



ERDE 3.0

# Spektrum

DER WISSENSCHAFT

- ▶ DESERTEC
- ▶ SOLARZELLEN
- ▶ SPRIT AUS GRAS

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC AMERICAN

Spektrum  
DER WISSENSCHAFT  
09/09  
SEPTEMBER 2009

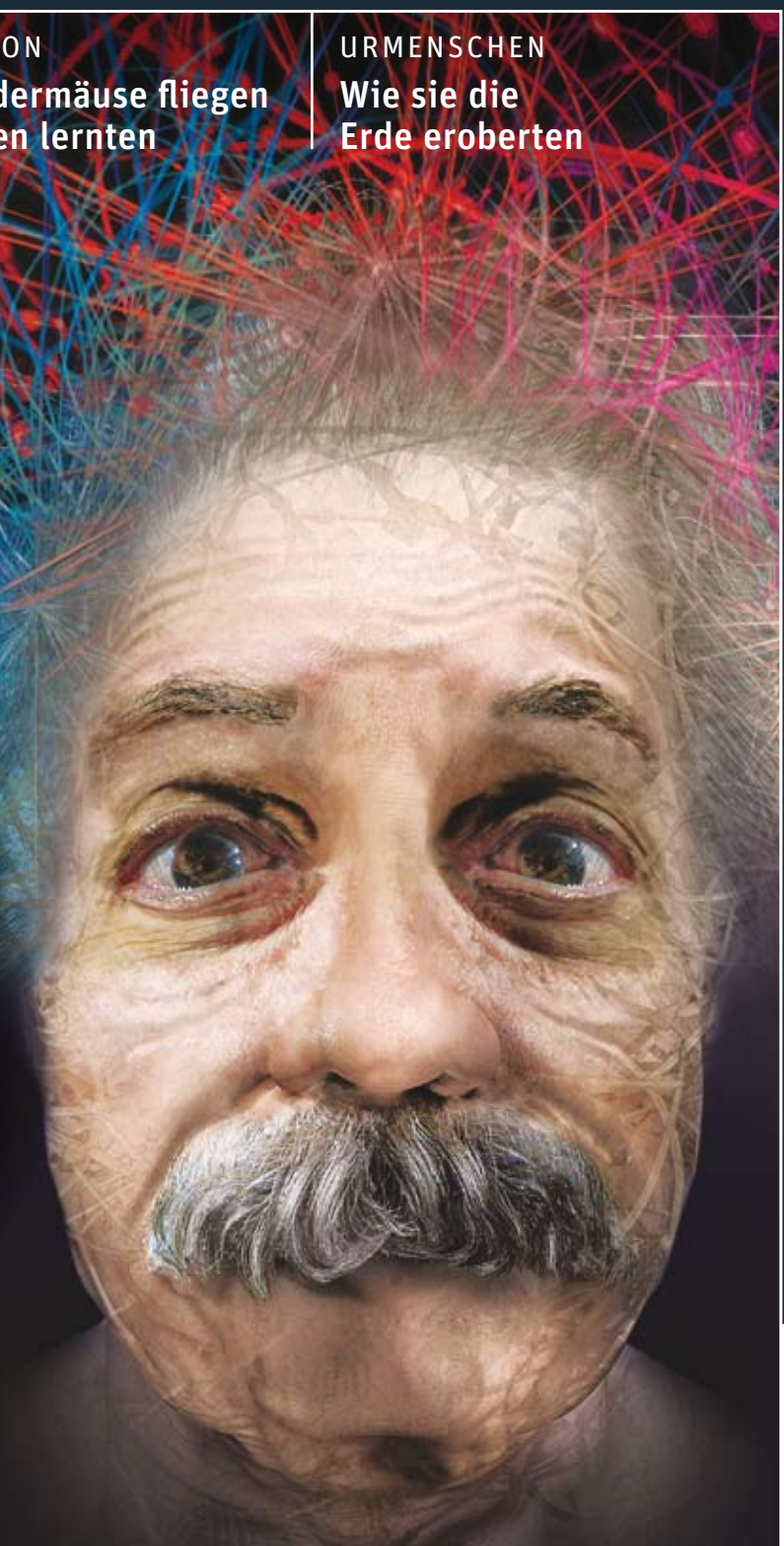
**NIKOTIN**  
Je früher, desto stärker die Sucht

**EVOLUTION**  
Wie Fledermäuse fliegen und jagen lernten

**URMENSCHEN**  
Wie sie die Erde eroberten

## Wo Einstein irrte

Quantenparadoxien relativieren das Kausalitätsprinzip



7,40 € (D/A) · 8,- € (L) · 14,- sFr.  
D6179E



www.spektrum.de





Reinhard Breuer  
Chefredakteur

## Was ist Realität? Was ist Bewusstsein?

**Es ist schon reichlich paradox:** Da liegt die Quantenphysik spätestens seit 1927 in einem Zustand vor, der es den Forschern gestattet, Prozesse der Mikrophysik mit fantastischer Präzision zu berechnen. Andererseits zeichnet diese Theorie ein Wirklichkeitsbild, das dem Hausverstand gewaltige Rätsel aufgibt. Seit einigen Jahren bestätigen ausgefuchste Experimente, dass Quantensysteme tatsächlich auch dann eine physikalische Einheit bilden (miteinander »verschränkt« bleiben), wenn deren Komponenten – etwa zwei Photonen – kilometerweit voneinander getrennt werden, es könnten vermutlich auch Lichtjahre sein.

Diese Form der »Nichtlokalität« oder Fernwirkung macht Quantenphysiker spätestens seit 1935 nervös, als Albert Einstein mit Boris Podolsky und Nathan Rosen zu seinem letzten großen Schlag gegen die von ihm abgelehnte Theorie ausholte. Denn würde man, so das damalige Gedankenexperiment der drei Theoretiker, den Zustand etwa eines Photons hier messen, würde augenblicklich auch der Zustand des anderen, entfernten Partnerphotons feststehen. Liegt hier, so das EPR-Paradox, eine Verletzung der Kausalität und somit der speziellen Relativitätstheorie vor, wonach sich keine Wirkung schneller als mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten darf? Ist also die Realität, wie Einstein forderte, wie gewohnt lokal?

Hier scheiden sich die Geister und Interpretationen. Die einen verteidigen Niels Bohrs herrschende »Kopenhagener Deutung«, andere folgen David Bohm und seinen »verborgenen Variablen«, wodurch alles mit allem zusammenhängt, oder man glaubt an Hugh Everetts Viele-Welten-Theorie. Jede Fassung bietet einen Ausweg aus dem Dilemma, jede führt dabei aber zusätzliche Annahmen ein. Deshalb lassen sich alle drei Deutungen wiederum grundsätzlich bestreiten –

experimentelle Erfolge der Quantenphysik hin oder her.

Gerade wegen der spektakulären Verschränkungsexperimente aber kocht die Debatte, die einst von Bohr und Einstein so hartnäckig geführt wurde, immer wieder hoch. Das ist von mehr als nur esoterischem Interesse. Wenn wir verstehen wollen, was die Realität unserer Welt im Innersten ausmacht, dann sollte diese Frage geklärt werden. Übrigens: Die Kausalität will keiner der Quantendeuter wirklich opfern (S. 30).

**Wer sich für das menschliche Gehirn** interessiert, kommt an **Wolf Singer** nicht vorbei. Seit Jahren prägt er den öffentlichen Diskurs über das komplexeste Gebilde im Universum. Die Resultate seiner Forschungen am Max-Planck-Institut für Hirnforschung haben die Fachkreise längst verlassen, tangieren sie doch Gegenstände genuin philosophischer Reflexion wie freien Willen, Bewusstsein oder Verantwortung. Dabei sind Singers Thesen innerfachlich unumstritten: Das Gehirn ist ein System, das sich selbst organisiert, ohne eine spezielle Kommandozentrale. Das Bewusstsein hat im Hirn keinen bestimmten Ort. Des Menschen Entscheidungen sind nicht frei, weil ihnen natürlich stets Vorgänge im Gehirn vorausgehen, die von bestimmten Bedingungen abhängig sind.

Doch dem Gemeinschaftswesen Mensch tut diese Bedingtheit nach Singer keinen Abbruch: Für verantwortliches Handeln braucht es gar keinen buchstäblich freien Willen. Unser Autor **Bernhard Epping** hat den Hirnforscher in Frankfurt am Main besucht (S. 74).

Herzlich Ihr

Reinhard Breuer



Unser neues »Spektrum«-Spezial: das Leben von 32 Mathematikern, erzählt in Briefmarken

# INHALT



44

MEDIZIN & BIOLOGIE  
Süchtig schon nach einer Zigarette?



MEDIZIN & BIOLOGIE  
Die Wanderungen der Urzeit-Menschen

58



66

MENSCH & GEIST  
Abschied vom kopernikanischen Prinzip?

## AKTUELL

- 10 Spektrogramm**  
Körpereigener Alzheimer-Schutz · Jungbrunnen von der Osterinsel · Quanteneffekte bei Nanostrukturen u. a.
- 13 Bild des Monats**  
Himmlische Seifenblase
- 14 Das uralte Erbe der Riesenspermien**   
Spermien, die länger sind als ihr Erzeuger, gab es schon vor Jahrmillionen
- 16 Geometrischer Prüfstein für Wahlgerechtigkeit**  
Wie lässt sich die gerechte Umsetzung von Stimmen in Sitze garantieren?
- 21 Wie Blutkrebszellen das Gehirn befallen**  
Ein fälschlich gebildeter Rezeptor öffnet ihnen die Blut-Hirn-Schranke
- 22 Schnipseljagd beim Strudelwurm**  
Warum den wirbellosen Tierchen selbst der abgetrennte Kopf nachwächst
- 24 Springers Einwürfe**  
Lernen Computer einst voneinander?

