzten Schritt eine Leuchtstoffschicht, die den Glaskörper der Röhre auskleidet, fluoreszieren, und zwar je nach chemischer Zusammensetzung in einem anderen Wellenlängenbereich. Rotes, grünes und blaues Licht mischen sich zu weißem. Soll das Spektrum tageslichtähnlicher und kontinuierlicher sein, werden vier oder fünf verschiedene Leuchtstoffe verwendet. Nicht umgewandelte ultraviolette Strahlung absorbiert der Glaskörper.

Bei gleicher Helligkeit sparen diese Leuchtröhren 75 bis 80 Prozent Strom gegenüber Glühbirnen ein. In Australien werden Letztere voraussichtlich ab 2010 verboten sein, um die jährliche Emission an Kohlendioxid um vier Millionen Tonnen zu senken. Auch die Kubaner sind aufgerufen, Energiesparlampen zu verwenden, allerdings aus anderem Grund: Reduktion des Stromverbrauchs soll die Versorgung mit Elektrizität langfristig sicherstellen. In der Europä-

ischen Union kommen entsprechende Vorschläge aus der Industrie selbst. Der europäische Verband der Leuchtmittelhersteller ELC empfahl im Juni 2007, Leuchtkörper mit einer Energieeffizienzklasse von E, F oder G – und das sind vor allem Glühbirnen – zu verbieten, und zwar solche mit Leistungen von mehr als 100 Watt schon ab 2009, die bis 25 Watt ab 2017. Jährlich sollen so 23 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> weniger emittiert werden.

**Der Einsatz von Energiesparlampen** lohnt sich aber nicht nur für die Umwelt, sondern auch für den Nutzer. Den fünf- bis zehnmal höheren Anschaffungspreis macht eine Lebensdauer von 5000 bis 15 000 Stunden gegenüber nur 1000 Stunden einer Glühbirne wieder wett. Der geringere Energieverbrauch schlägt sich zudem in den Stromkosten nieder: Eine 11-Watt-Energiesparlampe verbraucht während 10 000 Betriebsstunden für etwa 100 Euro weniger Strom als eine gleich helle 60-Watt-Glühbirne.

Dennoch scheut mancher den Technikwechsel. Nicht zuletzt bietet der klobige Startervorbau keinen sonderlich attraktiven Anblick. Die Hersteller entwickeln deshalb immer kleinere Modelle und verbergen die Röhren in runden Glaskörpern. Ein weiterer Hinderungsgrund: Kompaktleuchtstoffröhren enthalten Quecksilber und eine Elektronik, sind also Sondermüll; Privathaushalte dürfen sie beim Händler abgeben. Bei fachgemäßer Entsorgung lassen sich Quecksilber, Aluminium, Bronze, Glas und Leuchtstoffe wieder zurückgewinnen. Problematisch ist nur, dass nach wie vor viele Lampen im Hausmüll landen. Immerhin enthalten die jährlich in Europa verkauften 600 Millionen Energiesparlampen ein bis zwei Tonnen Quecksilber.

Der Physiker **BERNHARD GERL** arbeitet als Technikpublizist in Mainz.

► **Energiesparlampen sind meist mit dem gleichen Gewinde ausgestattet wie normale Glühbirnen. Das elektronische Vorschaltgerät im Keramiksockel erzeugt ein Plasma und erhält es aufrecht. Dazu wird die Netzspannung in eine Gleichspannung umgewandelt und von einem Kondensator geglättet (das verhindert ein Flimmern der Lampe). Ein Hochfrequenzgenerator erzeugt im nächsten Schritt eine Wechselspannung von etwa 40 Kilohertz, das heißt 40 000-mal pro Sekunde wechselt die Polarität und freie Elektronen strömen hin und her. Durch Kollisionen übertragen sie Energie auf Argon- und Quecksilberatome, die dann wieder als ultraviolette Strahlung frei wird. Eine Leuchtstoffschicht erzeugt daraus sichtbares Licht.**

## WUSSTEN SIE SCHON?

- ▶ **Die Lichtfarbe** der Energiesparlampen wird in Kelvin angegeben – entsprechend der Temperatur eines glühenden Körpers, der mit dieser Farbe strahlen würde. In Wohnräumen sind 2700 oder 3000 Kelvin üblich, am Arbeitsplatz 4000 Kelvin, da der weißlichere Farbton Kontraste deutlicher macht. Über die chemische Zusammensetzung der Leuchtschicht lässt sich sogar die Farbe des Tageslichts von 6500 Kelvin erreichen.
- ▶ **Bleibt eine Energiesparlampe** weniger als zehn Minuten in Betrieb, können die Kathoden stärker verschleifen als bei längeren Einschaltzeiten.
- ▶ **Herkömmliche Leuchtstoffröhren** nutzen die 50-Hertz-Netzspannung direkt, die Elektronen wechseln also hundertmal pro Sekunde die Flugrichtung. Das erlaubt längere Röhren, geht aber mitunter mit Flimmern und Brummen einher.
- ▶ **Die meisten Kompaktleuchtstoffröhren** geben direkt nach dem Einschalten nicht mehr als vierzig Prozent ihrer vollen Lichtleistung ab. Erst nach zwei Minuten haben sie etwa neunzig Prozent erreicht, denn erst dann beträgt die Temperatur der

Röhre vierzig bis fünfzig Grad und die meisten Quecksilberatome sind verdampft. Das Einschalten schlägt übrigens im Vergleich zum Betrieb kaum zu Buche, da bis zur Zündung des Plasmas nur Sekundenbruchteile vergehen.

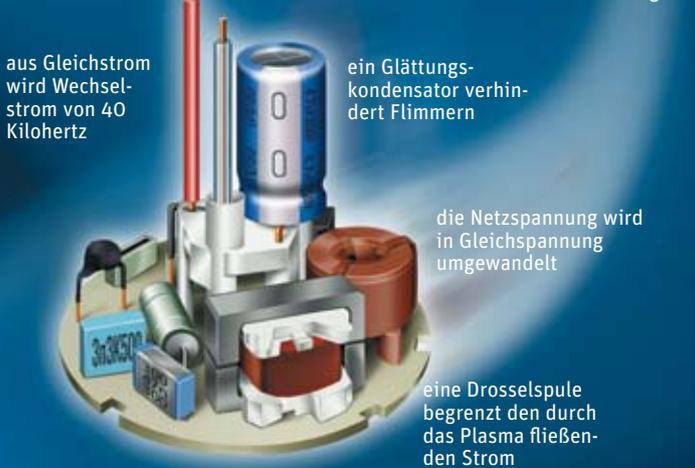
▶ **Die Helligkeit** von Kompaktleuchtstoffröhren lässt sich im Allgemeinen nicht durch externe Dimmer einstellen, denn diese verändern Strom- und Spannungswerte, die Vorschaltgeräte würden dann nicht mehr problemlos arbeiten. Inzwischen gibt es aber bereits Modelle mit speziell zu diesem Zweck modifizierter Elektronik.

▶ **Während sich Energiesparlampen** anschicken, Glühbirnen vom Markt zu verdrängen, erwächst ihnen selbst Konkurrenz: Licht emittierende Dioden (LEDs) und optimierte Halogenlampen. Erstere verbrauchen wenig Strom, sind aber noch sehr teuer und eignen sich derzeit vor allem als Spots. Halogenlampen sind zwar Glühbirnen, doch eine Gasfüllung erlaubt es, die Wendel stärker aufzuheizen und so die Lichtausbeute zu erhöhen. Eine Wärmestrahlung reflektierende Beschichtung erhält die Betriebstemperatur bei geringerem Stromverbrauch aufrecht.

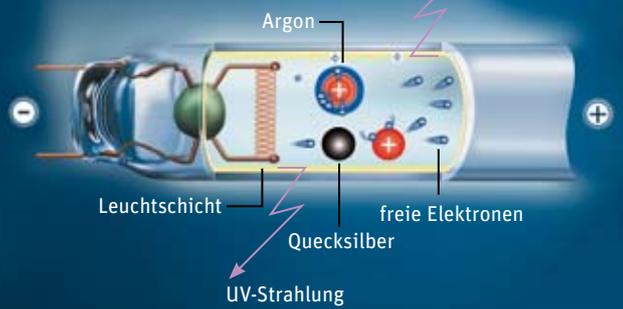
### AUFBAU EINER ENERGIESPARLAMPE



### VORSCHALTGERÄT



### PRINZIP DER LICHTERZEUGUNG





# WOZU neue KERNWAFFEN?

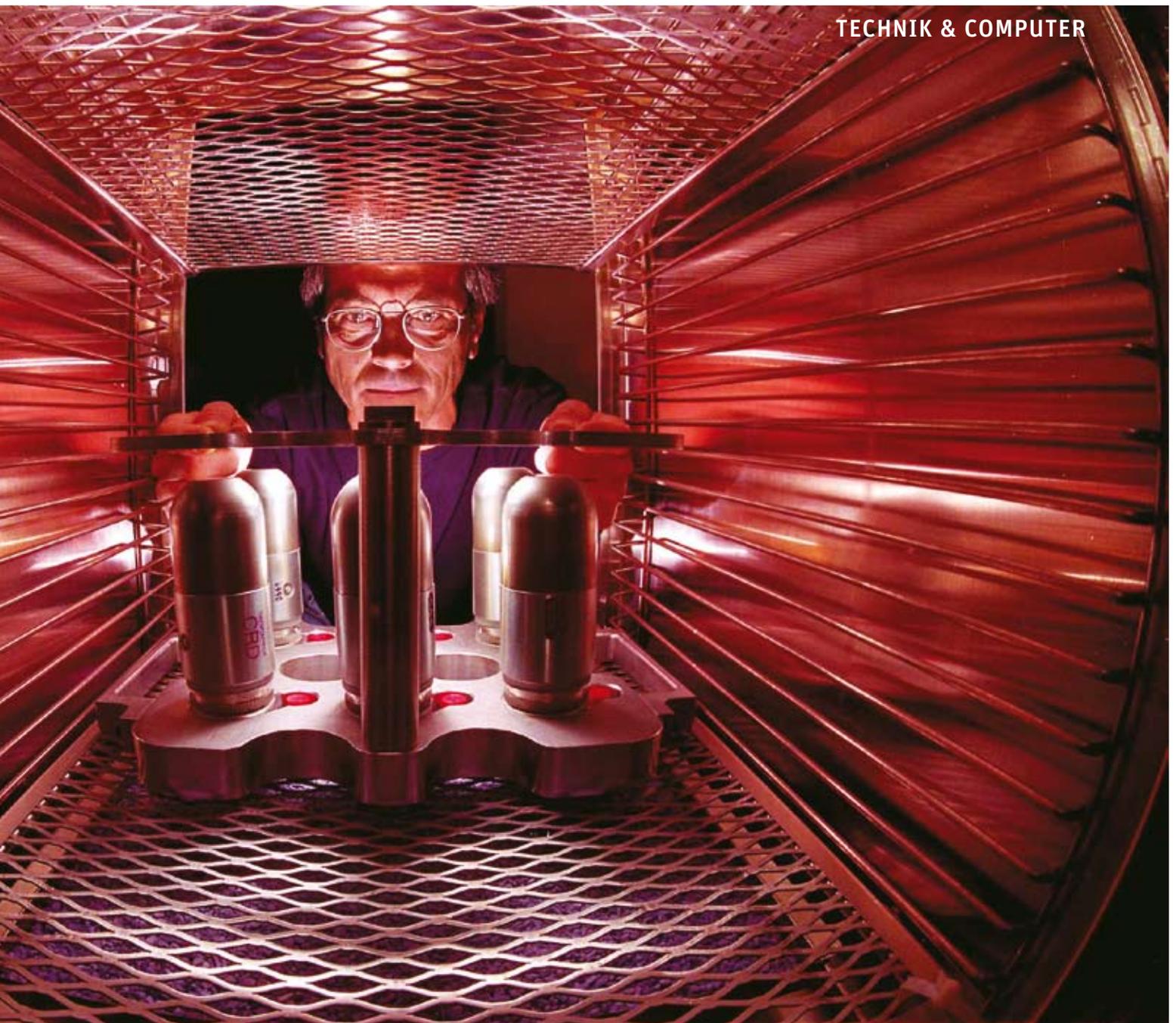
Zum ersten Mal seit zwanzig Jahren beabsichtigt die US-Regierung, einen neuen Nuklearsprengkopf zu produzieren. Das Vorhaben wirft eine Fülle von Fragen auf.

Von David Biello

**N**och immer sind Hunderte amerikanischer Nuklearwaffen auf Ziele in Russland und anderswo gerichtet. Obwohl mit dem Untergang der Sowjetunion 1991 auch der Kalte Krieg mit seinem »Gleichgewicht des Schreckens« ein Ende fand, unterhalten die Vereinigten Staaten weiterhin ein Arsenal von rund zehntausend dieser Massenvernichtungswaffen. Russland, China, Frankreich, Indien, Israel, Pakistan und Großbritannien sind heute Verbündete der USA oder schlimmstenfalls unkriegerische Konkurrenten; alle außer Russland besitzen nur beschränkte Kernwaffenarsenale. Nordkorea und Iran haben zwar ein gespanntes Verhält-

nis zu den Vereinigten Staaten, verfügen aber noch nicht über die Fähigkeit, Amerika massiv zu bedrohen. Die größte nukleare Gefahr scheint derzeit von einer »schmutzigen Bombe« auszugehen – einer mit radioaktivem Material gepackten konventionellen Bombe – oder von einem kleinen nuklearen Sprengkörper. Ein massives Nuklearwaffenarsenal dürfte aber Terroristen oder nichtstaatliche Gruppen kaum abschrecken, solche Waffen einzusetzen.

Im Moskauer Vertrag von 2002 über die Reduzierung strategischer Angriffswaffen haben sich die Vereinigten Staaten verpflichtet, ihr nukleares Offensivpotenzial mit der Zeit auf weniger als 2200 Sprengköpfe und Bomben zu reduzieren. Doch gleichzeitig wollen das Energie- und das Verteidigungsministeri-



RANDY MONTOYA

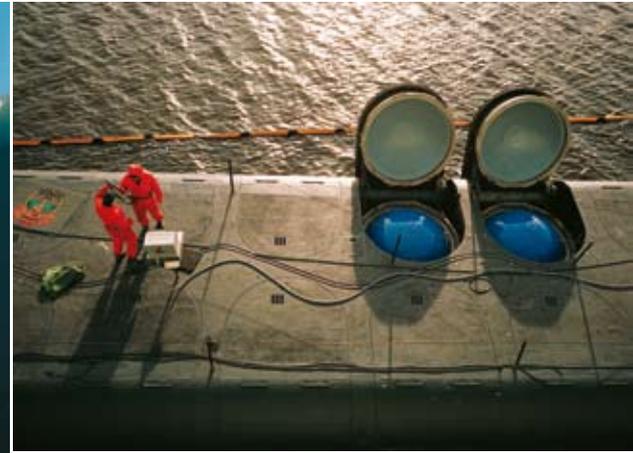
um der USA diese Waffen teilweise auswechseln, weil sie befürchten, die alternden Sprengköpfe würden nach jahrelanger Lagerung nicht mehr optimal funktionieren. Das betrifft vor allem die W76-Gefechtsköpfe, die ein Drittel des Bestands ausmachen; die ältesten werden 2008 das Ende ihrer dreißigjährigen Lebensdauer erreichen. Eine einzelne W76-Nuklearwaffe hat eine Sprengkraft von 100 Kilotonnen oder 100 000 Tonnen TNT. Sie soll so genannte weiche Ziele zerstören: Häfen, Garnisonen, Fabriken.