## ASTRONOMIE & PHYSIK


PHYSIKALISCHE UNTERHALTUNGEN

- 26 ► Nullsummenspiele mit Kräften und Ladungen**  
Wie sich Kirchhoffs Knotenregel für elektrische Ladungen in Brückenkonstruktionen wiederfindet

### TITEL

- 30 Einsteins folgenreicher Irrtum**  
Die von dem großen Physiker verabscheute »spukhafte Fernwirkung« ist real und bedroht mit dem Kausalitätsprinzip zugleich die Relativitätstheorie und die Grundfesten der Physik überhaupt

SCHLICHTING!

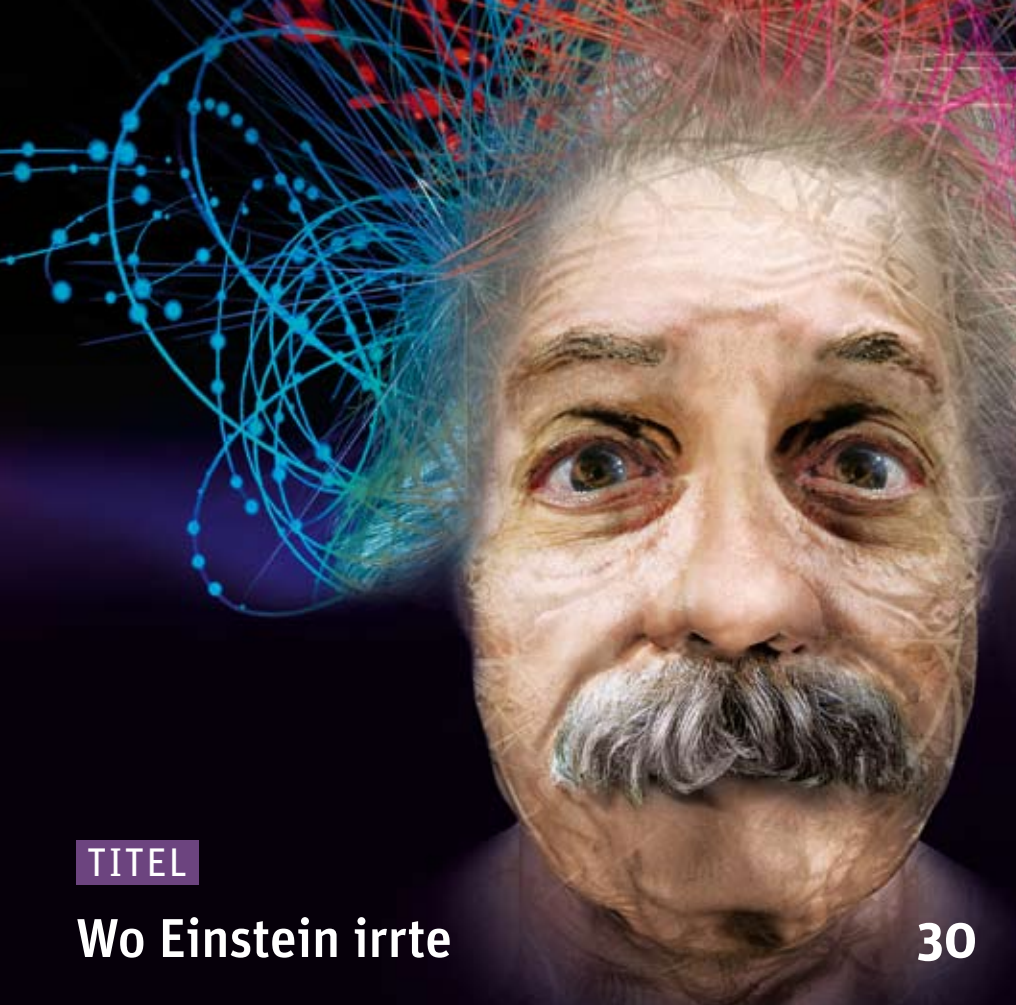
- 38 Warum die Sonne (k)ein Loch in die Welt brennt**   
Im hellen Sonnenlicht werden selbst solide Gegenstände »durchsichtig«

Titelillustration: Jean-François Podevin / Spektrum der Wissenschaft

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ► gekennzeichnet; die mit  markierten Artikel finden Sie auch in einer Audioausgabe dieses Magazins, zu beziehen unter: [www.spektrum.de/audio](http://www.spektrum.de/audio)

## MEDIZIN & BIOLOGIE

- 44 Eine Zigarette – schon süchtig**   
Zur Nikotinabhängigkeit genügt oft eine einzige Zigarette, besonders bei Jugendlichen. Das Gehirn verändert sich nämlich sofort, und zwar für immer
- 50 Evolutionsgeschichte der Fledermäuse enträtselt**   
Neue Fossilien – auch aus der Grube Messel bei Darmstadt – erzählen im Detail, wie die Fledermäuse fliegen und mit Echoortung Insekten jagen lernten
- 58 Wie der Mensch die Erde eroberte**  
Erbgutvergleiche erlauben es heute, die schrittweise Besiedlung der Erdteile durch *Homo sapiens* in allen Einzelheiten nachzuzeichnen und die genetischen Anpassungen an die jeweiligen regionalen Bedingungen zu verfolgen



TITEL

# Wo Einstein irrte

30



ERDE & UMWELT  
Durchbruch für Solarzellen? **84**



ERDE & UMWELT  
Sprit aus Gras **88**

## MENSCH & GEIST

**66 Kopernikus' Vermächtnis**  
Die Anerkennung für das einst eherne kopernikanische Prinzip schwindet. Für manche Kosmologen gehört es gar auf den »Müllhaufen der Geschichte«

PORTRÄT

**74 Ein Forscherleben für das Gehirn**  
Der Neurophysiologe Wolf Singer erklärt, wie er sich den Grundfragen der Hirnfunktion nähert – und welche Auswirkungen seine Erkenntnisse auf unser Weltbild haben

## ERDE & UMWELT

 **ERDE 3.0** ab Seite 80

INTERVIEW

**81 Desertec – Strom aus der Wüste**  
15 Prozent des europäischen Strombedarfs sollen in den Wüsten Nordafrikas und Arabiens erzeugt werden, doch das Projekt ist umstritten

**84 Die perfekte Solarzelle**   
Neue Fotovoltaikmodule arbeiten effektiver als gängige oder benötigen weniger teures Silizium

**88 Biosprit der zweiten Generation**  
Statt aus Nahrungsmitteln sollten Biotreibstoffe aus sonst nicht nutzbaren Ernteabfällen gewonnen werden. Mögliche Verfahren dafür sind schon weit gediehen

## TECHNIK & COMPUTER

WISSENSCHAFT IM ALLTAG

**96 Kalte Platte, heißer Topf**  
Induktionsherde erfreuen Hobbyköche wie Profis. Und sie sparen Energie

WISSENSCHAFT & KARRIERE

**98 »Je besser die Idee, desto geringer der Kapitalbedarf«**  
In der Computerbranche genügen 10 bis 20 Millionen Dollar, um eine gute Idee zu realisieren. Andreas von Bechtolsheim hat das in seiner bisherigen Karriere mehrfach unter Beweis gestellt

## WEITERE RUBRIKEN

- 3 Editorial: Was ist Realität?
- 6 Online-Angebote
- 8 Leserbriefe/Impressum
- 43 Im Rückblick
- 106 Vorschau

- 100 Rezensionen: Edvard Koinberg *Herbarium amoris – Das Liebesleben der Pflanzen*  
Merlin Donald *Triumph des Bewusstseins*  
Peter Gruss, Ferdi Schüth (Hg.) *Die Zukunft der Energie*  
Felix R. Paturi *Mathematische Leckerbissen*

# ONLINE

Dies alles und vieles mehr finden Sie in diesem Monat auf [www.spektrum.de](http://www.spektrum.de). Lesen Sie zusätzliche Artikel, diskutieren Sie mit und stöbern Sie im Heftarchiv!

<http://www.spektrum.de/>



MILKA ZINKOVA / CREATIVE COMMONS

**SPEKTRUMDIREKT** Vögel auf großer Reise  
[www.spektrumdirekt.de/vogelzug](http://www.spektrumdirekt.de/vogelzug)



SOLAR MILLENNIUM AG / PAUL LANGROCK

**INTERAKTIV** Strom aus der Wüste?  
[www.spektrum.de/desertec](http://www.spektrum.de/desertec)

**spektrumdirekt.de**

Die Wissenschaftszeitung im Internet

## Vögel auf großer Reise

Amsel, Drossel, Fink und Star – alle Jahre wieder reisen Millionen Zugvögel in die Tropen. Erst im kommenden Frühling kehren sie nach Hause zurück. Doch ihre Reise ist kompliziert. Wie finden sie ihren Weg? Und welche Gefahren drohen ihnen unterwegs?

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

## Tödliche Welle

Ausgelöst werden Tsunamis von Seebeben oder Rutschungen an den Kontinentalabhängungen. Dann erheben sich die Wassermassen wie Wände aus dem Meer und können, wenn sie Land erreichen, große Verwüstungen anrichten. Dies geschieht häufiger, als manche denken

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

## TIPPS

Nur einen Klick entfernt

### Rund um die Mathematik

Aktuelles und Grundlegendes, Schwieriges und Unterhaltsames, mal online, mal print – auf [www.spektrum.de/mathe](http://www.spektrum.de/mathe) haben wir eine umfangreiche Auswahl dessen zusammengestellt, was wir zum Thema zu bieten haben

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

### Und jetzt: das Wetter

Ein neues Brockhaus-Lexikon beschäftigt sich in 1500 Stichwörtern und 90 Forscherbiografien mit »Wetter und Klima« und bringt seine Leser auf den aktuellen Stand der Dinge – jedenfalls mehr oder weniger. Hier finden Sie unsere Rezension

[www.spektrumdirekt.de/artikel/1002898](http://www.spektrumdirekt.de/artikel/1002898)

## INTERAKTIV

Machen Sie mit!