2004 starteten Energie- und Verteidigungsministerium das Programm Reliable Replacement Warhead (RRW, zuverlässiger Ersatzsprengkopf). Im März 2007 erhielt das Lawrence Livermore National Laboratory in Kalifornien den Zuschlag für die Konstruktion

des ersten amerikanischen Nuklearsprengkopfs seit zwanzig Jahren. Diese Waffe namens RRW1 soll die gleiche Sprengkraft wie W76 besitzen; sie hätte nach dem Ende des Kalten Kriegs keine neue strategische Funktion, und viele Beobachter bezweifeln ihren Sinn. Zudem werden derzeit zweitausend W76-Sprengköpfe technisch überholt, um ihre Lebensdauer zu verlängern, und die Sorge um die Zuverlässigkeit alternder Plutoniumkomponenten hat sich als unbegründet erwiesen (siehe Kasten S. 95).

Doch die NNSA (National Nuclear Security Administration), die für Nuklearwaffen zuständige Behörde im Energieministerium, hat weitere Gründe parat: Man erspare sich das Risiko neuer Kernwaffentests und schaffe eine Waffe, die weniger umweltschädliches

**In den Sandia National Laboratories testet ein Techniker Neutronenpulsröhren für W76-Nuklearsprengköpfe, um die Funktionstüchtigkeit der dreißig Jahre alten Waffen zu erhalten.**



BEIDE FOTOS: PAUL SHAMBROOM

Um die Fähigkeit zum Vergeltungsschlag mit Kernwaffen sicherzustellen, verlassen sich die Militärs nicht nur auf bodengestützte Raketensilos. Auch U-Boote (oben) und Flugzeuge (links) tragen nukleare Vernichtungswaffen.

## In Kürze

- ▶ **RRW1:** Der Reliable Replacement Warhead (RRW, zuverlässiger Ersatzsprengkopf) ist als Nachfolger für die vor dreißig Jahren installierten W76-Nuklearwaffen der USA geplant. Die »1« unterstellt eine ganze Serie solcher Austauschprozesse, bei denen die Sprengkraft der Waffen erhalten bleiben soll.
- ▶ **NNSA:** Die im Energieministerium angesiedelte National Nuclear Security Agency (nationale nukleare Sicherheitsbehörde) beaufsichtigt die US-Kernwaffen. Sie unterstützt den Bau des RRW1-Sprengkopfs.
- ▶ **Primärer und sekundärer Sprengsatz:** Der RRW1 soll einen primären Fissionssprengsatz aus spaltbarem Material verwenden, der bereits in früheren Kernwaffenversuchen getestet wurde. Wenn dieser Plutonium-Pit explodiert, durchflutet er den sekundären Fusionsprengsatz mit Strahlung und löst eine thermonukleare Explosion aus. Die Befürworter meinen, die Verwendung des erprobten Primärsprengsatzes mache Explosionstests des gesamten Sprengkopfs überflüssig.

Material erfordert. Obwohl die Haushaltsmittel für RRW noch nicht bewilligt sind und Teile des Programms vom Kongress gestrichen oder in Frage gestellt wurden, liegen bereits eine Kostenschätzung und ein Produktionsplan vor. Dennoch bleiben wichtige Fragen offen: Welchem Zweck dient das nukleare Waffenarsenal der USA, woraus soll es bestehen, und wie viele Waffen sind nötig?

### Aus Alt mach Neu

Ein Argument der Regierung für die neue Waffe lautet, sie erfordere keine Tests; immerhin unterzeichnete der damalige Präsident Bill Clinton 1992 ein Atomtestmoratorium. Wie die NNSA betont, beruht RRW1 auf einer früher getesteten Waffe, obwohl sie viele neue Komponenten enthält. »Sie ist neu in dem Sinn, dass wir das noch nie gemacht haben, aber nicht neu unter dem Aspekt traditioneller Rüstungskontrolle«, sagt NNSA-Planungsdirektor John Harvey. »Sie wird dieselbe Form und Funktion haben wie die derzeitige Waffe.«

Tatsächlich setzte sich der Livermore-Entwurf gegen konkurrierende Vorschläge durch, weil er auf einer Konstruktion beruht, die während der mehr als tausend Atomtests vor Inkrafttreten des US-Moratoriums erprobt worden war. Die entscheidende Komponente – der Primärsprengsatz, fachsprachlich Plutonium-Pit – »wurde viermal nuklear getestet«, erklärt Bruce Goodwin, stellvertretender Direktor für Verteidigungs- und Nukleartechnik am Livermore-Laboratorium. »Da die Grundlage dieser Konstruktion durch Tests hervorragend abgesichert ist, haben wir

großes Vertrauen, dass sie wie erwartet funktionieren wird.«

Der neue Sprengkopf arbeitet nach demselben Prinzip wie jede andere Fusionsbombe. Der primäre Fissionssprengsatz, eine Plutoniumbombe, explodiert und durchflutet das umgebende chemische Gemisch, den sekundären Sprengsatz, mit Strahlung. Diese Strahlung löst eine Fusionsreaktion zwischen den Wasserstoff-Isotopen Tritium und Deuterium aus, die im bestrahlten Gemisch entstehen. Eine thermonukleare Explosion ist die Folge.

Nur wenige Typen von Primärsprengsätzen wurden getestet. »Es ist das SKUA9-Design«, erläutert Goodwin. SKUA9 gehört zu einer Reihe von Primärsprengsätzen, die das Livermore-Laboratorium während des letzten Atomtestprogramms in den 1980er Jahren nur zu dem Zweck entwickelte, mögliche Sekundärsprengsätze zu erforschen; es wurde niemals serienmäßig in eine Waffe eingebaut. Wegen dieser früheren Tests und auf Grund von Computersimulationen halten NNSA und Livermore-Laboratorium Testexplosionen mit RRW1 für unnötig.

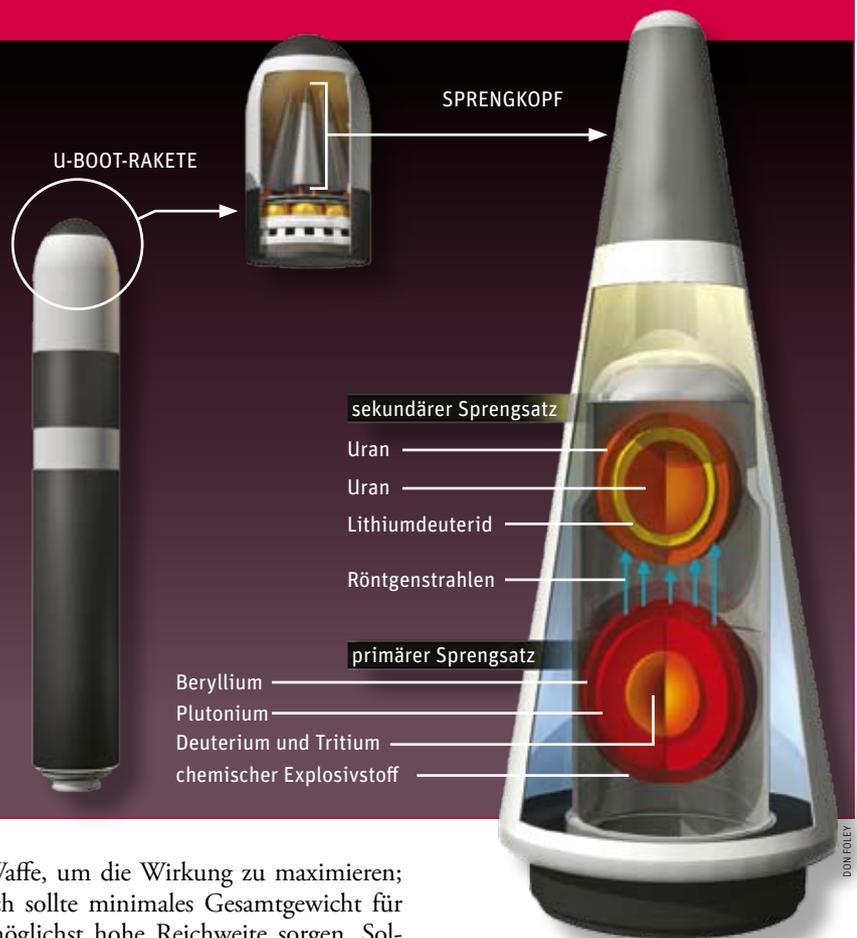
Das bessere Design von RRW1 im Vergleich zu W76 erhöhe auch die Zuverlässigkeit, sagt J. Stephen Rottler von den Sandia National Laboratories, die für den Einbau der neuen Sprengköpfe in Raketen verantwortlich sein werden. Mit Zuverlässigkeit ist vor allem gleich bleibende Sprengkraft trotz zunehmenden Alters gemeint.

Der neue Sprengkopf wird größer, dicker und schwerer sein – und daher weniger fehleranfällig, meinen Rottler und Goodwin. Kritiker wenden allerdings ein, die Zuverlässigkeit

## WIE EIN SPRENGKOPF EXPLODIERT

**Moderne Nuklearsprengköpfe** sind Fusionsbomben. Um die hohe Energie für die Zündung der thermonuklearen Fusionsreaktion zu liefern, ist eine Fissionsbombe – eine Atombombe aus spaltbarem Material – erforderlich. Zunächst detonieren speziell geformte chemische Sprengladungen, die den primären Fissionssprengsatz – den Plutonium-Pit – umgeben; sie komprimieren das Plutonium, das zudem von einer Pulsröhre mit Neutronen beschossen wird. Das Plutonium wird dadurch in leichtere Elemente gespalten und setzt Energie in Form von Strahlung frei.

**Diese Strahlung** durchflutet den sekundären Sprengsatz, der die fusionsfähigen Elemente enthält. Die Strahlung – je nach Design unterstützt durch eine weitere von ihr verursachte Spaltungsreaktion – löst im Lithiumdeuterid-Brennstoff die Fusion der Wasserstoff-Isotope Tritium und Deuterium aus. Durch Selbstverstärkung der Fusionsvorgänge entsteht eine thermonukleare Explosion.



sigkeit lasse sich auch bei den bereits vorhandenen Waffen verbessern, etwa durch veränderte Zusammensetzung des Tritium-Deuterium-Gasgemisches, mit dem der Plutonium-Pit umgeben wird, um seine Sprengkraft zu verstärken. Außerdem gebe es in den US-Arsenalen bisher keine Nuklearwaffe, die nicht zuvor in Explosionstests erprobt wurde. »Welcher militärische Befehlshaber wird sich je auf etwas verlassen, was nicht vollständig getestet ist? Das hat es noch nie gegeben«, sagt Hans Kristensen, Direktor des Nuclear Information Project der Federation of American Scientists (FAS), einer Vereinigung amerikanischer Wissenschaftler, die 1945 von den Erbauern der ersten Atombomben gegründet wurde. Der Physiker Frank von Hippel von der Princeton-Universität ergänzt: »Man weiß nie, ob man einen Fehler gemacht hat, bevor das Zeug ausprobiert worden ist. Die bisherigen Waffen haben immerhin den Vorzug, dass sie getestet wurden.«

### Brisante Bedenken

Mit dem RRW1-Typ streben die Konstrukteure noch in einem anderen Sinn Zuverlässigkeit an: Die Bombe soll nicht aus Versehen explodieren. Dafür sollen neue, schwerere Komponenten sorgen, beispielsweise robuster Hochleistungssprengstoff und verbesserte Sicherheitstechnik. Während des Kalten Kriegs packten die Militärs viele Gefechtsköpfe in

eine Waffe, um die Wirkung zu maximieren; zugleich sollte minimales Gesamtgewicht für eine möglichst hohe Reichweite sorgen. Solche Erwägungen spielen nach Auskunft der Konstrukteure heute keine entscheidende Rolle mehr.

Um die Sicherheit bei Transport und Lagerung zu erhöhen, sollen Explosivstoffe wie Triaminotrinitrobenzol (TATB) eingesetzt werden, die bei Stoß oder Hitze nicht unbeabsichtigt zünden. »Wir haben unempfindliche Hochleistungssprengstoffe bei Mach 4 gegen verstärkte Betonwände gejagt, und sie sind nicht detoniert«, erklärt Goodwin vom Livermore-Labor. »Man kann einen Benzinbrand damit löschen. Wenn man einen Schweißbrenner darauf richtet, zerfällt die Substanz.«

Doch bisher hat das Militär auf solche Sicherheitsvorkehrungen verzichtet. So lehnte es die US-Kriegsmarine Anfang der 1990er Jahre ab, die konventionellen Explosivstoffe in einigen ihrer Trident-Sprengköpfe auszutauschen. »Sie fanden das unnötig«, sagt von Hippel. »Sie waren überzeugt, sie könnten den Sprengkopf sicher handhaben.«

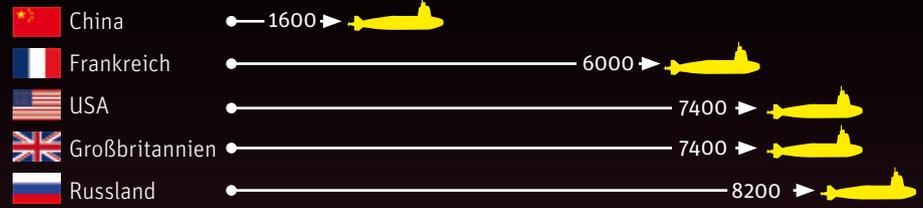
Ein weiteres Sicherheitsmerkmal von RRW1, das es bei W76 nicht gibt, ist PAL (*permissive action link*), ein eingebautes Computersystem, das zum Zünden der Waffe eine spezielle Autorisierung verlangt. »Wenn wir bei der Modernisierung die inhärente Sicher-



### ANGRIFFSREICHWEITE VON U-BOOTEN

Fünf Länder sind in der Lage, Raketen mit nuklearen Gefechtsköpfen von U-Booten aus abzuschießen, die in fast allen Meeresregionen operieren können.