### Europäischer Strom aus Sahara und Arabischer Wüste?

Das gigantische Projekt Desertec sei ohne Alternative, sagt Solarthermie-Experte Hans Müller-Steinhagen, einer der Väter des Vorhabens, im Interview auf S. 81 dieser Ausgabe. Allerdings stößt das Unterfangen, bei dem Solarenergie in den Wüsten Nordafrikas und Arabiens gewonnen und dann nach Europa transportiert werden soll, auch auf Kritik. Wie hoch sind Risiken und Chancen?

Stimmen Sie ab und diskutieren Sie mit auf

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



ERIC PERLS (HBO), HOLLAND FORB (HUGSBSC), KECH FREEMAN (AND), RICK WHITE (SFC), NAOJ / AURA / NSF

FÜR ABONNENTEN »Ins Herz von Centaurus A«

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

## FÜR ABONNENTEN

Ihr monatlicher Plus-Artikel  
zum Download

### »Ins Herz von Centaurus A«

Die uns nächstgelegene aktive Galaxie birgt ein scheinbar viel zu massereiches Schwarzes Loch. Doch neue Daten des Very Large Telescope helfen das Rätsel zu lösen. Und dank interferometrischer Beobachtungen können die Forscher am VLT nun auch bis in das innerste Lichtjahr von Centaurus A vordringen

DIESER ARTIKEL IST FÜR ABONNENTEN  
FREI ZUGÄNGLICH UNTER

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

## FREIGESCHALTET

Ausgewählte Artikel aus **Gehirn&Geist** und **Sterne und Weltraum** kostenlos online lesen

### »Hormonelle Harmonie«

Ob wir beide Hemisphären zu gleichen Teilen nutzen oder eher zur Einseitigkeit neigen, hängt von unseren Hormonen ab. Das entdeckten jetzt die Biopsychologen Markus Hausmann und Ulrike Bayer von der britischen Durham University

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

[www.gehirn-und-geist.de/artikel/1001597](http://www.gehirn-und-geist.de/artikel/1001597)

### »Massereiche protoplanetare Scheiben im Orionnebel«

Beobachtungen bei Wellenlängen im Submillimeterbereich enthüllten zwei zirkumstellare Gas- und Staubscheiben im Orionnebel. Mit ihrer Masse übertreffen sie alle bislang dort gefundenen protoplanetaren Scheiben

DIESEN ARTIKEL FINDEN SIE ALS KOSTENLOSE  
LESEPROBE VON **STERNE UND WELTRAUM** UNTER

[www.astronomie-heute.de/artikel/1003885](http://www.astronomie-heute.de/artikel/1003885)



FREIGESCHALTET

»Hormonelle Harmonie«

[www.gehirn-und-geist.de/artikel/1001597](http://www.gehirn-und-geist.de/artikel/1001597)

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

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

## WISSENSlogs

Die Wissenschaftsblogs

### Forschung im Netz

Nicht nur die Wissenschaft an sich, sondern die (digitale) Kommunikation innerhalb der Forschergemeinde ist Thema des neuen Gruppenblogs »Interactive Science« auf [www.wissenslogs.de](http://www.wissenslogs.de). Medienwissenschaftler, Soziologen, Politologen und Linguisten unter anderem der Universitäten Gießen, Bielefeld und Trier widmen sich hier »der kollaborativen und der performativen Dimension wissenschaftlicher Binnenkommunikation«. So analysieren sie etwa wissenschaftliche Kontroversen, die über Mediengrenzen hinweg gehen, oder die Wissenschaftskommunikation, wie sie in den Social Media stattfindet

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

## Vernünftige, aber unbewiesene Hypothese

Wozu Dunkle Energie?, August 2009

Die vorausgesetzte gleiche absolute Strahlungsstärke aller Supernovae ist eine möglicherweise vernünftige, aber unbewiesene Hypothese. Von solchen Hypothesen lebt die Kosmologie – sie hat ja keine Möglichkeit, ihre Annahmen zu verifizieren.

Auch die beiden Relativitätstheorien Einsteins gründen trotz ihrer Erfolge auf unbeweisbaren Hypothesen. Einstein hat zwar die Ad-hoc-Hypothese von der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit aufgestellt und verteidigt – er brauchte in seiner Theorie einen festen archimedischen Punkt –, aber er hat sich nie, anders als die Päpste, als unfehlbar angesehen.

Dr. Hans-Joachim Rimek, Bonn

## Freiheit, Zufall und die Quanten

Machen uns die Quanten frei?  
Springers Einwürfe, Juli 2009

### Freiheit nicht erzeugt, sondern ermöglicht

Michael Springer verwechselt Ursache und Wirkung. Es geht nicht darum, dass durch nicht deterministische quantenphysikalische Vorgänge und die daraus erwachsende Unbestimmtheit beziehungsweise Unschärfe Freiheit erzeugt, sondern dass sie ermöglicht wird. Wenn

Herr Springer »philosophische Begriffsanalysen« akzeptiert, so greift er auf geistige Prinzipien zurück, die sich entgegen dem weit verbreiteten Determinismus der Hirnforschung mittels quantenphysikalischer Freiheitsgrade als Willensbeziehungweise Entscheidungsfreiheit äußern können – auch jenseits des begrenzten Vorstellungsvermögens eines glossierenden Materialisten.

Meine – nichtwissenschaftliche – Deutung von »Zufall« lautet: »Es hätte auch anders kommen können«; oder, wie der Kölner sagt: »Et kütt, wie et kütt.«

Prof. Paul Kalbhen, Gummersbach

### Handeln, als wären wir frei

Herrn Prof. Kalbhens Einwand, der Zufall ermögliche Freiheit nur und schaffe sie nicht, scheint mir nicht viel mehr als ein Wortspiel. Wie Michael Springer bin ich der Meinung, dass der Zufall der Quantenmechanik allzu schnell als Beweis menschlicher Freiheit gedeutet wird.

Wenn der Mensch rein statistisch handeln würde – also akausal, prinzipiell unvorhersagbar und undeterminiert –, so bedeutete dies eine Beliebigkeit des Handelns und nicht Freiheit.

Ich möchte mich dem Freiheitsbegriff des Hirnforschers Gerhard Roth anschließen: Während alles auf Determinismus hindeutet, bleibt der Mensch so unvorhersagbar, dass wir im Alltag handeln müssen, als wären wir frei. Wir verwenden also weiterhin Begriffe wie Schuld und Verantwortung, im vollen Wissen, dass diese letzten Endes unangebracht sind; aber wir bewahren diese Konzepte

als operative Begriffe, um die Gesellschaft und das soziale Leben zu regulieren.

Vera Spillner, Heidelberg

## Spannendes Urlaubsvergnügen

Serie »Die größten Rätsel der Mathematik«  
September 2008 bis Juni 2009

Was ist ein großes Vergnügen? Die liegen gebliebenen »Spektrum«-Hefte im Urlaub zu lesen! Neben all den interessanten Artikeln sticht die Reihe »Die größten Rätsel der Mathematik« hervor. Wie hier dem wenig von Mathematik verstehenden Leser (wie mir) die Probleme der heutigen Mathematik präsentiert werden, ist beispielhaft. Die von Ihren Artikeln erzeugte Spannung hat mich häufig nachts (wenn meine Frau den Fernseher nicht einschalten konnte) bewegt, die ungelösten mathematischen Rätsel zu studieren. Wer da noch Romane liest, weiß nicht, was Spannung ist!

Hans-Reinhard Block, Tönisvorst

## Massive Geldverschwendung

Wie lässt sich neuen Pandemien vorbeugen?, Juni 2009

Offenbar »wissen wir nicht, ob SFV oder die neuen HTL-Viren bei Menschen überhaupt Krankheiten hervorru-

# Spektrum

DER WISSENSCHAFT

**Chefredakteur:** Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)  
**Stellvertretende Chefredakteure:** Dr. Inge Hofer (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:** Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle  
**Bildredaktion:** Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe  
**Art Direction:** Karsten Kramarczik  
**Layout:** Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Marc Grove, Anke Heinzlmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer  
**Redaktionsassistenz:** Eva Kahlmann  
**Redaktionsanschrift:** Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729  
**Verlag:** Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, 69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751; Amtsgericht Mannheim, HRB 338114  
**Verlagsleiter:** Dr. Carsten Köneker, Richard Zinken (Online)  
**Geschäftsleitung:** Markus Bossle, Thomas Bleck  
**Herstellung:** Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733  
**Marketing:** Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.com  
**Einzelverkauf:** Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744  
**Übersetzer:** An diesem Heft wirkten mit: Dr. Markus Fischer, Doris Gerstner, Dr. Arnd Schreiber, Dr. Michael Springer, Dr. Karl-Hans Taake, Annette Zimmermann.  
**Leser- und Bestellservice:** Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.com

**Vertrieb und Abonnementverwaltung:** Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn  
**Bezugspreise:** Einzelheft € 7,40/Sfr. 14,00; im Abonnement € 79,20 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 66,60. Die Preise beinhalten € 1,20 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 7,20 Portomehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70). Die Mitglieder des Verbands Biologie, Biowissenschaften und Biomedizin in Deutschland (VBio) und von Mensa e.V. erhalten SdW zum Vorzugspreis.  
**Anzeigen:** iq media marketing gmbh, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Marianne Dölz; Anzeigenleitung: 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 61686-144, Fax 030 61696-145; Hamburg: Matthias Meißner, Brandstüwe 1 / 6. OG, 20457 Hamburg, Tel. 040 30183-210, Fax 040 30183-283; Düsseldorf: Hans-Joachim Beier, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2053, Fax 0211 887-2099; Frankfurt: Thomas Wolter, Eschersheimer Landstraße 50, 60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 2424-4507, Fax 069 2424-4555; Stuttgart: Andreas Vester, Werastraße 23, 70182 Stuttgart, Tel. 0711 22475-21, Fax 0711 22475-49; München: Jörg Bönsch, Nymphenburger Straße 14, 80335 München, Tel. 089 545907-18, Fax 089 545907-24  
**Druckunterlagen an:** iq media marketing gmbh, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686  
**Anzeigenpreise:** Gültig ist die Preisliste Nr. 30 vom 01.01.2009.  
**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 des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.

Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich statuierten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2009 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg.

Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechteinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

ISSN 0170-2971

### SCIENTIFIC AMERICAN

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



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







SPKTRUM DER WISSENSCHAFT / ENDE-GRATIK

## Was ist Mathematik?

Juni 2009

Die Mathematik ist nicht »sicherer und objektiver« als andere Wissenschaften. Sie versteht es nur besser, die »Krisen und Rückschritte« nachträglich zu verbergen: Die Bezeichnungen werden beibehalten und nur deren Bedeutungen angepasst.

Hayo Siemsen, Wadgassen

### Mathematische Definition oder unsinniger Buchstabensalat?

Irgendwo müssen doch die überabzählbar unendlich vielen reellen Zahlen sein!

In der Mathematik wird nur eine endliche Anzahl verschiedener Zeichen verwendet. Eine mathematische Definition besteht aus einer endlich langen Folge dieser Zeichen. Diese endlich langen Folgen kann ich aber der Länge nach sortiert und alphabetisch geordnet auflisten. Jede reelle Zahl, die sauber, das heißt mit endlich vielen Zeichen, definiert werden kann, ist in meiner Liste enthalten. Damit wären die

reellen Zahlen abzählbar! Oder liegt es daran, dass wir im Allgemeinen nicht entscheiden können, ob eine Zeichenfolge eine mathematische Definition oder ein unsinniger Buchstabensalat ist?

Philipp Wehrli, Winterthur (Schweiz)

### Antwort des Autors Prof. Bernulf Kanitscheider:

In der Tat sind die meisten reellen Zahlen nicht nur nicht berechenbar, sondern auch nicht benennbar. Das gilt in noch höherem Maß für umfassendere Mengen wie etwa die Menge aller reellen Funktionen, die eine noch

höhere Mächtigkeit als die des Kontinuums besitzt. Diese können erst recht nicht mehr mit individuellen Namen versehen werden.

Gleichwohl lässt sich der Körper der reellen Zahlen ausgehend vom Körper der rationalen Zahlen exakt definieren. Dies kann nach der Methode des dedekindschen Schnitts oder als Konstruktion mit Cauchy-Folgen oder mittels des Verfahrens der Intervallschachtelung axiomatisch geschehen.

Lesen Sie weitere Briefe zu diesem Thema jeweils mit Antwort von Bernulf Kanitscheider unter:  
[www.spektrum.de/artikel/992819](http://www.spektrum.de/artikel/992819)

fen können« (S. 58). Weder die Affen, von denen Wolfe hier erzählt, noch die Affenjäger sind krank. Wovor fürchtet man sich eigentlich? Die Zukunft des Programms soll zweistellige Millionenbeträge jährlich kosten – woraus leitet sich das Recht ab, solche Unsummen auszugeben für das Abwenden einer nicht existenten Bedrohung?

Dr. Peter Kunz, Stockach

nen erzeugte Methan – ähnlich wie im Film »Mad Max II – Unter der Donnerkuppel« – irgendwie auffangen und energetisch verwenden (verheizen), da es nichts anderes ist als Erdgas.

Christoph Hiller, Tuttlingen

## Intelligente Druckerschwärze?

Das Versteckspiel der Intelligenz  
Juli 2009

In Genen oder Gensequenzen nach den Ursachen der Intelligenz zu suchen ist ungefähr so intelligent, wie die Bedeutung des Wortes Intelligenz in den molekularen Bestandteilen der Druckerschwärze oder Bildschirmpixel zu suchen, mit denen es geschrieben ist. Intelligenz (respektive Geist, freier Wille et cetera) ist eine Systemeigenschaft par excellence – eine Eigenschaft selbst schon höchst komplexer, zudem sprachlich und soziokulturell vernetzter Systeme, um nicht zu sagen:

Gehirne. Und selbst diese Gehirne benötigen noch ihren neuronal fast vollständig durchwirkten Körper mit allen seinen Sinnen, um überhaupt – geschweige denn intelligent – existieren zu können. Sogar unser Knochengestüt wirkt noch indirekt auf unsere Intelligenz – denn ohne es könnte weder unser Körper noch unser Gehirn überleben. Und recht unappetitlich sah' die Sache zudem aus ...

Egbert Scheunemann, Hamburg

## Methan energetisch verwenden

Ein Sonnenschirm für den Blauen Planeten, Juli 2009

Der Artikel ist ausgezeichnet. Man sollte jedoch nicht übersehen, dass der vom Methan erzeugte Beitrag zum Treibhauseffekt mindestens so groß ist wie der des CO<sub>2</sub>. Das Methan entsteht unter anderem in den Mägen von Rindern. Da bei uns die Kühe den größten Teil des Jahres im Stall stehen, könnte man das von ih-

### Briefe an die Redaktion ...

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

Oder schreiben Sie mit kompletter Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft  
Redaktion Leserbriefe  
Postfach 104840  
69038 Heidelberg (Deutschland)  
E-Mail: [leserbriefe@spektrum.com](mailto:leserbriefe@spektrum.com)

## KOGNITION

### Geistig flexibel dank Zweisprachigkeit



■ Kinder, die bilingual aufwachsen, lernen zwei Sprachen in der gleichen Zeit, die Altersgenossen für den Erwerb einer einzigen brauchen. Wie schaffen sie das? Das fragten sich Ágnes Kovacs und Jacques Mehler von der Scuola Internazionale Superiore di Studi Avanzati in Triest. Auf der Suche nach einer Antwort verglichen sie die kognitiven Leistungen von bi- und monolingualen Einjährigen.

Kinder lernten, die Position eines Spielzeugs am Bildschirm mit der Struktur einer zuvor gehörten Lautfolge zu verbinden. Anschließend mussten sie diese Regel auf ein neues Wort mit analoger Struktur übertragen.

Für den Test setzten die Forscher die Kinder vor einen Computerbildschirm und spielten ihnen ein dreisilbiges, sinnloses Wort vor. Dieses hatte entweder die Sequenz A-A-B (wie »lo-lo-ba«) oder A-B-A (»lo-ba-lo«). Danach erschien je nach der zuvor gehörten Wortstruktur auf der rechten oder der linken Seite des Bildschirms ein Spielzeug. Das wiederholte sich mehrmals. Dann bekamen die Kleinen ein neues Wort mit analoger Struktur, aber anderen Silben zu hören. Diesmal erschien kein Spielzeug. Die Forscher beobachteten, wohin die jungen Probanden in Erwartung des Bildes schauten.

Wie sich zeigte, wählten die zweisprachigen Kinder öfter die korrekte Richtung. Demnach konnten sie nicht nur die Struktur einer Lautfolge erkennen und mit der Position des Spielzeugs in Verbindung bringen, sondern diese Erkenntnis auch verallgemeinern und auf eine neue Lautfolge übertragen. Das verrät nach Ansicht der Forscher eine höhere geistige Flexibilität.

*Science, Online-Vorabveröffentlichung*

## MEDIZIN

### Körpereigener Alzheimer-Schutz

■ Die alzhaimersche Erkrankung führt zum allmählichen Verlust der geistigen Fähigkeiten. Als Auslöser gelten senile Plaques: Verklumpungen aus dem Peptid  $\beta$ -Amyloid (kurz A $\beta$ ), die sich im Gehirn ablagern und Nervenzellen absterben lassen. Mediziner suchen deshalb nach Möglichkeiten, die Plaquebildung zu verhindern. Nun hat ein Forscherteam um Markus Britschgi und Tony Wyss-Coray von der Stanford University (Kalifornien) entdeckt, dass jeder von uns über Antikörper gegen A $\beta$  verfügt.

Die Wissenschaftler untersuchten über 250 Personen im Alter zwischen 21 und 89 Jahren, die teils gesund, teils an der Demenz erkrankt waren. Früher hatte sich schon gezeigt, dass eine Immunisierung mit A $\beta$  die Plauebildung reduzieren kann. Doch

weil mutierte oder modifizierte Formen des Peptids auch an der Entwicklung der Krankheit beteiligt sind, waren sie in der neuen Untersuchung miteingeschlossen.

Unter den getesteten Substanzen befand sich A $\beta$  in verschiedenen Formen und Verklumpungsstadien. Sie alle wurden in Reih und Glied auf einem Chip fixiert. Dann brachten die Forscher diese Microarrays mit dem Blut der Versuchsteilnehmer in Berührung. Wie sich zeigte, hefteten sich bei allen Proben Antikörper an viele Formen des Peptids. Ihre Anzahl nahm jedoch mit dem Alter und bei Alzheimerpatienten mit dem Fortschreiten der Krankheit ab. Demnach schützt uns in der Jugend das Immunsystem vor der Demenz.

*PNAS, Bd. 106, S. 12145*

## ÖKOLOGIE

### Klimawandel lässt Schafe schrumpfen

■ Evolution und ökologische Anpassung laufen normalerweise sehr langsam ab – innerhalb von Jahrtausenden bis Jahrmillionen. Umso erstaunlicher ist, was Tim Coulson vom Imperial College London und seine Kollegen nun auf der Insel Hirta im schottischen Archipel St. Kilda festgestellt haben: Die dort heimischen Soay-Schafe sind in jüngster Zeit immer kleiner geworden – um durchschnittlich etwa fünf Prozent in 25 Jahren. Die alte Wildrasse lebt seit Jahrhunderten weitgehend isoliert von der restlichen Welt auf den unbewohnten westschottischen Inseln. Die jetzige Größenabnahme ist deshalb sehr ungewöhnlich, zumal stattliche Tiere eigentlich im Vorteil sind und sich besser fortpflanzen.

Coulson schreibt die Schrumpfung dem Klimawandel zu, der für deutlich mildere Winter gesorgt hat. »In der Vergangenheit war es so, dass nur die großen Lämmer, die während ihres ersten Sommers möglichst viel Gewicht zugelegt hatten, den harten Winter überlebten. Jetzt ist das Futtermittel Gras längere Zeit des Jahres vorhanden, so dass auch die langsam wachsenden Lämmer gute Überlebenschancen haben«,



Die Soay-Schafe leben auf den Inseln des schottischen Archipel St. Kilda isoliert von der restlichen Welt.

erklärt der Biologe. Dadurch steige der Anteil kleinerer Tiere in der Population.