[Reichweite in Kilometern (voll beladen)]



### GLOBALE REICHWEITE

Ballistische Raketen, die von den USA, Russland oder China abgeschossen werden, können auf verschiedenen Flugrouten die meisten Kontinente erreichen. Ihr Weg kann dabei auch über die nordpolare Region führen.

[Reichweite in Kilometern]



### KONVENTIONELLE WAFFEN

18 Länder besitzen ballistische Raketen, aber keine Nuklearwaffen. Die Raketenreichweiten liegen unter 800 Kilometern, nur Saudi-Arabien besitzt Exemplare mit einer Reichweite von 2500 Kilometern.



18 Länder besitzen ballistische Raketen, aber keine Nuklearwaffen. Die Raketenreichweiten liegen unter 800 Kilometern, nur Saudi-Arabien besitzt Exemplare mit einer Reichweite von 2500 Kilometern.

- Afghanistan
- Armenien
- Bahrain
- Weißrussland
- Ägypten
- Griechenland
- Irak
- Kasachstan
- Libyen
- Saudi-Arabien
- Slowakei
- Südkorea
- Syrien
- Taiwan
- Türkei
- Turkmenistan
- Ukraine
- Vereinigte Arabische Emirate

### SPRENGKOPFARSENALE

Der Moskauer Vertrag über die Reduzierung strategischer Offensivwaffen (Sort) verpflichtet Russland und die USA, die Anzahl ihrer strategischen Kernsprengköpfe bis 2012 auf höchstens 2200 Stück zu reduzieren.



FOTO OBEN: CORBIS / REUTERS / CHINA NEWS PHOTO; GLOBUS: ALFRED T. KAMAJIAN; FOTO MITTE: GETTY IMAGES; CHINA: SUNG JIUN; GRAFIKEN: ANJA SANDERSON

heit der Sprengköpfe verbessern wollen, müssen wir das eigens einbauen – und das ist ohne nukleare Tests schwierig«, meint Harvey.

Doch ob die Waffensysteme kostspielige Ergänzungen wie PAL benötigen, ist einseitig noch strittig. Da der W76-Sprengkopf an Bord von U-Booten oder in schwer gesicherten Militärbasen lagert, besteht wenig Anlass für solche Nachrüstungen, meinen die Kritiker. Beim Auffrischen anderer Nuklearwaffen wie der frei fallenden B61-Bombe wurden zusätzliche Sicherheitskodes eingeführt, ohne dass eine völlig neue Konstruktion nötig gewesen wäre. »Diese Waffe wurde schon in den 1960er und 1970er Jahren entwickelt, und zwar ohne solche Sicherheitsmerkmale«, berichtet Kristensen. »Später hat man sie nachgerüstet, nicht umgebaut. Dies zeigt, dass man auch ohne neues Design ein außerordentlich hohes Sicherheitsniveau erreichen kann.«

Nach den Terroranschlägen vom 11. September 2001 haben die Vereinigten Staaten zudem Millionen Dollar investiert, um die Sicherheit ihrer nuklearen Waffenlager zu erhöhen – wobei die Frage offen bleibt, wer solche Waffen überhaupt missbräuchlich zu zünden vermag. »Ich kenne niemanden, der an der physischen Sicherheit der US-Nuklearwaffen zweifelt«, erklärt Ivan Oelrich, stellvertretender Leiter des FAS-Programms für Strategische Sicherheit. Derselben Meinung ist das Nuclear Weapons Complex Assessment Committee der American Association for the Advancement of Science (AAAS), ein Expertengremium, das einberufen wurde, um das RRW-Programm zu bewerten. In seiner Stel-

lungnahme vom April 2007 fand das Gremium keinen Grund zu der Annahme, Sicherheitssysteme wie PAL könnten »das derzeitige Vertrauen auf Schusswaffen, Wachen und Zäune« ersetzen.

Hingegen hält die NNSA die neuen Sicherheitsmerkmale für nötig, um die Waffen während der kurzen Zeit, in der sie von einem Standort zum anderen unterwegs sind, vor Entführung zu schützen. »Das halten wir für eine kluge Vorsichtsmaßnahme, insbesondere bei Transportszenarien«, so Harvey.

### Ein »umweltfreundlicher« Sprengkopf

Der RRW1-Gefechtskopf käme ohne manche der häufig in Waffen verwendeten toxischen Substanzen aus – zum Beispiel Beryllium. Dieses spröde, Krebs erzeugende Metall reflektiert die bei einer nuklearen Explosion freigesetzten Neutronen nach innen, damit sie eine thermonukleare Kettenreaktion auslösen. »Da wir weniger auf das Gewicht achten müssen, können wir schwerere, aber umweltfreundlichere Materialien verwenden«, erklärt Goodwin. »Wir können einen ganzen Prozess eliminieren, bei dem zu 96 Prozent radioaktiver Abfall entsteht, der vergraben werden muss; stattdessen bekommen wir unschädlichen, hundertprozentig recycelbaren Müll.«

Das Beryllium würde durch etwas ersetzt, »das man unbesorgt essen könnte«, fügt er hinzu. »Das Material ist in prothetischen Körperimplantaten enthalten. Es ist biologisch absolut harmlos.« Da die genaue Spezifikation geheim bleibt, darf Goodwin Art und Funktion der Substanz nicht verraten. Jedenfalls steckt in jeder Nuklearwaffe weiterhin Pluto-

## KOSTEN

► **6,5 Milliarden US-Dollar**  
Kosten des »Stockpile Stewardship«-Programms zur Instandhaltung des Nukleararsenals im Haushaltsjahr 2008

(Quelle: NNSA, Budgetantrag für 2008)

► **21 Milliarden US-Dollar**  
Kosten für den Austausch des gegenwärtigen Waffenarsenals

(Quelle: George Allen, Leiter des Office of Transformation, NNSA)

► **5,8 Billionen US-Dollar**  
Geschätzte Kosten für das nukleare Waffenprogramm der USA

(Quelle: Stephen Schwartz vom Brookings-Institut)

## VERTRAUEN IST GUT, KONTROLLE IST BESSER

**Den Anstoß für das Reliable Replacement Warhead Program** gaben Zweifel an der Zuverlässigkeit der alternden Nuklearwaffen. Manche befürchteten, die Plutonium-Pits würden mit der Zeit die thermonukleare Explosion eher behindern, statt sie auszulösen. Doch subkritische Tests, Computermodelle und andere Analysen haben diese Bedenken ausgeräumt. Das von der Regierung in Auftrag gegebene Jason-Gutachten einer unabhängigen Expertenkommission schätzt, dass die Plutonium-Pits in den derzeitigen W76-Sprengköpfen mindestens hundert Jahre halten werden. Jason empfiehlt daher, nur die routinemäßige Instandhaltung fortzusetzen – das heißt, Schaltungen und Bauteile falls nötig auszutauschen.

Einige Wissenschaftler – insbesondere Richard Morse, der früher Arbeitsgruppen für Bombendesign und Laserfusion am Los Alamos National Laboratory leitete – halten die W76-Konstruktion selbst für fehlerhaft. Der Uranmantel um den Kern sei zu dünn und könne die Energie der Initialexplosion nicht lange ge-

nug zusammenhalten, um die Fusionsreaktion für die Wasserstoffexplosion auszulösen.

Doch viele Wissenschaftler und Beamte halten nichts von diesem so genannten Morse-Effekt; sie verweisen auf mehrere erfolgreiche Tests des Waffenpakets in den 1980er Jahren. »W76 ist einwandfrei. Die Waffe besteht ihre jährliche Begutachtung«, betont Hank O'Brien, Leiter des RRW-Programms am Lawrence Livermore National Laboratory.

Allerdings könnte das Instandhaltungsprogramm selbst die Zuverlässigkeit gefährden. Der Austausch alternder Teile verändert die Waffe allmählich. »Selbst beim besten Willen kann ich den Zünder aus den 1980er Jahren heute nicht mehr liefern«, bemerkt J. Stephen Rottler, bei den Sandia National Laboratories zuständig für Waffenproduktion. »Je weiter man sich entfernt, desto größer wird die Unsicherheit«, so Rottler weiter. »Dann muss man die Waffe entweder aus dem Verkehr ziehen oder testen, und beides ist inakzeptabel.«



## DIE NÄCHSTE BOMBE WIRD GRÜN

Wie viel Zynismus ist nötig, um eine Atombombe als umweltfreundlich zu bezeichnen, weil ihr Herstellungsprozesses weniger toxische Abfälle hinterlässt? Wie lange hat jemand, der zufrieden verkündet, dass Teile der neuen Bombe biologisch harmlos seien, keine Bilder von Opfern mehr gesehen? Und auf wen will man sich verlassen, wenn sich das Gerede über Zuverlässigkeit nur darum dreht, dass der nukleare Overkill auch wirklich nicht am Material scheitert?

Bei der US-weiten Vermarktung seiner neuen Bombe wird das Pentagon nichts dem Zufall überlassen haben. Reden über Zerstörungskraft und »Megatote«, radioaktiven Fallout und generationenübergreifendes Siechtum? Natürlich nicht, auch das US-Verteidigungsministerium geht mit der Zeit:

»Little Boy« ist Geschichte, aber öko ist in und darum wird die nächste Bombe grün. Auch Angst braucht nun wirklich niemand mehr zu haben, schließlich haben wir sie bereits mit Mach 4 gegen die Wand geworfen, ohne dass sie explodierte.

**Die USA scheren sich nicht um den Rest der Welt:** Sie lassen Milliarden fließen, um ihr nukleares Knowhow zu verewigen, halten ihre Testeinrichtungen in Schuss und verweigern die Ratifizierung des Teststoppvertrags. Und sie haben uns mitgeteilt, was sie für eine Katastrophe halten: eine Atombombe nämlich, die versagt. Dieser Einschätzung muss sich niemand anschließen.

*Thilo Körkel*

### NUKLEARE KENNZIFFERN

- ▶ **15 Kilotonnen**  
oder 15 000 Tonnen TNT: Sprengkraft der 1945 über Hiroshima abgeworfenen Atombombe
- ▶ **50 Megatonnen**  
oder 50 Millionen Tonnen TNT: Sprengkraft der stärksten jemals gezündeten Bombe, der 1961 von der Sowjetunion getesteten Wasserstoffbombe »Zar«
- ▶ **1 bis 475 Kilotonnen**  
Sprengkraft der einsatzbereiten Waffen im US-Arsenal. »Boosts« (Verstärkungsmaßnahmen) können die Sprengkraft erhöhen.

US DEPARTMENT OF ENERGY / ANSAS - NEVADA SITE OFFICE





PAUL SHARRBROOK

NEWSCOM / ZUMA PRESS / US NAVY

nium, das bei unsachgemäßer Handhabung innerhalb von Stunden tödlich wirkt.

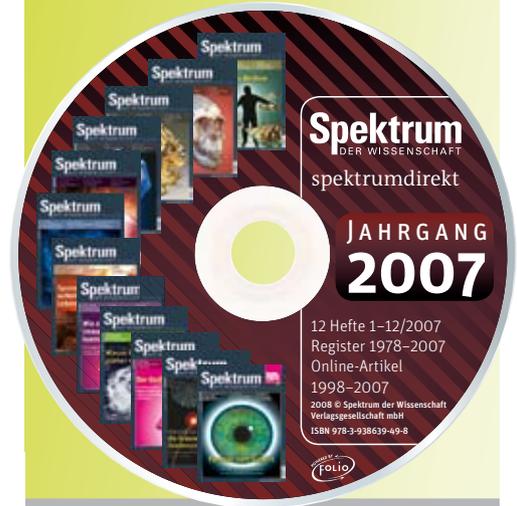
Für den Bau eines neuen Sprengkopfs müssten die Nuklearwaffenfabriken – beispielsweise Pantex in Amarillo (Texas), Kansas City Plant (Missouri) und Y-12 in Oak Ridge (Tennessee) – umgerüstet werden. Alle sind »Antiquitäten«, wie Goodwin sie nennt; manche stammen aus den 1940er Jahren. Im April 2007 enthüllte die Bush-Regierung Pläne für den Bau einer Anlage, in der sämtliche Komponenten der neuen Sprengköpfe entstehen sollen; nach dem geplanten Jahr ihrer Fertigstellung heißt sie Complex 2030.

Selbst wenn diese Pläne zurückgeschraubt werden, muss die gegenwärtige Infrastruktur modernisiert werden, damit das RRW-Programm ablaufen kann. Dem AAAS-Expertenrat zufolge müsste die Montage- und Demontearbeit in der Pantex-Anlage mindestens verdoppelt werden; die TA-55-Anlage in Los Alamos, die im Juli 2007 zum ersten Mal seit 18 Jahren mit der Herstellung neuer Primärsprengsätze begann, müsste die Produktion von Plutonium-Pits deutlich erhöhen. »Wir können zwar Plutoniumkomponenten fabrizieren, aber nur in ganz geringen Stückzahlen«, sagt Martin Schoenbauer, ein hochrangiger NNSA-Beamter. Die TA-55-Anlage »hat zu wenig Kapazität«.

Die Kritiker bezweifeln nicht nur die Notwendigkeit eines neuen Nuklearsprengkopfs, sondern warnen vor den enormen Kosten der dafür erforderlichen Infrastruktur, die zu dem Aufwand für die bereits geplante Generalüberholung der W76 und anderer Sprengköpfe hinzukämen. »Wenn man die Lebensdauer

**Das US-amerikanische Nukleararsenal umfasst neun Typen von einsatzbereiten Bomben und Sprengköpfen, darunter diese frei fallenden B83-Bomben (großes Bild). Sie alle müssen regelmäßig gewartet werden. U-Boote der Ohio-Klasse (kleines Bild) tragen W76-Sprengköpfe.**

# EIN STARKER JAHRGANG ...



... ist die CD-ROM 2007 von **Spektrum der Wissenschaft**. Sie bietet Ihnen alle Artikel (inklusive Bilder) des vergangenen Jahres im PDF-Format. Diese sind im Volltext recherchierbar und lassen sich ausdrucken. Eine Registerdatenbank erleichtert Ihnen die Suche ab der Erstausgabe 1978. Die CD-ROM läuft auf Windows-, Mac- und Unix-Systemen (der Acrobat Reader wird mitgeliefert). Des Weiteren finden Sie das **spektrumdirekt**-Archiv mit ca. 10000 Artikeln. **spektrumdirekt** und das Suchregister laufen nur unter Windows. Die Jahrgangs-CD-ROM kostet im Einzelkauf € 25,- (zzgl. Porto) oder zur Fortsetzung € 18,50 (inkl. Porto Inland). Erscheinungstermin ca. Mitte März 2008  
Bestellen können Sie über den Beihefter oder unter:

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

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH | Slevogtstraße 3-5 | 69126 Heidelberg | Tel. 06221 9126-743 | Fax 06221 9126-751 | service@spektrum.com



## DIE VERNICHTUNG BERLINS

**Die Druckwelle** einer in 900 Meter Höhe über dem Zentrum von Berlin gezündeten Wasserstoffbombe mit der Sprengkraft von einer Million Tonnen TNT (Trinitrotoluol) würde in einem Umkreis von fünf Kilometern alle Gebäude zerstören. Die gewaltige Hitze- welle im Gefolge der Detonation ließe großflächige Brände ausbrechen. Überall in der Stadt erlitten die Menschen schwerste Verbrennungen. Von radioaktivem Fall-out wäre die Stadt vergleichsweise wenig betroffen.