Hinzu kommt, was die Forscher den Junge-Mutter-Effekt nennen: Junge weibliche Schafe sind physisch noch nicht in der Lage, Nachwuchs zu bekommen, der bei der Geburt genauso schwer ist, wie sie selbst es bei ihrer eigenen Geburt waren. Das wirkt der natürlichen Tendenz zur Größenzunahme entgegen. Dass daraus eine Verkleinerung wird, liegt laut Coulson am zusätzlichen Einfluss der Erderwärmung.

*Science, Bd. 325, S. 464*

## Spürhund für Krebs

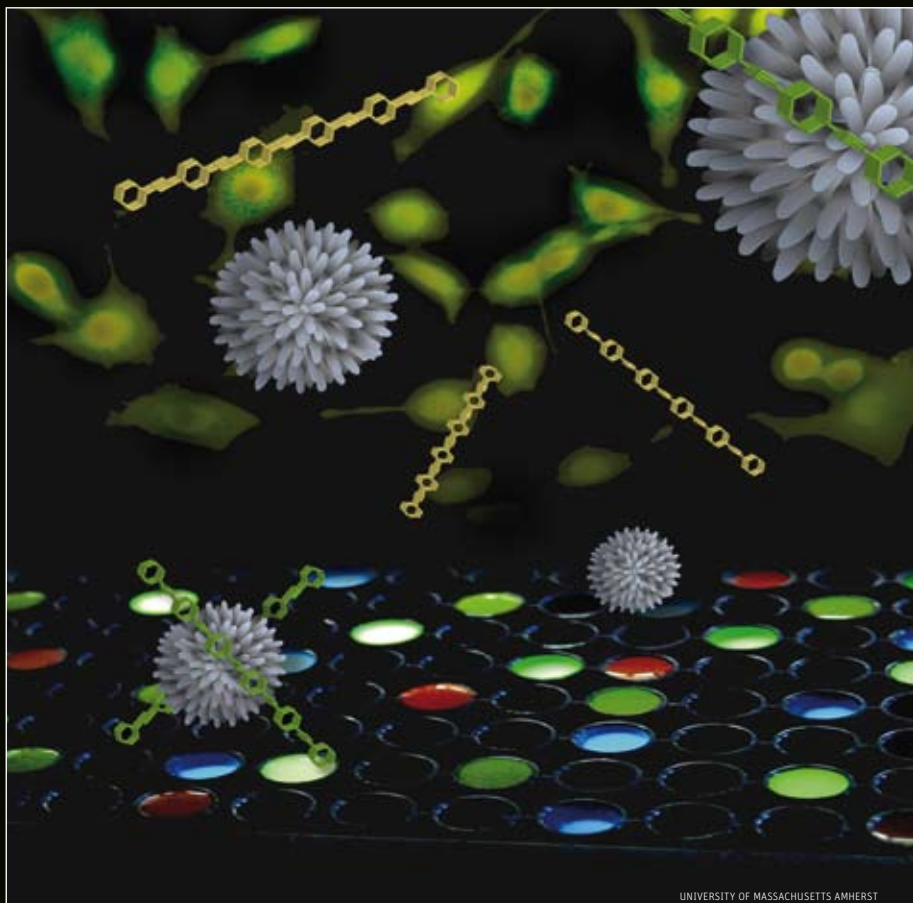
■ Beim Nachweis von Krebszellen stehen Mediziner vor einem Problem: Die Übeltäter sind nur schwer zu identifizieren, wenn man nichts über sie weiß. Stets müssen zelluläre Strukturen (Biomarker) oder spezifische Veränderungen im Zellstoffwechsel im Vorfeld bekannt sein, damit klar ist, wonach der Arzt überhaupt suchen soll.

Avinash Bajaj von der University of Massachusetts in Amherst und seine Kollegen haben jetzt ein Verfahren entwickelt, bei dem keine solchen Vorabinformationen nötig sind. Außerdem kann man nicht nur entartete Zellen von gesunden unterscheiden, sondern auch noch feststellen, ob sie zum Primärtumor gehören oder von Metastasen stammen.

Für ihren neuen Test geben die Forscher Nanoteilchen mit unterschiedlichen molekularen Überzügen, an denen bestimmte Polymere haften, zu den zu prüfenden Zellkulturen. Je nach Gewebetyp interagieren diese Partikel mehr oder weniger stark mit der Zelloberfläche. Kommt es zu einem engen Kontakt, werden die angelagerten Polymere verdrängt und freigesetzt. Diese Moleküle sind aber chemisch so aufgebaut, dass sie im ungebundenen Zustand fluoreszieren. Je nach Zelltyp ist deshalb ein charakteristisches Leuchten zu beobachten.

In ihren Versuchen benutzten Bajaj und Kollegen drei verschiedene Nanogoldpartikel, die sich im molekularen Überzug unterschieden. An Art und Ausmaß der Fluoreszenz konnten die Forscher Brust-, Hoden- und Gebärmutterhalskrebs auseinanderhalten und zudem feststellen, ob es sich um Zellen aus Metastasen handelte.

*PNAS, Bd. 106, S. 10912*



UNIVERSITY OF MASSACHUSETTS AMHERST

Bei einem neuen Krebstest setzt die Interaktion zwischen den zu prüfenden Zellen und Nanoteilchen mit variierendem Molekülüberzug daran haftende Polymere frei, die im ungebundenen Zustand fluoreszieren.

## ASTROPHYSIK

### Mittelschweres Schwarzes Loch

■ Zwei Arten von Schwarzen Löchern sind allseits bekannt und gut dokumentiert. Die einen haben maximal die 20-fache Sonnenmasse und entstehen, wenn massereiche Sterne nach Verbrauch ihres Brennstoffs unter ihrem eigenen Gewicht kollabieren. Die zweite Art sitzt im Zentrum von Galaxien und wiegt mehrere Millionen bis Milliarden Mal so viel wie unsere Sonne. Ihr Ursprung ist noch nicht eindeutig geklärt.

Wissenschaftler vermuten zwar schon länger, dass es auch mittelschwere Schwarze Löcher gibt, und haben Kandidaten dafür ausgemacht. Doch sie eindeutig zu identifizieren fällt schwer. Nun präsentierte ein internationales Team von Astronomen um Sean Farrell von der Universität de Toulouse das vielleicht überzeugendste Exemplar.

Die Forscher entdeckten mit dem Röntgensatelliten XMM-Newton der europäischen Raumfahrtagentur ESA eine intensive Röntgenquelle, wie sie charakteristisch für Schwarze Löcher ist, und gaben ihr die Bezeichnung HLX-1. Das Objekt befindet sich in der Galaxie ESO 243-49, etwa 290 Millionen Lichtjahre von der Erde entfernt.

Ausgesandt wird das Röntgenlicht von Material, das sich kurz vor dem Einsturz ins Schwarze Loch extrem aufheizt. Die Intensität der Strahlungsquelle ist ungefähr 260 Millionen Mal so hoch wie die Leuchtkraft der Sonne im gesamten Spektralbereich. Das beweist, dass das Schwarze Loch mindestens 500 Sonnenmassen haben muss. Andererseits liegt es am Rand der zugehörigen Galaxie. Hätte es mehr als



ILLUSTRATION: HEIDI SAGERUD / UNIVERSITY OF LEICESTER

Diese Zeichnung zeigt die neu entdeckte Röntgenquelle HLX-1 als hellblau leuchtendes Objekt oberhalb der zentralen Ausbuchtung der Galaxie ESO 243-49.

eine Million Sonnenmassen, müsste es längst von dem Gravitationsmonster in deren Zentrum verschluckt worden sein. Demnach kann es sich nur um ein Mittengewicht handeln.

*Nature, Bd. 460, S. 73*

## PALÄONTOLOGIE

## Zeigt her eure Zähnchen!

■ Furcht einflößend waren sie nicht gerade. Mit ihrer kuriosen namensgebenden Schnauze wirkten die Entenschnabel- oder Hadrosaurier eher putzig. In der Tat handelte es sich um harmlose Pflanzenfresser. Doch welche Art von Pflanzen hatten sie auf dem Speiseplan, und wie zerkleinerten sie ihre vegetarische Kost vor dem Schlucken? Antwort darauf erhielt nun ein Team um Mark Purnell von der University of Leicester (England) durch die Analyse von mikroskopisch kleinen Kratzern auf der Oberfläche der Saurierzähne, die beim Zerkauen der Nahrung entstanden waren.

Das Gebiss der Hadrosaurier unterschied sich grundlegend von dem der Säugtiere. Nicht der Unterkiefer war beweglich und über ein elastisches Gelenk mit dem Rest des Schädels verbunden. Stattdessen ließ sich der Oberkiefer über eine Art Scharnier auf- und zuklappen. Wie die Kratzspuren beweisen, konnten die Tiere die Zähne aber nicht nur auf und ab, son-



VINCE WILLIAMS, UNIVERSITY OF LEICESTER

**In diesem fossilen Unterkiefer eines Hadrosauriers sind mehrere Reihen blattartiger Zähne zu sehen.**

dern auch vor und zurück sowie seitwärts bewegen. Das bestätigt eine schon früher aufgestellte Theorie, wonach der Oberkiefer beim Zubeißen nach außen gedrückt wurde. Dadurch glitten die Zähne schräg seitlich übereinander und zermalmten die Pflanzen zwischen sich.

Den Kratzern zufolge muss die Nahrung der Hadrosaurier kleine, harte Partikel enthalten haben. Diese können von Erdresten stammen, die mit in den Mund geraten, wenn Pflanzen in Bodennähe abgerissen werden. Denkbare sind aber auch Kieselsäurekörnerchen, die üblicherweise in Gras oder Schachtelhalmen vorkommen. Demnach grasten die Tiere offenbar und fraßen keine Blätter oder Früchte von Bäumen.

PNAS, Bd. 106, S. 11194

## ALTERN

## Jungbrunnen von der Osterinsel

■ Der Traum vom ewigen Leben ist wohl so alt wie die Menschheit selbst. Inzwischen haben Wissenschaftler zumindest Wege gefunden, das Altern hinauszuzögern. Als gutes Mittel erwies sich in Tierversuchen zum Beispiel das Fasten. Doch wer will schon ständig hungern? Dass es auch weniger asketisch geht, haben nun Forscher um David E. Harrison vom Jackson Laboratory in Bar Harbor (Maine) entdeckt. Bei ihren Versuchen verlängerte Rapamycin, das erstmals in Bodenbakterien von der Oster-

insel entdeckt wurde, die Lebenserwartung betagter Mäuse um rund ein Drittel.

Als Grund erwies sich, dass die Substanz, die bereits als Fungizid und Immunsuppressivum verwendet und als Antitumormittel erprobt wird, den so genannten TOR-Signalweg blockiert. Das Protein TOR (*target of rapamycin*) hilft in der Zelle, den Stoffwechsel und die Stressantwort zu regulieren. Seine Hemmung wirkt sich ähnlich aus wie das Hungern.

Ursprünglich wollten Harrison und seine Kollegen den Versuch mit jungen Nagern durchführen. Doch um das Rapamycin vor dem Abbau im Magen zu schützen, mussten sie es verkapseln, was Zeit kostete. So waren die Tiere zu Versuchsbeginn schließlich 20 Monate alt, was beim Menschen 60 Jahren entspricht. Umso mehr erstaunte der starke Effekt. »Ältere Tiere sprechen auf Kalorienreduktion eigentlich nicht an«, erklärt Arlan Richardson vom Barshop Institute for Longevity and Aging Studies der University of Texas.

Nature, Bd. 460, S. 392

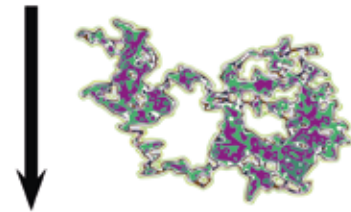
## PHYSIK

## Quanteneffekte bei Nanostrukturen

■ Mit zunehmender Miniaturisierung geraten elektronische Bauteile in einen Größenbereich, in dem sich die Seltsamkeiten der Quantenmechanik bemerkbar machen – etwa in Form so genannter Vakuumfluktuationen, bei denen kurzzeitig virtuelle Teilchen entstehen. Zwischen benachbarten Bauteilen löschen solche Fluktuationen einander teilweise aus, was einen Unterdruck erzeugt.

Diese als Casimirkraft bekannte Anziehung ließ sich bisher nur für einfache Anordnungen wie parallele Platten quantitativ vorhersagen. Alexej Weber von der Universität Heidelberg und Holger Gies von der Universität Jena konnten jetzt erstmals auch präzise Berechnungen für den Fall anstellen, dass die Platten verkippt sind.

Unter diesen Umständen gilt, wie sich herausstellte, ein prinzipiell anderes Kraftgesetz. Außerdem nimmt der Casimireffekt



ALEXEJ WEBER, UNIVERSITÄT HEIDELBERG

**Vakuumfluktuationen, deren variable Dichte hier durch Farben veranschaulicht ist, können eine Anziehung zwischen eng benachbarten Platten hervorrufen.**

stärker mit der Temperatur zu als bei parallelen Platten. »Je mehr thermische Schwankungen sich zu den Vakuumfluktuationen gesellen, desto stärker die Casimirkraft«, erläutert Weber. Die Schwankungen müssen allerdings in der Nanostruktur Platz finden. Zwischen parallele Platten passen nur bestimmte (quantisierte) Fluktuationen; zwischen geneigten Exemplaren lässt sich hingegen ein größeres Spektrum verschiedenfrequenter Schwingungen unterbringen.

Die Rechnungen von Weber und Gies geben eine Vorstellung davon, welche Anpassungen bei künftigen Nanostrukturen je nach ihrer Betriebs- und Umgebungstemperatur notwendig werden.

arXiv:0906.2313



HAPPY ALEX / SHUTTERSTOCK


Diese Kolossalstatuen auf der Osterinsel haben Jahrhunderte überdauert. Nun könnte ein Stoff aus einem dortigen Bodenbakterium auch Menschen lange leben lassen.



## Himmlische Seifenblase

Erst im Juli 2008 entdeckte ein Amateurastronom das fast kreisrunde Objekt am Rand einer etwa 4000 Lichtjahre entfernten großen Wasserstoffwolke. Jetzt gelang mit dem 4-Meter-Mayall-Teleskop auf dem Kitt Peak in Arizona diese eindrucksvolle Aufnahme im gelblichen Wasserstoff- und blauen Sauerstofflicht. Vermutlich handelt es sich um einen Planetarischen Nebel: die von einem alternden Stern abgestoßene Gashölle. Wenn PN G75.5+1.7, so seine Katalognum-

mer, gleich weit entfernt ist wie die Wasserstoffwolke, dann beträgt sein Durchmesser fünf Lichtjahre und sein Alter – bei einer geschätzten Expansionsgeschwindigkeit von 35 Kilometern pro Sekunde – 22000 Jahre. Allerdings wurde das Objekt inzwischen auch auf einer 16 Jahre alten Aufnahme entdeckt und hat dort schon die heutige Größe. Entweder ist es also weiter entfernt oder doch kein Planetarischer Nebel. Dann allerdings wäre sein Ursprung rätselhaft.

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

## Das uralte Erbe der Riesenspermien

Samenzellen, die länger sind als das zugehörige Männchen, gehören zu den Kuriositäten im Tierreich. Wie Untersuchungen von fossilen Muschelkrebse zeigen, gab es solche Riesenspermien schon vor 100 Millionen Jahren.

Von Renate Matzke-Karasz

Wie würden Sie ein Spermium beschreiben? Kopf, Mittelstück und geißelförmiger Schwanz? Prima – das stimmt zumindest für die Säugetiere und noch ein paar Tiergruppen. Mehr aber leider nicht. Wer sich im Tierreich genauer umsieht, merkt schnell, wie vielfältig, bizarr und vor allem unverstanden Form und Funktion von Samenzellen tatsächlich sind.

Besonders kurios erscheinen die Riesenspermien – sind sie doch teils um ein Vielfaches länger als ihr Produzent. Es gibt sie in ganz verschiedenen Gruppen des Tierreichs – von Würmern über Schmetterlinge bis zu den Wasserwanzen. Auch einige Arten der gut untersuchten Taufliege pflanzen sich damit fort. *Drosophila bifurca* hält sogar den Rekord: Ihre Samenzellen messen mit 5,8 Zentimetern fast das 13-Fache ihrer Körperlänge!

Doch während in diesen Gruppen Riesenspermien jeweils nur bei wenigen Arten auftreten, bilden sie unter den mehr als 1600 Spezies von Süßwasser-

Muschelkrebse den Normalfall. Der deutsche Name dieser millimetergroßen Krustentiere rührt daher, dass bei ihnen ein Panzer aus zwei Klappen, der ein wenig an Muscheln erinnert, den Weichkörper seitlich umfasst.

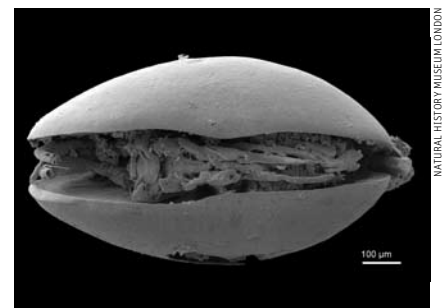
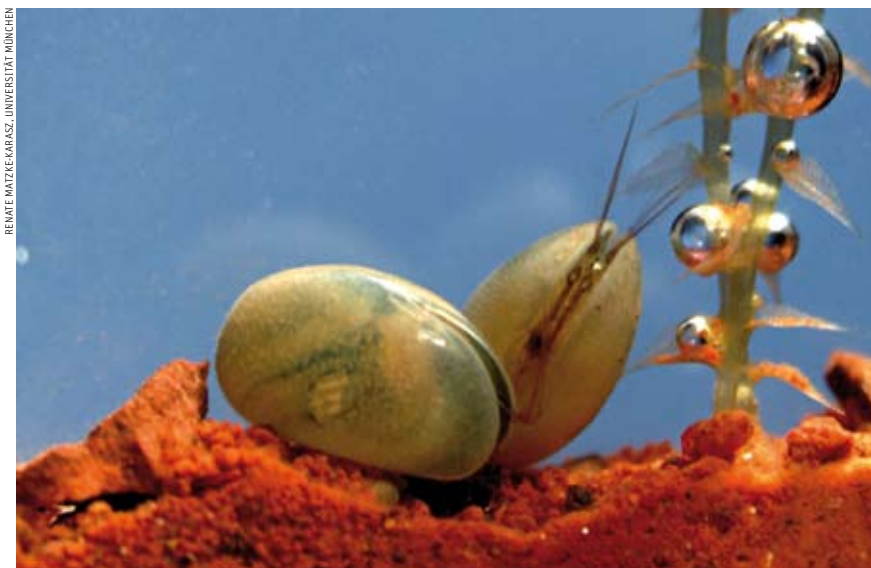
Die Klasse der Muschelkrebse (Ostracoda) war erdgeschichtlich sehr erfolgreich. Die ersten Vertreter gab es schon vor 500 Millionen Jahren; sie sind dank ihres verkalkten und versteinierungsfähigen Gehäuses heute noch nachweisbar. Alle Krisen der Erdgeschichte haben die Tiere gemeistert. Dabei entwickelten sich aus der erst rein marinen Gruppe Formen, die das Brack- und Süßwasser eroberten. Sie sind heute im Wesentlichen der Überfamilie der Cypridoidea zuzuordnen – und genau dieses Taxon reproduziert sich mit Riesenspermien.