Würde dieselbe Bombe auf dem Boden gezündet, wäre der Zerstörungs- und Brandradius nur etwa 60 bis 90 Prozent so groß. Stattdessen jedoch würden Unmengen radioaktiver Partikel in Schwaden über die Stadt ziehen.

**FOLGEN EINER DETONATION IN DER LUFT**  
(Tabelle und Grafik enthalten Näherungswerte; der direkte Einfluss der Explosion reicht noch über die in der Karte gezeigten Gebiete hinaus).

### Stärke der Druckwelle [Kilopascal]

**60 kPa:** schwere Schäden an Gebäuden mit stählerner Tragkonstruktion

**34 kPa:** schwere Schäden an Gebäuden mit hölzerner Tragkonstruktion

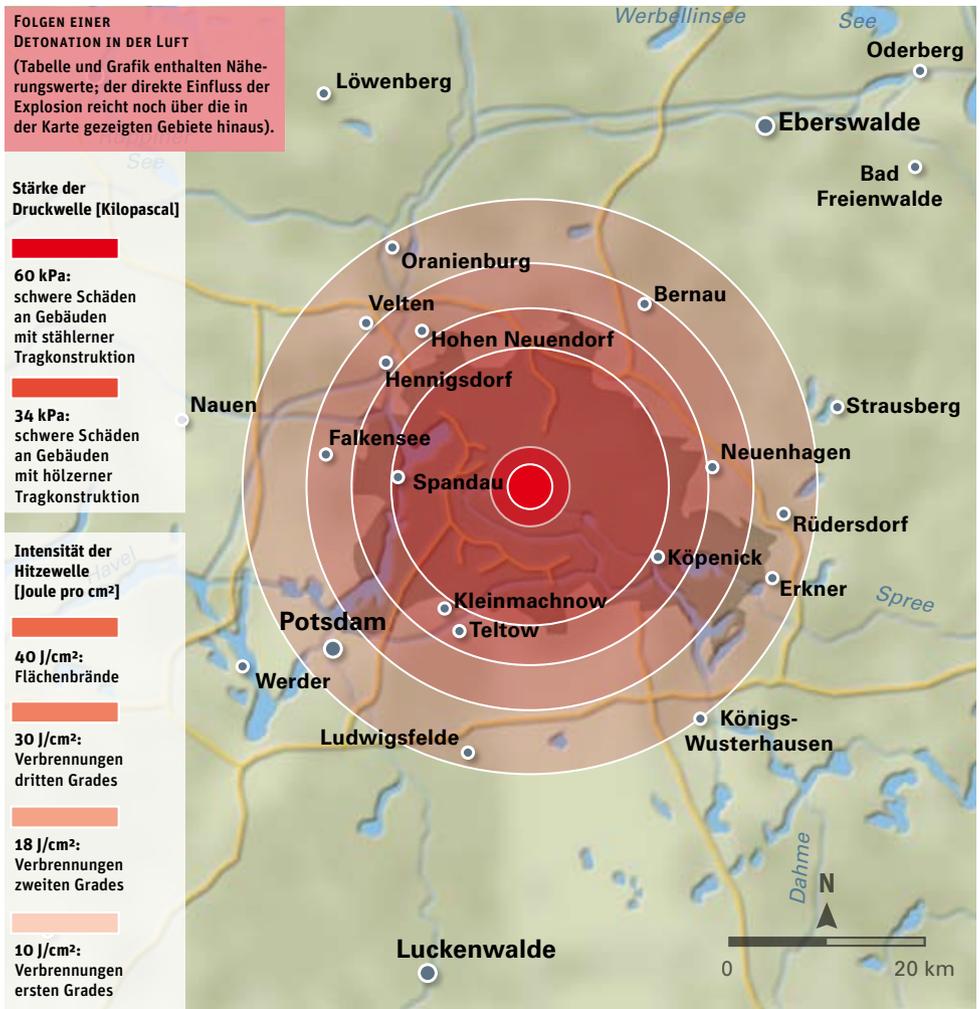
### Intensität der Hitzewelle [Joule pro cm<sup>2</sup>]

**40 J/cm<sup>2</sup>:** Flächenbrände

**30 J/cm<sup>2</sup>:** Verbrennungen dritten Grades

**18 J/cm<sup>2</sup>:** Verbrennungen zweiten Grades

**10 J/cm<sup>2</sup>:** Verbrennungen ersten Grades



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / ENDE-GRAFIK

der Waffen verlängern will, muss man den gesamten Produktionskomplex der 1970er Jahre wiederherstellen – eine enorme Investition in die Infrastruktur«, erklärt Goodwin. »Will man erneut in oft extrem unangenehme Technologien investieren? Oder will man mit kleinstmöglichem Aufwand ein ganz anderes, viel kleineres Abschreckungsarsenal unterstützen?«

Erschwerend kommt hinzu, dass niemand weiß, wie viel der RRW1-Sprengkopf oder das Complex-2030-Projekt kosten werden. Ein detailliertes Budget für das gesamte RRW-Programm wird erst vorliegen, wenn die Ingenieure ihre Schätzungen zusammengetragen haben. Vorher lässt sich nicht feststellen, ob das RRW-Programm gegenüber den 6,5 Milliarden Dollar, welche die Instandhaltung der Nukleararsenale im Haushaltsjahr 2008 erfordert, eine Ersparnis oder eine zusätzliche finanzielle Belastung bedeutet.

Die Produktion des W76-Ersatzes könnte 2012 beginnen, erklärt Rottler von den Sandia-Laboratorien, sofern der Kongress das Geld bewilligt. In dem Szenario, das die Bombenbauer bevorzugen, ersetzt RRW1 einen

Teil der W76-Sprengköpfe, die ansonsten bloß überholt würden. Dieser Austausch würde nach Meinung der AAAS-Experten Jahrzehnte dauern und »erhebliche zusätzliche Haushaltsmittel« erfordern.

»Im Budget 2007 bekam die NNSA 88 Millionen Dollar für die ersten Entwurfs- und Entwicklungsstufen von RRW1. Woher kam das Geld? Aus dem Auffrischungsprogramm für W80«, eine weitere Nuklearwaffe, erläutert Robert Nelson von der Union of Concerned Scientists, einer unabhängigen Gruppe amerikanischer Wissenschaftler. »Man macht sich Sorgen wegen der langfristigen Zuverlässigkeit der Arsenale, doch um das RRW-Programm zu bezahlen, sollen ausgerechnet die Programme gekürzt werden, welche die Zuverlässigkeit aufrechterhalten.« Außerdem schließt die Kürzung der Gelder zur Instandhaltung vorhandener Waffen andere Optionen aus: »Eine Kursumkehr wird unmöglich.«

Weitere Milliarden wird die Umrüstung der Produktionsinfrastruktur kosten, falls der Kongress das RRW-Programm und Complex 2030 bewilligt; darin sind sich Befürworter und Gegner einig. Sowohl republikanische

als auch demokratische Mitglieder des Unterausschusses für Energie und Wasserentwicklung im US-Repräsentantenhaus haben sich skeptisch über das im Juli 2007 von Energie- und Verteidigungsministerium vorgelegte Programm geäußert. »Obwohl viel Zeit und Energie in die Ermittlung des besten Entwurfs für einen neuen Nuklearsprengkopf geflossen sind, hat man sich offenbar wenig Gedanken über die Frage gemacht, warum die Vereinigten Staaten jetzt neue Sprengköpfe brauchen«, kritisierte Peter Visclosky, Abgeordneter aus Indiana und Vorsitzender des Unterausschusses, in einer schriftlichen Stellungnahme. »Ohne eine umfassende Verteidigungsstrategie, welche die künftigen Aufgaben, kommenden Bedrohungen und das zur Erreichung der strategischen Ziele erforderliche US-Nuklearwaffenarsenal definiert, ist es dem Kongress unmöglich, in verantwortungsvoller und wirksamer Weise Haushaltsmittel für das RRW-Programm zu bewilligen.« Zudem garantiert das Livermore-Laboratorium für den RRW-Sprengkopf keine längere Lebensdauer als für die vorhandenen Waffen; möglicherweise wird man in einigen Jahrzehnten erneut einen Ersatz für den Ersatz brauchen. Erneuern oder abschaffen?

### Eine verhängnisvolle Botschaft für den Rest der Welt

Denn der geplante Austausch von W76 gegen RRW1 ist nur der Anfang. »Wenn wir die Bestände wirklich reduzieren wollen, müssen wir uns das gesamte Arsenal vornehmen«, erklärte Steve Henry, ein hochrangiger Beamter für nukleare Angelegenheiten im Verteidigungsministerium, bei einer Präsentation der siegreichen Konstruktion. Das erfordert andere Prioritäten in den Waffenlabors und andere Fertigungskapazitäten. »Um technische Überraschungen und Veränderungen der geopolitischen Lage auffangen zu können, benötigt man eine flexible Infrastruktur. Erst diese Flexibilität erlaubt Kompromisse bei der Anzahl der Waffen«, sagte Henry weiter.

Chefplaner Harvey zufolge hat die NNSA bereits eine Machbarkeitsstudie für einen zweiten, speziell für Flugkörper konstruierten Austauschsprengkopf in Auftrag gegeben. Ein wahrscheinlicher Kandidat für den Ersatz durch diesen RRW2 wäre der W78-Sprengkopf, der auf landgestützten ballistischen Interkontinentalraketen sitzt, meint Kristensen. Dieser Typ ist fast ebenso alt wie W76 und ebenfalls nicht mit unempfindlichen Hochleistungssprengstoffen und Sicherheitssystemen ausgerüstet. Weder das Verteidigungs- noch das Energieministerium hat angedeutet,

wie viele RRW-Sprengköpfe letzten Endes nötig sein könnten.

Am stärksten dürfte sich das Waffenaustauschprogramm auf die globale Nuklearrüstung auswirken. Großbritannien, Frankreich, Russland und China verfolgen ähnliche Modernisierungspläne, aber die Konstruktion von RRW1 könnte der übrigen Welt eine verhängnisvolle Botschaft senden. »Wenn die stärkste Nation der Welt zu dem Schluss kommt, sie könne ihre vitalen Interessen nur schützen, indem sie neue Nuklearwaffen für neue militärische Aufgaben entwickelt, wäre das ein deutliches Signal für andere Nationen, dass Nuklearwaffen auch für ihre Sicherheit wertvoll oder gar notwendig sind«, konstatierte Sidney Drell, Physiker am Stanford Linear Accelerator Center und Experte für Rüstungskontrollfragen, im März 2007 auf einer Tagung der American Physical Society in Denver.

Infolgedessen plädieren die früheren US-Außenminister Henry Kissinger und George Shultz, Exverteidigungsminister William Perry sowie Exsenator Sam Nunn aus Georgia, vormals Vorsitzender des Streitkräfte-Senatsausschusses, für die Abschaffung solcher Waffen. »Wir unterstützen das Ziel einer atomwaffenfreien Welt und setzen uns nachdrücklich für die Maßnahmen ein, die notwendig sind, um dieses Ziel zu erreichen«, erklärten sie Anfang 2007 in einem Leitartikel des »Wall Street Journal«.

Letztlich liegt dem RRW-Programm vielleicht die Sorge zu Grunde, die USA könnten sonst die Fähigkeit einbüßen, Nuklearwaffen falls nötig auch fernerhin zu bauen und einsatzbereit zu halten. »Wir wollen die Wissenschaftler und Ingenieure trainieren«, sagt Harvey. »Die Leute, die das im Kalten Krieg aufgebaut haben, gehen in den Ruhestand. Jetzt muss die nächste Generation weitermachen, damit die ältere Generation sie noch anleiten kann.«

Der Physiker Bob Civiak, ehemals Haushaltsexperte im US-Office of Management and Budget, der für die Kontrolle des Bundeshaushalts verantwortlichen Behörde im Weißen Haus, fügt hinzu: »Unsere derzeitigen Sprengköpfe können größtenteils von den Produktionsstätten selbst gewartet werden. Damit bleibt den Labors nichts zu tun, und deshalb haben wir ein RRW-Programm.«

Der wahre Grund für das RRW-Programm ist also eher der »zuverlässige Ersatz« von Wissenschaftlern, Ingenieuren und Technikern – und deren fortwährende Fähigkeit, neue Nuklearwaffen zu bauen. Ob die Waffen selbst wirklich ersetzt werden müssen, ist eine ganz andere Frage. ◀



David Biello ist Online-Redakteur bei SciAm.com, der Webseite von Scientific American.

Pit lifetime. Mitre Corporation (Hg.), 2006. Als PDF-Datei verfügbar unter [www.fas.org/irp/agency/dod/jason/pit.pdf](http://www.fas.org/irp/agency/dod/jason/pit.pdf)

The Reliable Replacement Warhead Program: Background and current development. Congressional Research Service Report for Congress (Hg.), 2007. Verfügbar unter [www.fas.org/sgp/crs/nuke/RL32929.pdf](http://www.fas.org/sgp/crs/nuke/RL32929.pdf)

United States nuclear weapons program: The role of the Reliable Replacement Warhead. AAAS Center for Science, Technology and Security Policy (Hg.), 2007. Verfügbar unter <http://cstsp.aaas.org/content.html?contentid=899>

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/936501](http://www.spektrum.de/artikel/936501).



Hören Sie zu diesem Thema auch unseren Podcast **Spektrum Talk** unter [www.spektrum.de/talk](http://www.spektrum.de/talk)

# Läuten neue Nuklearsprengköpfe das Ende der Abrüstung ein?

Um die Zuverlässigkeit des US-Nukleararsenals zu erhalten, soll der so genannte »Reliable Replacement Warhead« gealterte Nuklearsprengköpfe ersetzen. Dies wird auch andere Staaten motivieren, in den Rüstungswettlauf einzusteigen.