Natürlich erfordert eine solche Art der Fortpflanzung besondere Anpassungen. Vier Hodenschläuche, geschmiegt an die Innenseite der Gehäuseklappe, liefern die jungen, noch fast runden Spermienzellen. Diese formen sich im Lauf ihrer Entwicklung zu langen Fasern um

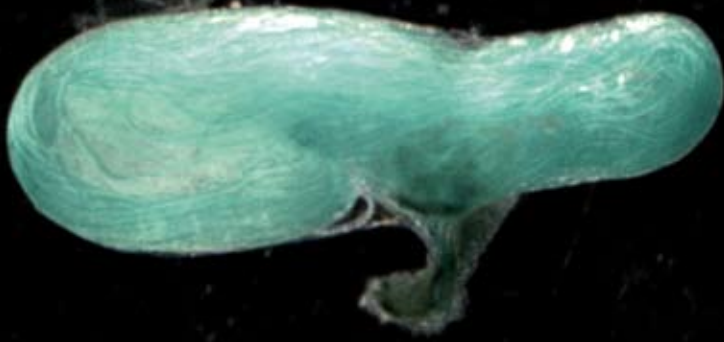
und verdrillen sich dann sogar, bis sie wie dünne Seile aussehen. Das passiert in einem extrem verlängerten Samenleiter. Er ist nahe am Ausgang mit Chitin verstärkt und mit strahlenförmigen Rosetten versehen, die eine kräftige Muskulatur aufspannen. Dieses so genannte Zenker-Organ fungiert als Saug-Druck-Pumpe, die den Transport der langen Spermien durch den Kopulationsapparat hindurch in das Weibchen ermöglicht.

Doch damit nicht genug: Zu dem beschriebenen System von Reproduktionsorganen existiert ein Zwilling auf der anderen Körperseite. Beide haben keinerlei Verbindung zueinander und münden jeweils in »ihr« Exemplar des doppelt ausgebildeten Penis.

Aber wozu ein doppelter Penis? Natürlich für die gleichfalls doppelt vorhandenen Vaginen der Weibchen. Von ihnen führt jeweils ein langer, vielfach verknäuelter Kanal in einen Samenbehälter, in dem die Spermien aufbewahrt werden, bis es zur Eiablage kommt. Dann werden sie wieder heraustransportiert und den Eiern zur Befruchtung zugeführt. Wie das



Muschelkrebse – links die nur knapp zwei Millimeter große Süßwasserart *Eucypris virens* – leben schon seit 500 Millionen Jahren auf der Erde. Ihre Fossilien sind teils ausgezeichnet erhalten. Das oben abgebildete Exemplar von *Harbinia micropapillosa* stammt aus der Santana-Fauna in Brasilien.



RENATE MATZKE-KARASZ, UNIVERSITÄT MÜNCHEN

genau geschieht, weiß man noch nicht. Bekannt ist aber, dass das gesamte Spermium in das Ei eintritt und sich unterhalb der Eihülle mehrfach aufwickelt.

Welchen Sinn hat eine so aufwändige Fortpflanzungsart? Darauf gibt es keine eindeutige Antwort. In manchen Tiergruppen mag es um Spermienkonkurrenz gehen: Die Weibchen sollen gegen spätere Begattungen versiegelt werden. Riesenspermien können aber auch eine Methode sein, die Eier mit zusätzlichem organischem Material zu versorgen. Bei *Drosophila* scheint ihre Bevorzugung durch die Weibchen ein Wettüben bei den Männchen entfacht zu haben: Experimente ergaben hier einen konstant hohen Selektionsdruck in Richtung Spermienverlängerung.

### Langlebiger Luxus

Kann sich ein derart kostenintensives Fortpflanzungssystem in der Evolution überhaupt längere Zeit halten? Auch dies ist eine interessante, bislang ungeklärte Frage. Meine Kollegen und ich hofften sie mit den stammesgeschichtlich sehr alten Muschelkrebse beantworten zu können. Wie lange gibt es bei ihnen schon das System der Riesenspermien? Vielleicht könnten die gut erhaltenen Fossilien Auskunft darüber geben.

*Harbinia micropapillosa* ist eine nur fossil bekannte Ostracodenart aus der Unterkreide. Im heutigen Araripe-Becken in der Region Santana im Osten Brasiliens lagerten sich in einem wohl leicht brackigen Milieu vor gut 100 Millionen Jahren sehr schnell sehr feine Sedimente ab, töteten die Lebewesen und schützten sie durch Sauerstoffabschluss vor Verwesung. Heute überwältigt diese fossile Fauna und Flora mit einer außergewöhnlichen Erhaltung sogar der weichen, organischen Anteile, die sonst kaum je versteinert sind. Außer Fischen, für welche die Santana-Fauna berühmt ist, finden

sich viele Ostracoden – meistens der Art *H. micropapillosa*.

Durch schonende Säurebehandlung aus dem Gestein gelöst, zeigen einige dieser Muschelkrebse einen Weichkörper mit allen Details bis zu feinsten Borstenspitzen. Mittels Elektronenmikroskopie hat Robin Smith solche Exemplare im Jahr 2000 am Natural History Museum in London genauestens dokumentiert und ihre taxonomische Verwandtschaft mit der heutigen Gattung *Eucypris* festgestellt.

Für uns interessant war die Frage, ob sich vielleicht auch Reste der inneren Organe aufspüren lassen. Bei der traditionellen Methode werden die Fossilien im Wechsel abgeschliffen und fotografiert und die gefundenen Strukturen schließlich aus den Bilderserien per Computer dreidimensional rekonstruiert. Das Verfahren hat sich bei der Analyse von noch älteren, silurischen Ostracoden aus England durchaus bewährt. Doch leider zerstört es die Probe und lässt nur ein virtuelles Fossil übrig.

Wir liebäugelten deshalb mit einer Alternative: der Computertomografie (CT). Dabei wird ein Objekt scheibchenweise rundum mit Röntgenstrahlung durchleuchtet. Aus der Abschwächung des Strahls in den verschiedenen Richtungen, welche die unterschiedliche Absorption der einzelnen Organe widerspiegelt, errechnet ein Computer dann Schnittbilder und fügt sie zu dreidimensionalen Ansichten zusammen. In der Medizin hat die Computertomografie heute einen festen Platz. Wir fragten uns, inwieweit sie auch auf anorganisches Material anwendbar ist und ob sich insbesondere Strukturen in einem Mikrofossil damit auflösen lassen.

Antwort versprochen wir uns von einer Reise nach Grenoble in Frankreich. Dort steht das European Synchrotron Research Facility, kurz ESRF. Der von 19 EU-Ländern finanzierte Teilchenbe-

Die fadenförmigen Spermien von Muschelkrebse können bis zu zehnmal so lang sein wie die Tiere selbst. Die rasterelektronenmikroskopische Aufnahme unten zeigt ein Riesenspermienbündel von *Eucypris virens*. Die Weibchen speichern die Riesenspermien bis zur Eiablage in einem Samenbehälter, der im gefüllten Zustand mehr als ein Drittel ihrer Körperlänge hat. Das Foto links zeigt ein angefärbtes Exemplar von *E. virens* im Lichtmikroskop. Der Behälter ist halb gefüllt und 0,6 Millimeter lang.

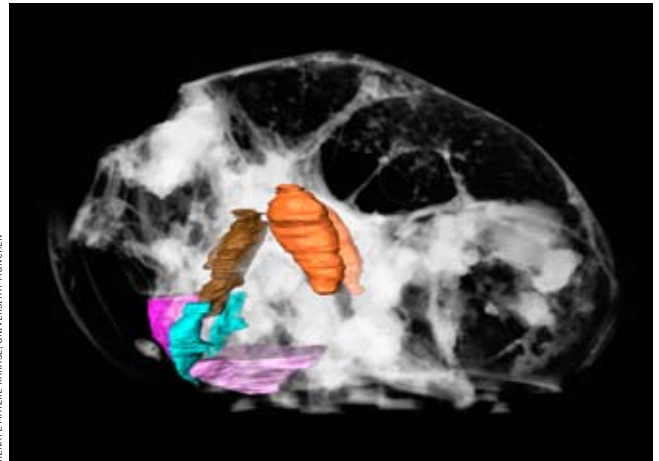
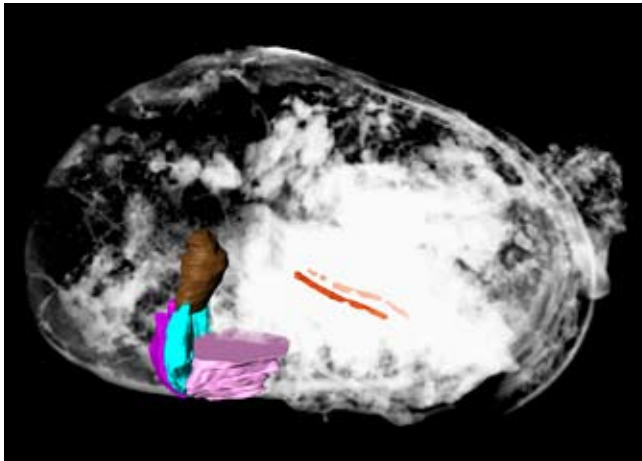


RENATE MATZKE-KARASZ, UNIVERSITÄT MÜNCHEN

schleuniger liefert kohärente Röntgenstrahlen, bei denen wie bei Laserlicht alle elektromagnetischen Wellen synchron im Gleichtakt schwingen – sie stimmen sowohl in der Wellenlänge als auch in der Phase überein. Unter dieser besonderen Voraussetzung konnten Paul Tafforeau und Kollegen am ESRF die Methode der Holotomografie entwickeln, bei der das zu untersuchende Objekt in vier unterschiedlichen Abständen zum Detektor durchstrahlt wird.

Das bewirkt Phasenverschiebungen, mit denen sich so genannte Phasenkontrastaufnahmen erzeugen lassen. Sie machen auch geringe Unterschiede in der Röntgendichte einzelner Bereiche im Inneren des Untersuchungsgegenstands deutlich sichtbar. Dadurch ist die Holotomografie gut 1000-mal empfindlicher als die klassische, auf Absorption beruhende CT.