Von Annette Schaper

Vor über einer Dekade gelang es der Genfer Abrüstungskonferenz nach jahrzehntelangen Bemühungen, einen Vertragstext über einen vollständigen Teststopp (Comprehensive Test Ban Treaty, CTBT) von Nuklearwaffen vorzulegen (siehe Spektrum der Wissenschaft 7/1997, S. 90). Maßgeblich an diesem Erfolg beteiligt waren die US-Amerikaner – damals wollten sie diesen Vertrag tatsächlich.

Der CTBT weckte hohe Erwartungen. An ihn knüpfte sich die Hoffnung, dass er den qualitativen Rüstungswettlauf beendete. Denn ohne Nukleartests würden sich keine neuen Nuklearsprengköpfe entwickeln lassen. Außerdem sollte der Vertrag verhindern, dass außer den etablierten Kernwaffenstaaten auch weitere Regierungen entsprechende Arsenale aufbauten. Zwar haben die ersten Nuklearsprengkörper in jedem Staat, der sie entwickelt hat, auf Anhieb funktioniert, zumindest weiß man nichts über gescheiterte Experimente. Als Waffen aber wären diese Prototypen heute unbrauchbar, da sie viel zu schwer sind und sich nicht mit Raketen transportieren lassen. Ein Möchtegern-Nuklearstaat müsste, bis er Nuklearsprengköpfe militärisch einsetzen kann, erst einmal eine Reihe von

Tests durchführen – und genau dies sollte der Teststopp verhindern.

Die Euphorie über den CTBT wich bald der Enttäuschung. Zwar fanden seither nur noch sehr wenige Nuklearexplosionen statt, und eine überwältigende Mehrheit aller Staaten unterzeichnete und ratifizierte den Vertrag. Aber dennoch ist er nicht in Kraft! Denn ein paar wenige, aber wichtige Länder lehnen den Teststopp ab und haben ihn noch nicht ratifiziert. Dazu gehören inzwischen insbesondere die USA selbst, obwohl sie ursprünglich die treibende Kraft hinter diesem Vertrag waren. China wartet mit der Ratifikation auf die USA. Auch acht weitere Ratifikationen stehen noch aus, nämlich die von Indien, Pakistan, Nordkorea, Ägypten, Indonesien, Iran, Israel und Kolumbien.

Die US-Regierung investiert derzeit Milliardenbeträge in ihren Nuklearkomplex, baut ihre Testgelände aus, führt dort »unterkritische Tests« durch und verfolgt Pläne für den Bau eines neuen Sprengkopfs, des Reliable Replacement Warhead (RRW). Stehen wir also doch wieder vor einem unbegrenzten Rüstungswettlauf? Benötigen die USA wirklich neue Sprengköpfe? Und wird es wieder zu umfangreichen Nukleartestserien, zu Aufrüstung und Weiterverbreitung von Kernwaffen kommen?

Übersät von Kratern ist das Testgelände der USA in Nevada (rechts). Der Krater (links) entstand im Juli 1962, als rund 200 Meter unter der Erdoberfläche die Explosion einer 100-Kilotonnen-Bombe stattfand. Er ist knapp 100 Meter tief.



BEIDE FOTOS: US DEPARTMENT OF ENERGY / NNSA - NEVADA SITE OFFICE

Um sich Antworten auf diese Fragen zu nähern, sollte man sich die Vorgeschichte des RRW anschauen, die wiederum mit der Vorgeschichte des CTBT zusammenhängt. Als sich die US-Regierung Anfang der 1990er Jahre für den Teststopp entschied, war sie der Ansicht, dass qualitative Weiterentwicklungen von Nuklearsprengköpfen nicht mehr nötig seien. In den zahlreichen Debatten, zu denen es in den USA kam, stellte allerdings niemand in Frage, dass die existierenden Sprengköpfe weiterhin gewartet werden müssten. Ihre Zuverlässigkeit und Unfallsicherheit muss auch in Zukunft garantiert bleiben.

### Müssen Tests wirklich sein?

Bis zum Teststopp ließ sich dies mittels nuklearer Explosionen gewährleisten. Teststoppgegner führten daher an, dass Tests auch weiterhin nötig seien. Umfangreiche Expertenstudien zeigten jedoch, dass diese Ziele auch mit anderen Mitteln erreicht werden können, nämlich mit Hilfe von Teilkomponententests, Computersimulationen und weiteren Experimenten, bei denen die physikalischen Vorgänge während einer Nuklearexplosion teilweise simuliert werden (siehe »Virtuelle Nukleartests«, Spektrum der Wissenschaft 1/2000, S. 60).

Die Entscheidung, Verhandlungen über den CTBT aufzunehmen, ging in den USA daher mit einem Tauziehen zwischen politischen Akteuren und Lobbyisten der Kernwaffenlabors einher. Letztere sahen ihre Zukunft gefährdet, da ihr interessantestes Experiment – der Nukleartest – ihnen nicht nur Fördergelder, sondern auch die Elite des wissenschaftlichen Nachwuchses bescherte.

Um bei politischen Akteuren und Lobbyisten der Kernwaffenlabors für höhere Akzeptanz des CTBT zu sorgen, legte die damalige US-Regierung unter Bill Clinton zeitgleich zum Verhandlungsbeginn ein umfangreiches Programm auf. Das Science Based Stockpile Stewardship diente der Wartung des Arsenal und umfasste nicht nur äußerst großzügige Projektförderprogramme in Höhe vieler Milliarden US-Dollar. Auch eine weitere Pflege der Testgelände gehörte dazu, die dortigen Gebäude und andere Einrichtungen werden also in Stand gehalten und das Personal weiterbeschäftigt. Offiziell dient das Stockpile Stewardship nicht der Entwicklung neuer Kernwaffen, sondern garantiert die Sicherheit und Zuverlässigkeit des existierenden Arsenal auch in der Zukunft. In kleinerem Umfang betreiben die anderen Kernwaffenstaaten zwar ähnliche Programme, pflegen aber ihre Testgelände nicht mehr.

Die wichtigsten Komponenten des US-Programms sind eine neue Anlage für Inertial-

fusionsexperimente (Kosten: mehrere Milliarden Dollar), eine Anlage für die Röntgendiagnostik von Sprengköpfen (einige hundert Millionen Dollar) sowie Supercomputer für Simulationen und subkritische Tests. Die Fusionsanlage NIF (National Ignition Facility) wird im nordkalifornischen Livermore bereits gebaut und soll der Simulation von Kernwaffenexplosionen dienen. Zu diesem Zweck werden Pellets, meist aus Deuterium und Tritium, mit Hilfe geballter Laserenergie in ein extrem heißes und dichtes Plasma verwandelt. Darin herrschen Bedingungen, die an jene während einer Kernexplosion heranreichen sollen. Die Röntgenblitzanlage erlaubt die Analyse von Implosionsvorgängen entsprechend denen, die auch bei der Zündung von Nuklearwaffen ablaufen. Mit Hilfe von Explosivstoffen werden Festkörper dabei höchstem Druck ausgesetzt. Röntgenaufnahmen helfen schließlich, die in den Festkörpern ablaufenden Prozesse zu untersuchen und Rückschlüsse auf das weitere Funktionieren eines Sprengkopfs zu ziehen. Subkritische Tests schließlich sind Experimente mit Plutonium, bei denen sich die nukleare Kettenreaktion nicht selbst aufrechterhält. So lassen sich, ohne dass es zu einer Explosion kommt, die Materialeigenschaften von (gealtertem) Plutonium untersuchen.

Der irreführende Begriff »Test« rief allerdings schon politische Irritationen hervor. Zu dieser Provokation kommt hinzu, dass die Experimente in unterirdischen Kammern des ehemaligen Testgeländes in Nevada stattfinden. Aus logistischen und aus Kostengründen wäre es zwar günstiger, sie überirdisch durchzuführen, doch so lässt sich auch die Funktionsfähigkeit der Einrichtungen auf dem Testgelände überprüfen. Zum einen demonstrieren die USA also, dass die »Nevada Test Site« betriebsfähig ist, zum anderen wecken sie aber international den Verdacht, dass unterirdisch vielleicht doch kleine Nuklearexplosionen unterhalb der seismischen Nachweisgrenze stattfinden. Denn solange der CTBT nicht in Kraft ist, sind Vor-Ort-Inspektionen nicht möglich.

Die vierte wichtige Komponente des Programms sind Computersimulationen. Sie greifen vor allem auf Daten zurück, die während der bislang über 2000 Nukleartests gesammelt wurden. Mit ihrer Hilfe lassen sich insbesondere Sprengköpfe überprüfen, die bereits umfangreich getestet worden sind. Weniger zuverlässig wären Berechnungen neuer Designs, zu denen es noch keine Daten aus Experimenten gibt.

Und welche Rolle spielt der Reliable Replacement Warhead? Allein das Stockpile Ste-



**10 Meter beträgt der Durchmesser der sphärischen Kammer im Inneren der National Ignition Facility. Hier werden bei Inbetriebnahme der Anlage 192 Laserstrahlen auf Deuterium-Tritium-Pellets treffen, um darin eine Fusionsreaktion auszulösen und Bedingungen zu schaffen, die an jene während einer nuklearen Explosion heranreichen.**

**Unterirdische subkritische Tests wecken international den Verdacht, dass vielleicht doch kleine Nuklearexplosionen stattfinden**



**Dringende Aufforderung: Die Schlussdeklaration der jüngsten internationalen Konferenz zum nuklearen Teststoppvertrag, die am 17. und 18. September 2007 in der Wiener Hofburg stattfand, forderte mit Nachdruck, dass der Vertrag endlich von allen 195 Staaten unterzeichnet wird. Bis Januar 2008 haben ihn 18 Staaten noch nicht unterzeichnet und 54 noch nicht ratifiziert.**



CTBTO



**Annette Schaper** ist Physikerin und wissenschaftliche Mitarbeiterin der Hessischen Stiftung Friedens- und Konfliktforschung (HSFK) in Frankfurt am Main. Sie widmet sich insbesondere Fragen der Rüstungskontrolle, der Abrüstung und der Nichtverbreitung von Atomwaffen.

Nuclear Weapons Research and Modernization Without Testing – The CTBT in danger? Von Giorgio Franceschini und Annette Schaper. Report Nr. 77, Hessische Stiftung Friedens- und Konfliktforschung (Hg.), Frankfurt 2006. Online unter [www.hsfk.de/fileadmin/downloads/prif77\\_01.pdf](http://www.hsfk.de/fileadmin/downloads/prif77_01.pdf)

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/936502](http://www.spektrum.de/artikel/936502).

wardship, so die RRW-Befürworter, könne die langfristige Zuverlässigkeit des Arsenalns nicht ausreichend sichern. Die existierenden Sprengköpfe seien sehr genau auf bestimmte technische Parameter abgestimmt, schon kleine Änderungen könnten zu großen Abweichungen bei der erwarteten Funktion führen. Deshalb sei es nötig, einen »robusteren« Sprengkopf zu entwickeln, nämlich einen, der zwar auf dem existierenden Design beruht, bei dem aber Alterungseffekte wegen größerer Toleranzen keine Rolle mehr spielen.

Einer dieser Alterungseffekte ist eine Folge des radioaktiven Zerfalls. Dadurch verändern sich Zusammensetzung und Kristallstruktur des in einem Sprengkopf eingeschlossenen Plutoniums. RRW-Befürworter bezweifeln, dass die nukleare Kettenreaktion auch in gealtertem Plutonium wie geplant abläuft. Vor einem Jahr jedoch veröffentlichten die renommierten »Jasons«, eine Kommission unabhängiger Kernwaffenspezialisten, eine entsprechende Studie. Sie kamen zu dem Schluss, dass Waffenplutonium bis zu hundert Jahre lang funktionsfähig bleibt.

Auch das Argument, dass man nur neue Sprengköpfe vor unbefugtem Zugriff sichern könne, scheint widerlegt: Dieses Problem wurde bereits vor Jahrzehnten erkannt, und schon seit vielen Jahren ist das amerikanische Nukleararsenal daher größtenteils mit elektronischen Sperren ausgestattet, so genannten Permissive Action Links (PALs).

Die Argumente, die den RRW rechtfertigen sollen, stehen also auf tönernen Füßen. Die tatsächlichen Gründe, die für ihn sprechen, dürfen wohl nicht in den offiziellen Verlautbarungen gesucht werden. Naheliegend sind die Kontinuität und künftige Attraktivi-

tät der Arbeit in den Waffenlaboren ebenso wie die Trägheit von Politikern, die sich außer Stande sehen, sich von alten Vorstellungen zu lösen.

Die Befürworter des RRW sind in denselben politischen Kreisen zu finden, die auch den Teststopp ablehnen. Sollte es wirklich zu einer Entscheidung für den RRW kommen, würden sie sich vermutlich auch für die Wiederaufnahme von Nukleartests einsetzen. Damit wäre dem CTBT endgültig der Todesstoß versetzt. Aber die Opposition in den USA hat beachtlichen Einfluss, und der Kongress verweigert die beantragten Fördermittel regelmäßig.

### Endgültiger Todesstoß für den CTBT?

Benötigt wird der RRW offensichtlich nicht und um ein wirklich neues Design handelt es sich auch nicht. Unterdessen fordern andere westliche Regierungen, darunter die Bundesregierung, das Inkrafttreten des CTBT.

Doch allein schon die Pläne für den RRW üben verheerende Wirkung auf die internationale Gemeinschaft aus. Zusammen mit der Weigerung der USA, den CTBT zu ratifizieren, und ihrer Ablehnung weiterer Rüstungs- und Abrüstungskontrollverträge entsteht der Eindruck, für die USA zählten in der internationalen Politik nur die eigene Stärke, nicht aber Verpflichtungen, die auf Gegenseitigkeit beruhen. Dies motiviert wiederum andere Staaten, ihre Außenpolitik nach ähnlichen Prinzipien zu gestalten. In Gefahr gerät dadurch nicht nur die Abrüstung, sondern auch die Nichtverbreitung von Kernwaffen. Es wäre nicht überraschend, wenn wir es in ein paar Jahren mit weiteren Problemfällen wie dem Iran und Nordkorea zu tun bekämen. <

## ZOOLOGIE

## Grenzgängerin zwischen Kunst und Wissenschaft

Katharina Schmidt-Loske hat bislang unbekannte Bilder und Neues aus dem Leben der Maria Sibylla Merian zu Tage gefördert.

Nicht umsonst zierte das Porträt Maria Sibylla Merians (1647–1717) den letzten 500-DM-Schein. Sie war nicht nur eine herausragende Malerin; insbesondere ihre Beobachtungen zur Metamorphose der Insekten begründen ihren Rang als bedeutende Naturforscherin.

Nach dem frühen Tod ihres Vaters Matthäus Merian (1593–1650) lernte sie bei ihrem Stiefvater Jakob Marrel das Zeichnen und Kupferstechen. Sie heiratete den Nürnberger Künstler Johann Graff und zog 1670 mit ihm in dessen Heimatstadt. Die Familie übersiedelte 1682 nach Frankfurt am Main; Maria Sibylla trennte sich von ihrem Mann und nahm wieder ihren Mädchennamen an. Im Jahr 1691 zog sie mit ihren Töchtern nach Amsterdam; dort fand sie eine Mäzenin namens Agnes Block, die ihr Aufträge gab.

Am liebsten malte sie Pflanzen und Tiere, und zwar mit Wasserfarben aus eigener Fertigung. Zu der Beobachtung lebender Exemplare – die Vereinigte Ostindische Handelscompagnie importierte etliche exotische Pflanzen und Tiere – kam eine gute Kenntnis der naturwissenschaftlichen Literatur. Einige Tiere hat sie selbst in Branntwein präpariert, darunter ein Krokodil, Schlangen und Leguane, einen Gecko und eine Schildkröte.

Von 1699 bis 1701 unternahm diese mutige Frau eine große Reise nach Surinam (Niederländisch-Guayana). Dort malte sie vor allem Insekten, Seidenraupen, aber auch Vögel und andere Wirbeltiere. Sie beobachtete die Natur sorgfältig und ließ sich von Indianern, später auch von einem Amsterdamer Biologen, über die Lebensweise ihrer Objekte beraten. Das half ihr, sie wie lebendig darzustellen, selbst wenn einem präparierten Insekt ein Bein oder einem Krebs eine Schere fehlte.

Sie selbst hat ihre Arbeit im Sinn der natürlichen Theologie ihrer Zeit motiviert. In ihrem Werk über die Raupen schrieb sie: »Suche demnach hierinnen nicht meine,

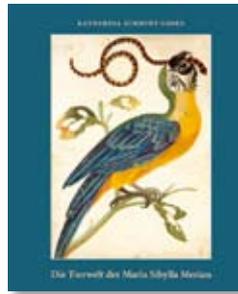
sondern allein Gottes Ehre, Ihn, als den Schöpfer auch dieser kleinsten und geringsten Würmer zu preisen.«

Besonders fesselte sie die Metamorphose verschiedener Froschlurche und vor allem der Insekten mit ihren verschiedenen Stadien des Reifens, die Verpuppungen und Häutungen. Erstaunt sah sie zu – und hielt im Bild fest –, wie die Larve von Häutung zu Häutung dem geschlechtsreifen Tier immer ähnlicher sieht.

Eine ihrer großformatigen Bildtafeln aus Surinam (Bild unten) zeigt eine Vogelspinne, die offenbar einen Kolibri getötet hat und ihn nun aussaugt. Konnte die Malerin das tatsächlich beobachtet haben? Lange Zeit war dies umstritten. Erst im 20. Jahrhundert haben Zoologen diese Beobachtung bestätigt.

Maria Sibylla nahm mit ihren künstlerischen Darstellungen großen Einfluss auf Naturmaler und -forscher der folgenden Generation. Carl von Linné (1707–1778), der Begründer der biologischen Systematik, hat etliche seiner Artbeschreibungen auf ihre Vorarbeiten gegründet, wie er selbst angibt. Bei der Benennung von Faltern übernahm er dabei auch Irrtümer, die sich bis heute in der wissenschaftlichen Nomenklatur erhalten haben; Entomologen haben dies später bedauert.

Katharina Schmidt-Loske hat in ihrer Dissertation, aus welcher der vorliegende



**Diese Zeichnung Merians von 1705 verschaffte der Vogelspinne ihren Namen.**

großformatige Bildband hervorgegangen ist, zahlreiche Unklarheiten und Widersprüche mit Hilfe neuer Forschungsergebnisse sorgfältig geprüft und Irrtümer deutlich gemacht. Sie hat auf diese Weise einige Forschungslücken geschlossen und dabei Fragen geklärt, die nur aus einer Zusammenschau von Biologie und Kunstgeschichte zu beantworten waren.

Im Gegensatz zu den bisherigen, sehr unterschiedlichen Urteilen über Maria Sibylla Merian, die zwar ihren künstlerischen Rang preisen, aber für ihre naturwissenschaftlichen Leistungen nur wenig gute Worte finden, kommt Schmidt-Loske zu dem Ergebnis, dass Maria Sibylla auch neue biologische Kenntnisse erworben hatte; das lässt sich am besten an bislang unveröffentlichten Ab-

bildungen vor allem von Froschmetamorphosen nachweisen.

Dabei hat sie aus Quellen an vielen Orten geschöpft – darunter das British Museum, das Museum Amsterdam und das Germanische Nationalmuseum in Nürnberg –, sie hat Bilder zusammengetragen und in leuchtenden Farben wiedergegeben, auch Darstellungen von Insekten und Amphibien, die bislang äußerst selten zu sehen waren. In der grafischen Sammlung des British Museum fand sie ein Album mit 160 großenteils unbekanntem Aquarellen und ein Konvolut von Insektenbildern des Frankfurter Malers Georg Flegel (1568–1638), zu dessen Schülern auch Maria Sibyllas Stiefvater Marrel gehörte. Viele dieser Werke werden hier erstmals veröffentlicht.

Jeder Biologe, jeder Kunstsinnige und jeder Naturliebhaber wird diesen Bildband ohne Zweifel mit Entzücken und Gewinn studieren.

*Manfred Vasold*

Der Rezensent ist Biologe und promovierter Historiker; er arbeitet seit zwanzig Jahren als Publizist mit Schwerpunkt Medizingeschichte. In dieser Zeitschrift hat er zuletzt den Artikel »Lausige Zeiten« (6/2007, S. 24) veröffentlicht.

Katharina Schmidt-Loske

**Die Tierwelt der Maria Sibylla Merian (1647–1717)**

Arten, Beschreibungen und Illustrationen

Basiliken-Presse, Marburg 2007.

238 Seiten, € 96,-

CHEMIE/BIOLOGIE

## Nicht ganz die »Sendung mit der Maus«

Aber manche »Sach- und Spaßgeschichten« sind wirklich sehr gelungen.

Unsere Haut, Tränen und Speichel sind die »Türen«, unser Immunsystem die »Türsteher« unseres Körpers, die Viren, Bakterien und andere Eindringlinge abwehren sollen. Doch die Krankheitserreger wissen diese Barrieren trickreich zu überwinden. »Schläfer« wie etwa das HI-Virus verstecken sich mit Tarnanzügen aus kopierten Proteinen zum Teil jahrelang in unserem Körper. Dagegen setzen die Erreger der Diphtherie auf die Überrumpelungstaktik und vermehren sich so schnell, dass sie längst beim nächsten Wirt gelandet sind, bevor die Immunabwehr sich mit ihnen angemessen beschäftigen kann.

Verständlich erklärt Susanne Liedtke in ihrem Artikel »Leben und sterben lassen« die komplizierte Beziehung zwischen Mensch und Mikrobe. Die Diplombiologin und Wissenschaftsjournalistin aus Jena spricht, vom Begriff »Wirt« herleitend, sehr gelungen von den Mikroben als »Gästen« und dem menschlichen Körper als »Gaststätte«. Denn die Kleinstlebewesen sind keineswegs immer nur schädlich. In unserem Verdauungssystem sind sie in Form der in vielen Jogurt-Werbepots beschworenen »Darmflora« aktiv. Auch hat das menschliche Genom im Lauf der Evolution 500 Retroviren in sich eingebaut, sodass aus den

einstigen Zwischenmietern dauerhafte Familienmitglieder wurden. Vielleicht waren unsere heutigen Symbionten – also die nützlichen Mikroben in unserem Körper – einst sogar pathogen, und wir haben uns nur im Lauf der Evolution mit den unerwünschten »Gästen« arrangiert.

In »Expedition in die Wissenschaft« sind laut Verlag »die besten Geschichten unserer Erfolgsautoren« versammelt. Und, in der Tat, die achtzehn Artikel weisen eine enorme Bandbreite auf, sowohl in Bezug auf die Themen als auch die Autoren.

Der Hongkonger Biotechnologie-Professor Reinhard Renneberg räumt mit einigen Mythen zum Thema Klonen auf. Hans-Jürgen Quadbeck-Seeger, Professor der Chemie, klärt uns darüber auf, dass Kunststoffverpackungen eine weitaus bessere Ökobilanz aufweisen als Mehrwegflaschen. Und Manfred Reitz zeigt in »Kunst und ärztliche Diagnostik«, dass man aus jahrhundertalten Kunstwerken recht präzise Krankheiten herauslesen kann – sowohl der Dargestellten als auch der Künstler selbst.

Andreas Sentker schließlich, Ressortleiter Wissen bei der »Zeit«, beschreibt in seinem kurzen Artikel das enge, aber auch ambivalente Verhältnis zwischen Mensch und Insekt – auf eine höchst amüsante und zu-



gleich informative Art und Weise: Wer weiß schon, dass weltweit alle 30 Sekunden ein Mensch an den Folgen eines Insektenstichs stirbt und dass Bienen, ein Inbegriff von Fleiß, bis zu 70 Prozent ihrer Zeit mit sinnlosem Abhängen im Stock verbringen?

Ein weiterer Höhepunkt ist der »Abgesang aufs Celluloid«: Der bekannte Chemiker, Historiker und Autor Otto Krätz lässt, kurz vor der endgültigen Digitalisierung des Kinos, 150 Jahre Filmgeschichte Revue passieren. Den Schwerpunkt legt er dabei auf die Rolle der Chemie und der Chemiker für das Kino – und im Kino. Gnadenlos selbstironisch stellt er fest, dass Naturwissenschaftler im Allgemeinen und Chemiker im Besonderen die wahren Kinoschurken sind, wie Dr. No, Dr. Jekyll (in seiner Rolle als Mr. Hyde) und Dr. Mabuse.

Leider sind die Beiträge von gemischter Qualität. Bei einigen fehlen die Quellenangaben, und gerade die komplexeren Themen sind teilweise sehr trocken bis schwer verständlich dargestellt. Ausgerechnet auf den ersten Beitrag trifft dies besonders zu: In »Zelle und Computer« vergleicht die Wissenschaftsjournalistin Claudia Borchardt das Informationssystem einer Zelle mit dem eines Computers. Ein interessanter Gedanke, den sie jedoch viel zu kompliziert ausführt.

Unglücklich gewählt ist auch der Untertitel: Bei »Sach- und Spaßgeschichten« erwarten viele sicherlich eine »Sendung mit der Maus« für Erwachsene. Doch dazu sind die Geschichten, bis auf die genannten Ausnahmen, nicht bunt genug – auch im Wortsinne: Die Diagramme sind zu klein und verwirren eher, als dass sie erhellen, und die

wenigen Karikaturen und Fotos wirken ebenfalls sehr sparsam.

Trotz der kleinen Minuspunkte überwiegt der positive Eindruck dank der genannten informativen und unterhaltsamen Beiträge. Sie eröffnen einem ganz neue Blickwinkel auf die Welt der Wissenschaften – und der Wissenschaftler. Sie zeigen die versteckten Bande zwischen Kunst und Medizin oder Film und Chemie. Und sie machen Lust auf echte Expeditionen in die Wissenschaft: zu Claude Monets Seerosenbildern, in deren einzigartigen Farbkompositionen zu erkennen ist, dass der Künstler jahrelang unter Grauem Star gelitten hat, oder auch nur ins Kino, um die vielen promovierten und habilitierten Bösewichte zu treffen.

Rosa Vollmer

Die Rezensentin ist Diplombiologin und arbeitet als freie Journalistin in Mainz.

Claudia Borchard-Tuch, Ute Deichmann et al.

#### Expedition in die Wissenschaft

Sach- und Spaßgeschichten aus Chemie und Biologie

Wiley-VCH, Weinheim 2006.  
296 Seiten, € 19,90

## ÖKOLOGIE

# Natur in der Stadt

Josef H. Reichholf leistet mit dieser Klarstellung zum scheinbaren Widerspruch zwischen »Stadt« und »Natur« einen attraktiven Beitrag zur Stadtökologie.

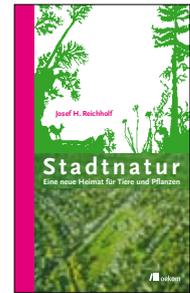
Josef H. Reichholf, Professor für Naturschutz an der Technischen Universität München und Leiter der Wirbeltierabteilung der Zoologischen Staatssammlung München, schöpft aus langjähriger wissenschaftlicher Erfahrung, wenn er sich im vorliegenden Buch mit der Ökologie seiner Heimatstadt beschäftigt. Gleich im Vorwort bekennt er sich zu der persönlichen Beziehung zu seinem Wirkungsort, das vorliegende Werk ist sein persönliches Anliegen, seine Auswahl an besprochenen Tier- und Pflanzenarten ist persönlich gefärbt – Aspekte, die dem Buch von Anfang an sympathische Züge verleihen.

Auf das erste Kapitel mit Faktenwissen über Städte als Ökosysteme (»Befunde«) folgen »Vorurteile«, die dem Leser die kritische Auseinandersetzung mit »Gerüchten« ermöglichen. So sei zum Beispiel

Stadtnatur eine nur zweitklassige Natur? Reichholf sieht das anders und weiß seinen Standpunkt zu begründen.

In »Unerwartetes« geht es unter anderem um die unbeliebten, aber intelligenten Stadtkrähen, die Mistel mit ihren Wirtspflanzen oder den Artenreichtum an Brutvögeln, jeweils in Relation zur Größe einer Stadt. Die spannend geschriebenen Aufsätze des folgenden Kapitels »Besonderheiten«, deren salopp formulierte Titel zum Lesen einladen, enthüllen Verblüffendes. Was mag sich wohl hinter »Unsichtbare Schönheiten« verbergen? Es geht um nachtaktive, mottenartige Schmetterlinge!

Alle Aufsätze sind reich bestückt mit gut recherchierten und belegten Daten, Fakten sowie Literaturquellen. »Berlin – Hauptstadt der Nachtigallen« beschränkt sich



# Beam dir deine Software!

Mit diesen Programmen erklärt sich die Steuer wie von selbst.

**5,- € Gutschein\***  
Gutschein-Code: „Steuersparaktion“



Steuererklärung in Bestzeit: führt kompetent durch alle Formulare und gibt hilfreiche Tipps.



Steuererklärung unglaublich einfach: schnell starten und eine Menge Geld sparen.



Der vielfache Testsieger mit nützlichen Extras: berechnet auch knifflige Steuerfälle.

Holen Sie sich Ihr Geld vom Fiskus zurück:  
Mit einem cleveren Steuerprogramm wird die Steuererklärung fast zum Kinderspiel.  
Dank intelligenter Menüführung sparen Sie Nerven, Zeit – und Geld.  
Jetzt Preisvorteil sichern und Programm direkt downloaden!

[www.softwareload.de/steuer](http://www.softwareload.de/steuer)

 **softwareload**

\*Den Gutscheincode können Sie bis zum 30.04.2008 bei Softwareload nur für die Produkte Steuer-Spar-Erklärung 2008, Taxman SE 2008 und WISO Sparbuch 2008 einlösen. Der Gutschein kann nicht bar ausbezahlt oder mit weiteren Gutscheinen kombiniert werden.

nicht etwa auf die Singvögel der Bundeshauptstadt, sondern bezieht auch ausführlich andere geografische Regionen wie die Stadt München und Ferienanlagen am Mittelmeer ein. »Die Rushhour bei Vögeln« liefert umfassende Informationen zum Zugverhalten von stadtypischen Vögeln. Dabei lässt es sich der Autor nicht nehmen, ironisch-kritisch diese wohlkoordinierte Verhaltensweise als eine »ungleich bessere Lösung« dem täglichen Stau im Straßenverkehr gegenüberzustellen.

Im Kapitel »Probleme« wendet Reichholf sich gestörten Wechselbeziehungen



Stadtfuchs auf einer Reifenhalde

und Gefahren zu, die in ähnlicher Form in vielen Großstädten anzutreffen sein dürften. Dass viele Tierarten in der Stadt besser gedeihen als auf dem Land, ist in seinen Augen unproblematisch bei den Enten – er verspottet sogar die Verfechter der Reinrassigkeit, die nach seinen Untersuchungen gar nicht gefährdet ist; es ist lästig bei den Nacktschnecken und ernsthaft problematisch bei den Mardern, die in zunehmendem Umfang Autoschläuche zerbeißen, den Füchsen, die Bandwürmer und Tollwuterreger übertragen, und den Igel, die Zecken verbreiten.

Unter »Ausblicke« bietet der Autor Prognosen zur Zukunft von Restbiotopen und -populationen, konstruktive Thesen zu Stadtentwicklung und Naturschutz mit Aufforderungscharakter und schließlich (»Natur erleben in der Stadt«) eigene Naturerlebnisse in München und Umgebung – einen affektiv gefärbten Lesetext von dem und für den Naturliebhaber.

Das Buch endet mit einem Aufruf an Biologielehrkräfte und Naturschützer, sich in den Stadtnatur-Schutz einzubringen und dabei das natürliche Interesse von Kindern und Jugendlichen an der Natur zu nutzen.

Die »Ganzkörper-Biologie« sollte sich im Unterricht nicht von den Genen und dem Ablauf der Photosynthese in den Hintergrund drängen lassen.

In allen Texten wird dem Leser die Komplexität ökologischer Beziehungen verdeutlicht. Reichholf wird durchgängig seinem eigenen Anspruch gerecht, den Blick für das Ganze zu wahren. Trotz der hohen Informationsdichte bleiben die Sätze zumeist kurz und stets klar strukturiert. Man muss wirklich kein Fachmann sein, um diesem Buch viel Wissenswertes zu entnehmen.

Je nach Interesse kann der Leser sich für einen der inhaltlich voneinander unabhängigen Aufsätze entscheiden oder – das dürfte bei diesem Werk der Fall sein – gleich die ganze »Stadtnatur« lesen.

Christiane Högermann

Die Rezensentin unterrichtet die Fächer Biologie und Französisch am Abendgymnasium Sophie Scholl in Osnabrück.

Josef H. Reichholf

#### Stadtnatur

Eine neue Heimat für Tiere und Pflanzen

Oekom, München 2007. 315 Seiten, € 24,90

## WELTWIRTSCHAFT

# Eingespernte Flüsse

Wasserknappheit durch Verschwendung könnte eine größere globale Krise auslösen als der Klimawandel.

Wie viel Wasser am Tag verbraucht der Durchschnittsdeutsche? Fünf Liter für Essen und Trinken? Oder 150 Liter inklusive Waschen und Toilette? Weit gefehlt: Jeden Tag nimmt ein normaler Bundesbürger tatsächlich mehrere tausend Liter der kostbaren Flüssigkeit in Anspruch, und das, ohne einen Swimmingpool sein Eigen zu nennen oder jeden Morgen sein Auto blitzblank zu putzen.

In seinem neuen Buch »Wenn die Flüsse versiegen« erklärt der mehrfach preisgekrönte britische Umweltjournalist Fred Pearce, wie er zu dieser beeindruckenden Zahl kommt: Für alles, was wir konsumieren, wird weit mehr Wasser in der Produktion aufgewendet, als im fertigen Produkt enthalten ist. Um ein Kilo Reis ernten zu können, müssen die Bauern bis zu 5000 Liter Wasser auf das Feld bringen. Ein Liter Milch schlägt mit 4000 Litern Wasser zu Buche, ein Kilo Camembert oder ein

kleines Rindersteak mit 5000. Eine Tasse Kaffee mit Zucker entspricht 150 Litern Wasser, ein Baumwollhemd ganzen 25 Badewannen voll.

Diese gewaltigen Fluten entziehen sich dem Blick des Käufers, sodass sich Ökonomen mit dem abstrakten Begriff »virtuelles Wasser« behelfen. Aber seinem Namen zum Trotz ist dieses Wasser real, und sein Verbrauch könnte für die Menschheit noch gefährlicher werden als der Klimawandel. Denn mit Produkten wie Baumwolle, Kaffee oder Rindern exportieren viele Staaten weitaus mehr davon, als Niederschläge oder Flüsse ihnen nachliefern.

Die Folge: Weltweit sinken die Grundwasserpegel und trocknen ganze Ströme, Seen und Sümpfe aus. Mit gigantischem Aufwand und häufig ohne Rücksicht auf ökologische oder soziale Risiken werden neue Staumauern errichtet, um das kostbare Nass auf seinem Weg aufzuhalten, zu



speichern und seiner – bisweilen fragwürdigen – Bestimmung zuzuführen.

Pearce reist diesen eingedämmten Flüssen seit Jahren nach, und er kann nur wenig Positives von Indus, Jangtse, Colorado, Niger und Themse berichten. Hydrologische Krisengebiete finden sich in Zentralasien und Südeuropa ebenso wie im Westen der Vereinigten Staaten, wo eine stets durstige Landwirtschaft immense Mengen H<sub>2</sub>O verschwendet, um in wüstenhaften Regionen wasserintensive Kulturen wie Tomaten oder Baumwolle zu ziehen. Und sie liegen in Mittel- und Osteuropa, wo Deiche die Flüsse einengen und diese sich mit Überflutungen kostenintensiv revanchieren.

Afrika bleibt vom Wassernotstand ebenso wenig verschont wie Asien, da hier wie dort gut gemeinter Ingenieurswille die Natur nur kurzzeitig unterwirft, die lokalen Kulturen aber oft dauerhaft zerstört. Diese Menschen haben sich über Jahrhunderte an die Besonderheiten ihrer Flüsse und Niederschläge angepasst, bis Dämme und Rohre plötzlich alles verändern. Der neue Überfluss ist jedoch selten von Dauer und geht oft auf Kosten der unmittelbaren Anlieger.

Den Fischern kommt die Beute abhandeln, flussabwärts gelegene Anrainer müs-

sen auf fruchtbare, angeschwemmte Sedimente für ihre Felder verzichten, und andere werden zwangsweise umgesiedelt, um Platz für Stauseen zu schaffen: Der Dreischluchten-Damm am Jangtse rief deshalb sogar in der chinesischen Volkskammer Widerstand hervor. Nur zu häufig sorgt dies für soziale Konflikte zwischen den Betroffenen auf dem Land und den städtischen Eliten, die eher von wasserbaulichen Maßnahmen profitieren, etwa in Indien, wo Proteste von Landwirten gegen einen amerikanischen Brause-Giganten international Schlagzeilen machten.

Etwas weit hergeholt erscheint allerdings die These des Autors, die Kriege zwischen Israel und seinen arabischen Nachbarn hätten ihren Ursprung auch im israelischen Durst auf palästinensisches oder syrisches Wasser gehabt. Allenfalls waren die Quellen des Jordan auf den Golanhöhen oder die Aquifere unter der Westbank eine willkommene Beigabe der Eroberungen. Für den nahöstlichen Friedensprozess ist es allerdings wenig hilfreich, dass Israel den Palästinensern untersagt, neue Brunnen anzulegen, oder dem Gazastreifen die Frischwasserzufuhr abschneidet.

Zukünftig könnte ein ähnlicher Krisenherd in Südasien lauern, wo Indien einen Induszufluss mit einem Staudamm zum Rinnsal macht und damit den Zorn Pakistans erregt. Und selbst zwischen den einander deutlich wohlgesonneneren Staaten USA und Mexiko brechen diverse Streitereien auf, da vertraglich vereinbarte Wasserzuweisungen an den Grenzflüssen angesichts verschärfter Dürren gegenwärtig nicht zu erfüllen sind.

Umdenken und Umsteuern wären also vonnöten. Und manchmal reicht ein Blick in die Vergangenheit, um der Wassernot abzuhelfen. In den chinesischen Gansu-Bergen etwa sammeln die Menschen wie ihre Vorfahren Regenwasser in eigens dafür hergerichteten Kellern. Zwischenzeitlich war diese Methode fast in Vergessenheit geraten, weil das Wasser aus modernen Leitungen und Brunnen kam. Doch während dieses durch sinkende Grundwasserspiegel immer seltener floss, bewahrten die Zisternen das Nass selbst über längere Trockenphasen hinweg. Heute besitzen 200 000 Haushalte entsprechende Auffangbecken, und ähnliche Ideen finden weltweit Nachahmer.

Selbst schwer in Mitleidenschaft gezogene Feuchtgebiete können sich wieder erholen. So erblühen Mesopotamiens Marschen seit dem Ende des letzten Golfkriegs. Es genügt, die rücksichtslose Politik Sadam Husseins rückgängig zu machen, der hier innerhalb weniger Jahre durch Drainage leblose Salzwüsten schuf, um die ihm verhassten schiitischen Marsch-Araber zu vernichten.

Inmitten des Nachkriegschaos bilden die wiederbelebten Sümpfe einen Schimmer der Hoffnung – auch für einen nachhaltigeren Umgang mit unserem wichtigsten Lebensmittel. Pearce trägt diesen Schimmer in seinem spannenden Buch gerne weiter. Denn was im verheerten Irak möglich ist, sollte auch dem Rest des Planeten gelingen.

Daniel Lingenhöhl

Der Rezensent ist promovierter Geograf und freier Wissenschaftsjournalist in Heidelberg.

Fred Pearce

**Wenn die Flüsse versiegen**

Aus dem Englischen von Gabriele Gockel und Barbara Steckhahn. Kunstmann, München 2007. 400 Seiten, € 24,90

## Exklusiv für Abonnenten

Ab sofort können Sie sich mit Ihrer Abonnen-tennummer unter [www.spektrum-plus.de](http://www.spektrum-plus.de) Ihren persönlichen Spektrum-Mitgliedsausweis herunterladen und erhalten damit Vergünstigungen bei den aufgelisteten Museen, Filmtheatern und wissenschaftlichen Einrichtungen:



**Spektrum**  
DER WISSENSCHAFT



**Spektrum Plus**  
MITGLIEDSAUSWEIS

---

**Max Mustermann**  
Kunden-Nummer:  
Ausweis-ID 1sd145dg4637834hd

Der Ausweis ist nur in Verbindung mit dem Personalausweis gültig.



Industriemuseum, Chemnitz / Neanderthal Museum, Mettmann / Auto & Technik Museum, Sinsheim / Technik Museum, Speyer / IMAX Classic Filmtheater, Sinsheim / IMAX DOME, Speyer / Deutsches Dampflokotiv-Museum, Neuenmarkt / Deutsches Hygienemuseum, Dresden / Deutsches Technikmuseum, Berlin / Zentrum für Multimedia, FH Kiel / Museum für Naturkunde, Magdeburg / Volkssternwarte und Planetarium, Recklinghausen / Umwelt-Museum Oberfranken, Bayreuth / Universum Science Center, Bremen / Deutsches Erdölmuseum, Wietze / Mathematikum, Gießen / Deutsches Museum, Bonn / Astronomisches Zentrum, Schkeuditz / Planetarium und Schulsternwarte, Herzberg / Planetarium, Freiburg / Turm der Sinne, Nürnberg / Urania, Berlin / Zepplin-Museum, Meersburg / Nicolaus-Copernicus-Planetarium, Nürnberg.

Schauen Sie doch einfach im Internet, was Sie erwartet!

## WISSENSCHAFTSTHRILLER

# Das Ende des Ölzeitalters

Wenn die großen arabischen Ölfelder versiegen, wird es turbulent zugehen in der Welt; aber diesen Roman wird die Realität an Spannung nicht übertreffen können.

Dem jungen Markus Westermann gelingt es, für ein halbes Jahr an einem Softwareprojekt in den USA mitzuarbeiten. Mit ungewöhnlichem Ehrgeiz geht er daran, sich derart zu profilieren, dass er in diesem Land bleiben kann, in dem er seinen Traum verwirklichen will, und nennt sich nun Mark Westman. Beinahe läuft alles perfekt.

Als aber sein Vertrag nicht verlängert wird und er eigentlich wieder heimreisen muss, läuft ihm ein Mann über den Weg, der verspricht, die Menschheit auch für die nächsten tausend Jahre mit Erdöl versorgen zu können. Markus glaubt ihm! Mit einer großen Menge Fremdkapital gründen sie ein sehr hoffnungsvolles Start-Up-Unternehmen, während zur selben Zeit das größte arabische Erdölfeld zusammenzubrechen und mit einem Domino-Effekt die Versorgungssicherheit der Zivilisation in den Abgrund zu reißen droht ...

So weit die Rückschau. Andererseits beginnt der Roman damit, dass Markus in der Gegenwart einen dramatischen Unfall erleidet, der ihn für entscheidende Wochen aus dem Gefecht zieht. Obendrein hat er die CIA und eine Milliardenklage am Hals, zuvor hat er sich von seiner Verlobten getrennt, und anscheinend geht alles so unendlich schief, wie man es sich nur denken kann.

Ein genialer Plot, brennende Aktualität, ein rasanter Anfang, und Kapitel für Kapitel eine Spannungssteigerung, so kennt man Eschbach. Kann er das durchhalten?

Der erste Teil des Buchs gewinnt seine Spannung dadurch, dass er gekonnt mit Rückschauen spielt und ein Schreckensszenario aufbaut. Einen Teil des Potenzials verschenkt der Autor, indem er mit zu vielen Nebenhandlungssträngen den roten Faden zerfasern lässt. Der Eschbach-Kenner weiß, dass sie zuletzt zu einem eleganten Gesamtkunstwerk verflochten werden – aber derweil drohen die Hauptperson und ihre Geschichte aus dem Blick zu geraten.

Der zweite Teil des Buchs beschreibt die Handlung von nun an chronologisch – doch der »Day After«, das Ende allen billigen Erdöls, ist da irgendwie schon vorbei und die Welt hektisch damit beschäftigt, sich mit den ständig steigenden Treibstoffpreisen zu arrangieren, mit neuen, aus heutiger Sicht

erschreckenden politischen und wirtschaftlichen Konsequenzen. In dieser Situation sucht Markus nach einem Ex-CIA-Agenten und einer Erfindung aus der Vergangenheit, die für die Zukunft wichtig sein könnte.

Eine der Stärken Eschbachs ist seine Sprache, die immer wieder gekämmt ist, bis sie sämtliche Fallen, die das Deutsche seinen Benutzern stellt, umgangen, alle barocken Schnörkel abgeschliffen hat und bewundernswert, beinahe angloamerikanisch klar erscheint, ohne dabei simpel zu wirken. Seine andere Stärke ist, absolut realistisch zu schreiben. Jeder Charakter, auch wenn er einem fernen Kulturkreis entstammt, entgegen glaubwürdig jedem Klischee. Zudem sind alle technischen und wissenschaftlichen Kleinigkeiten verblüffend exakt recherchiert. Wenn ich selbst nicht schon

## Selbst fünf Euro oder mehr für einen Liter Benzin werden irgendwann normal

Bohrungen geleitet hätte, wären mir beispielsweise winzige, nicht handlungsrelevante Unstimmigkeiten nicht aufgefallen.

Allerdings kann Eschbach die Wucht hinter seiner Konstruktion nur für das erste Viertel des Buchs durchhalten. Vor allem im zweiten Teil kann er sich dabei oft nicht entscheiden, ob er einen Thriller schreiben will, bei dem das Schicksal der Welt auf der Kippe steht, oder eine wissenschaftliche Abschlussarbeit über die drohenden Konsequenzen der Ausbeutung von Ressourcen. Stattdessen flüchtet er sich gelegentlich in die Beschreibung des trivialen Alltags jener, die tatsächlich seine alltäglichen Leser sein könnten. Glanz und Gloria weichen, es gibt eben keine Superhelden, und selbst fünf Euro oder mehr für einen Liter Benzin werden irgendwann normal. Mit dieser Gewissheit, einigen guten Zufällen zu viel und der Annäherung an die Realität beruhigt sich auch der Rausch an der Erzählung, leider zu früh.

Und das Ende der Welt, wie wir sie kennen? Es mag zu einem anderen Zeitpunkt kommen, weniger forsch, wahrscheinlich deutlich langsamer als beschrieben, und es



mag ein Zeitalter voll Unglück und verborgener Helden werden. Eschbachs Version ist durchdacht, erscheint jederzeit möglich und wirkt dadurch beklemmend.

Dieses Buch wäre um ein Drittel gekürzt noch besser gewesen. Aber es ist ein aktueller, empfehlenswerter Wissenschaftsroman vom Schlage Crichton oder Schätzing, den man mit Gewinn lesen kann.

Andreas Eschbach, geboren 1959 in Ulm, verarbeitet in diesem Thriller einen Teil seiner eigenen Erfahrungen: Bevor er 2003 in die Bretagne zog, lebte er 25 Jahre in Stuttgart und war Geschäftsführer einer EDV-Beratungsfirma. Seine schriftstellerische Karriere begann 1995 mit dem inzwischen zum Welterfolg gewordenen Buch »Die Haarteppichknüpfer«, in dem er den Leser in packende fremde Welten entführt. Während seine nachfolgenden Bücher – unter anderem »Das Jesus-Video« – noch mit Elementen der Sciencefiction oder Fantasy versetzt waren, darunter auch die Jugendbuchreihe »Das Marsprojekt« (Eschbach hat auch Luft- und Raumfahrttechnik studiert), wandte er sich danach hauptsächlich dem Mainstream und damit dem Hier und Jetzt zu.

Während sein Stil immer internationaler wird, werden seine Werke immer erfassbarer. Perfekt konstruierte Handlung, zahlreiche überraschende Wendungen, neue Blickwinkel auf aktuelles Weltgeschehen und interessantes Hintergrundwissen sind verantwortlich dafür, dass seine Bücher in der »Spiegel«-Bestsellerliste immer weiter nach oben klettern. Aber mir persönlich fehlt vor allem an diesem Buch das allerletzte Quäntchen an Verrücktheit. Eschbachs Charaktere verhalten sich zu brav und rational und immer entsprechend ihrer Rolle. Im wahren Leben dagegen sind Menschen gerne mal exaltiert, politisch unkorrekt, reagieren unvorhergesehen oder mäkeln selbst an wirklich guten Büchern.

Frank G. Gerigk

Der Rezensent ist Diplomgeologe und freier Redakteur mit Themenschwerpunkt Baubranche. Er lebt in Leinfelden-Echterdingen.

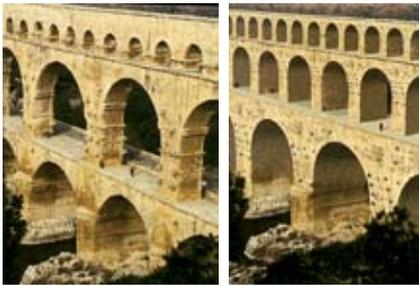
Andreas Eschbach

**Ausgebrannt**

Lübbe, Bergisch Gladbach 2007.  
750 Seiten, € 19,95

## Dialog zwischen Kunst und Wissenschaft

Die zweite Tagung der Deutschen Gesellschaft für Geometrie und Grafik bot ein buntes, heterogenes und interessantes Bild.



**Daniel Lordick hat den echten Pont du Gard (links) als quasi selbstähnliche Struktur nachempfunden (rechts).**

Geometrie – das ist der Teil der Mathematik, der nicht so entsetzlich abstrakt ist. Man kann ihre Objekte anschauen, in drei Dimensionen vielleicht anfassen, und wenn man es nicht zu genau nimmt, kommen sie sogar in der Natur vor.

Andererseits wirkt die Geometrie leicht etwas altbacken. Man lernt sie in der Schule immer noch im Wesentlichen nach dem Lehrbuch, das Euklid vor reichlich 2000 Jahren verfasste. Die zugehörigen Hilfsmittel Zirkel und Lineal riechen irgendwie nach Sekundarstufe I, man findet selten einen Erwachsenen, der sie beruflich anfasst, und seit Descartes uns lehrte, räumliche Beziehungen in Koordinaten auszudrücken, scheint die Geometrie ohnehin von den Kollegen von der abstrakten Algebra vereinnahmt und dort in guten Händen.

Das stimmt natürlich alles nicht ganz. Selbst wenn man von den Weiterentwicklungen absieht, die das normale Vorstellungsvermögen übersteigen – nichteuklidische Geometrien, hochdimensionale Räume –, ist die Geometrie bei Descartes nicht stehen geblieben. In Österreich, wo sie im Gegensatz zu Deutschland ein eigenständiges Fach ist, treibt die Beschäftigung mit ihr prachtvolle Blüten (Spektrum der Wissenschaft

3/2006, S. 92). Die Fraktale haben ihr einen neuen Schub gegeben, aus dem unzählige Bilder und eine zunehmende Anzahl von dreidimensionalen Objekten hervorgegangen sind. Die Entdeckung des umstülpbaren Würfels durch den Tüftler Paul Schatz öffnete den Weg zu einer Fülle zwangsläufig beweglicher Strukturen. Und die gewachsene Leistungsfähigkeit der Computer verschafft der guten alten Koordinatengeometrie massenhafte Beschäftigung: Reale Objekte wie das Innere des menschlichen Körpers und ausgedachte wie der Schauplatz des neuesten Computerspiels werden dem Betrachter präsentiert, indem ihr Bild aus Zehntausenden kleiner Dreiecke berechnet und jedes von ihnen mit ebenfalls berechneter Beleuchtung versehen wird.

Mit dem Ziel, diese und viele weitere, sehr unterschiedliche Pflänzchen zu hegen, hat sich 2003 die Deutsche Gesellschaft für Geometrie und Grafik (DGfGG) gegründet. Der vorliegende Band enthält die Vorträge ihrer zweiten Tagung, die vom 2. bis 4. März 2006 an der Hochschule für Künste in Bremen stattfand. Bei diesem Tagungsort leuchtet es ein, dass neben den Geometern vor allem diejenigen unter den Referenten zu finden sind, die berufsmäßig die Geometrie mit der Kunst zu verbinden haben: die Architekten.

Wenn die schriftliche Ausarbeitung die Tagung einigermaßen getreu wiedergibt, dann ist der Dialog zwischen Wissenschaft und Kunst ziemlich holprig verlaufen. Auf der einen Seite tragen wissenschaftliche Schwergewichte wie die Gruppe um den Hamburger Computer-Visualisierer Karl Heinz Höhne (Spektrum der Wissenschaft 4/1999, S. 54 und 9/2001, S. 46) oder der Wiener Geometrie-Professor Georg Glaeser den Stand der Forschung vor. Neues zur Umstülpungsgeometrie ist Thema einer ganzen Reihe von Referaten, die aber – wie sollten sie auch – mit Architektur nichts zu tun haben. Der Beitrag von Anna Rodenhausen zur fraktalen Geometrie berichtet immerhin über den Versuch, ein fraktales Bauwerk, nämlich das Tetraeder von Bottrop, mit einer Beleuchtung in Form einer fraktalen Kurve zu versehen. Das Projekt scheiterte an

den Kosten und an der Schwierigkeit, »den Verlauf der Kurve an diejenigen Personen, die sie materialisiert hätten, zu kommunizieren«.

Auf der anderen Seite preisen verschiedene Architekturprofessoren die Studienarbeiten ihrer Schützlinge, fügen aber derart viel allgemeines und wenig zum Thema passendes Gewölk hinzu, dass die – durchaus überzeugenden – Werke der Studierenden nicht dazu passen wollen. Belanglose Beiträge stehen neben bedeutenden.

Die Referate, die tatsächlich eine Brücke zwischen Geometrie und Architektur zu schlagen versuchen, kommen interessanterweise zu ernüchternden Ergebnissen. Ja, Architektur ist angewandte Koordinatengeometrie. Aber wer so konstruiert, wie es aus deren Blickwinkel am einfachsten erscheint, baut langweilige rechteckige Kästen. Die neueren CAAD (computer-aided architectural design)-Programme verstecken ihre Koordinatenbasis so weit wie möglich vor dem Benutzer, um diesem die Arbeit zu erleichtern, und geben ihm eine Fülle von Möglichkeiten zum Ausprobieren an die Hand. Und schon beklagt mancher Architekturprofessor, dass hinter den neuerdings einfach konstruierbaren aalglatten Oberflächen das geometrische Skelett des Bauwerks nicht mehr zu erahnen sei.

Mit etwas gutem Willen lassen sich der Pont du Gard, ein gotisches Kirchenfenster und diese oder jene Hausfassade als Fraktale auffassen; denn Elemente wie ein Brückenbogen wiederholen sich in mehreren verschiedenen Größen (Bild). Für ein richtiges Fraktal müssten es allerdings unendlich viele Größen sein. Dagegen sind in einem Bauwerk deren höchstens drei, allenfalls vier zu finden; mehr lässt das Material nicht zu. Also soll man sich von der fraktalen Geometrie für die Architektur nicht zu viel versprechen, so Daniel Lordick von der Universität Dresden.

Ja, dieser Dialog zwischen den Geometern und den Architekten steht erkennbar noch ziemlich am Anfang. Aber er ist durchaus viel versprechend.

*Christoph Pöppe*

Der Rezensent ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

Alle rezensierten Bücher können Sie in unserem Science-Shop bestellen

direkt bei: [www.science-shop.de](http://www.science-shop.de)  
per E-Mail: [shop@wissenschaft-online.de](mailto:shop@wissenschaft-online.de)  
telefonisch: 06221 9126-841  
per Fax: 06221 9126-869

Oliver Niewiadomski (Hg.)

**Geometrie, Kunst und Wissenschaft**

2. Tagung der Deutschen Gesellschaft für Geometrie und Grafik an der Hochschule für Künste Bremen

Hauschild, Bremen 2007. 384 Seiten, € 39,80



## Flüssige Teleskopspiegel

Teleskope mit rotierenden Spiegeln aus Quecksilber nehmen es mittlerweile mit den besten Instrumenten der Welt auf – und kosten gerade mal ein Zehntel

ACTION IMAGES, MICHAEL DESJARDINS

### WEITERE THEMEN IM MÄRZ

#### Entzündung und Krebs

Der genetische Schaden bei Krebs wirkt wie das Streichholz für den Brand, die Entzündung jedoch wie das Benzin, das ihn nährt

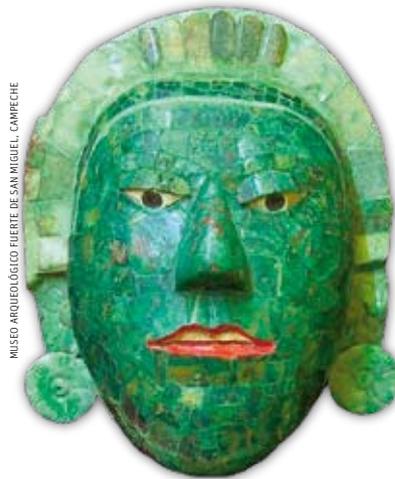
#### Verständige Affen?

Wie weit reicht die Intelligenz unserer Vetter? Finden sie kluge Lösungen manchmal allein durch Nachdenken?

Möchten Sie stets über die Themen und Autoren eines neuen Hefts auf dem Laufenden sein?

Wir informieren Sie gern per E-Mail – damit Sie nichts verpassen!

Kostenfreie Registrierung unter:  
[www.spektrum.com/newsletter](http://www.spektrum.com/newsletter)



MUSEO ARQUEOLÓGICO FUERTE DE SAN MIGUEL, CAMPECHE

#### Machtkämpfe im Land der Maya

Erbittert rangen die Gottkönige von Calakmul und Tikal über Jahrhunderte hinweg um die Vormacht unter den Maya-Staaten

#### Der amerikanische Weg ins Solarzeitalter

Es ist machbar, sagen drei ausgewiesene Experten: Mit Hilfe von Sonnenenergie könnten die USA bis 2050 unabhängig von Ölimporten werden und die Emission von Treibhausgasen drastisch reduzieren



KENN BROWN UND CHRIS WHEEN, MONOLITHIC STUDIOS