Einige wenige Male war das Verfahren schon angewendet worden, bevor Kurator Giles Miller vom Natural History Museum Exemplare von *H. micropapillosa* für die Untersuchung nach Grenoble brachte, allerdings noch nie bei solch kleinen, nur wenige Millimeter langen Objekten! Eine Nonstop-Messzeit von



Fossilien von *Harbinia micropapillosa* wurden mit einer speziellen Röntgenmethode namens Holotomografie durchleuchtet. In der anschließenden Computerrekonstruktion der Aufnahmen ließen sich bei Männchen (links) die zentralen Röhren der beiden Spermiumpumpen (orange angefärbt) und bei Weibchen (rechts) die beiden Samenbehälter (ebenfalls orange) erkennen. Zur Orientierung sind jeweils auch die Unter- und Oberlippe (tila/pink), die Mandibeln (türkis) und der Schlund (braun) markiert.

48 Stunden hatte man für uns reserviert, in der 23 Fossilien und 18 Vergleichsstücke der heute lebenden *Eucypris virens* durchstrahlt werden mussten. Anschließend verarbeitete der Großrechner des ESRF die Daten mit einem an das besondere Fossilmaterial angepassten Algorithmus. Er lieferte schließlich 1200 bis 1500 Grauwertschnittbilder pro durchleuchtetem Objekt, deren Auflösung unter einem Mikrometer lag.

Darauf waren zwar teils schon mit bloßem Auge interessante Strukturen zu erkennen, doch erst als Radka Symonová von der Universität Prag und ich die Scans auf einem Großrechner des Münchener Leibniz-Rechenzentrums mit einer 3-D-Visualisierungssoftware verarbeiteten, fanden wir unsere kühnsten Hoffnungen bestätigt: Die *Harbinia*-Fossilien wiesen innere Strukturen auf, die den Reproduktionsorganen heutiger Süßwasserstracoden genau entsprechen. So zeigten männliche Exemplare die paarigen Reste der Zenker-Organe. Die weiblichen Tiere müssen sogar kurz vor ihrem Tod begattet worden sein, denn ihre beiden Samenbehälter waren deutlich zu sehen. Wegen ihrer dünnen Membranhaut sind diese Organe bei unbefruchteten Weibchen zusammengefallen und unsichtbar.

Das war der Beweis: *H. micropapillosa* hat sich vor über 100 Millionen Jahren bereits mit Riesenspermien fortgepflanzt und dafür die gleichen Organe benutzt

wie ihre heutigen Nachkommen. Damit steht fest, dass diese bizarre Fortpflanzungsart trotz des hohen Aufwands keine vorübergehende Laune der Natur ist, die sich auf Dauer nicht halten kann. Vielmehr erweist sie sich als hochgradig stabil und damit effizient – auch wenn noch niemand weiß, worin diese Effizienz genau besteht.

#### MATHEMATIK

## Geometrischer Prüfstein für Wahlgerechtigkeit

Ob ein Verfahren zur Umsetzung von Stimmanteilen in Parlamentssitze verzerrungsfrei und damit »gerecht« ist, lässt sich mit räumlichen Begriffen anschaulicher darstellen und mit kombinatorischen Methoden umfassender ermitteln als durch bloßes Ausprobieren von Einzelfällen.

Von Udo Schwingenschlögl

Nach einer Wahl steht zwar fest, wie viel Prozent der Stimmen jede Partei erreicht hat. Wie viele Abgeordnete sie jeweils ins Parlament entsenden darf, ist damit allerdings nicht automatisch klar. Da man Parlamentssitze nicht zu einem Bruchteil besetzen kann, lässt sich deren exakte Vergabe nach Stimmenan-

Mit unseren Untersuchungen gelang uns der erste fossile Nachweis dieser Reproduktionsart überhaupt. Nebenbei entdeckten wir das Wunder einer Stein gewordenen Begattung. Nach der erfolgreichen Nagelprobe eröffnet die nicht invasive Holotomografie nun die Möglichkeit zur Durchleuchtung von vielen weiteren wertvollen Fossilien, die derzeit in den Sammlungen der Museen verstauen. In diesem Sinne hoffen wir, dass unsere Arbeit auch einen Stein, pardon: viele Versteinerungen ins Rollen gebracht hat.

Renate Matzke-Karasz ist promovierte Biologin und Privatdozentin für Geobiologie am GeoBio-Center der Universität München.



geschlagen worden und werden zum Teil praktiziert (Spektrum der Wissenschaft 9/2002, S. 73, und 10/2002, S. 72).

Bei der Wahl zum Deutschen Bundestag kommt die »Quotenmethode mit Ausgleich nach größten Resten« zum Einsatz. Zunächst wird dabei jeder Partei der ganzzahlige Anteil ihres Idealanspruchs an Mandaten zugewiesen; im obigen Fall wären das elf. Von den noch freien Sitzen erhalten dann diejenigen Parteien einen weiteren, deren Idealansprüche die größten Nachkommaanteile aufweisen. Das mag das folgende Beispiel verdeutlichen.

Bei der Bundestagswahl 2005 ergaben sich die Idealansprüche 213,170 (SPD), 172,919 (CDU) 45,996 (CSU), 50,524 (Grüne), 61,184 (FDP) und 54,208 (Linke). Nachdem im ersten Schritt 213 Sitze an die SPD, 172 an die CDU und so weiter gegangen sind, bleiben noch drei von 598 Parlamentssitzen frei, die wegen der größten Nachkommaanteile der Reihe nach an CSU, CDU und Grüne vergeben werden. Überhangmandate, die hier nicht besprochen werden sollen, haben die Besetzung des Bundestags allerdings noch modifiziert.

Bei einer anderen Klasse von Verfahren, den »Divisormethoden«, werden die Idealansprüche zwar im Prinzip auf- oder abgerundet. Man teilt sie jedoch vorher durch eine geeignet gewählte Zahl, da-

mit hinterher die richtige Gesamtmenge an Abgeordneten herauskommt.

Nachdem absolute Gerechtigkeit, also exakte Proportionalität, im Einzelfall nicht erreichbar ist, sollte ein Zuordnungsverfahren wenigstens »Gerechtigkeit im Durchschnitt« gewährleisten. Es müsste folglich dafür sorgen, dass zumindest im langfristigen Mittel die zu erwartende Sitzzahl mit dem Idealanspruch übereinstimmt. Dann könnte eine Partei, die bei der aktuellen Wahl zu kurz gekommen ist, darauf hoffen, dafür ein anderes Mal begünstigt zu werden.

Ob das für ein Zuordnungsverfahren zutrifft, lässt sich feststellen, indem man für jede Partei und jeden denkbaren Wahlausgang die Größe »Sitzzahl minus Idealanspruch«, die so genannte Sitzverzerrung, bestimmt und dann über sämtliche denkbaren Wahlausgänge summiert. Das Ergebnis sollte jeweils gleich null sein.

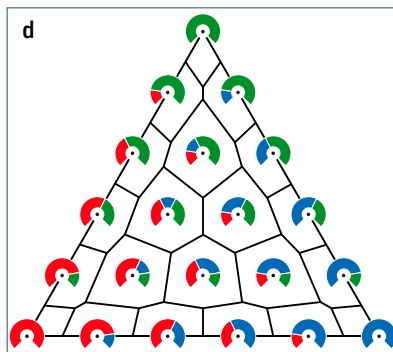
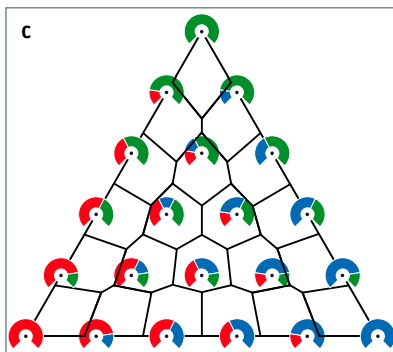
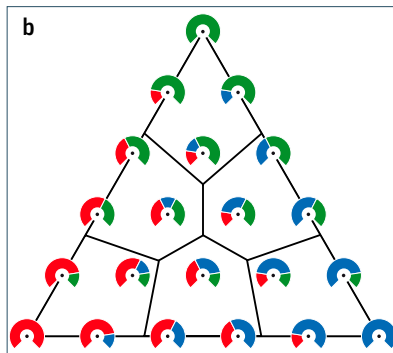
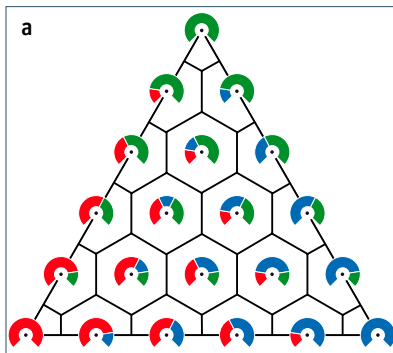
Dieses Verfahren unterstellt allerdings, dass jeder Wahlausgang mit gleicher Wahrscheinlichkeit vorkommt. Das ist in der Praxis natürlich völlig falsch. Überraschenderweise schadet diese Fehlannahme aber kaum. Genaueres Nachrechnen zeigt, dass sich Abweichungen von der Gleichverteilung in gleicher Richtung auf Sitzverteilung und Idealanspruch auswirken, weshalb sich diese Auswirkungen annähernd aufheben.

Für das Verfahren muss man den Erwartungswert für die Abweichung zwischen Sitzzahl und Idealanspruch bestimmen. Da dieser gleich der Differenz der Erwartungswerte für Sitzzahl und Idealanspruch ist, genügt es, die beiden letztgenannten Größen einzeln auszurechnen. Als hilfreich erweist sich dabei eine Kombination aus geometrischen und kombinatorischen Betrachtungen (*Mathematische Semesterberichte*, Bd. 55, S. 43).

### Sitzverteilung mit Einzugsgebiet

Bei einer Wahl, an der  $k$  Parteien teilnehmen, ist ein Wahlausgang der Vektor  $(w_1, w_2, \dots, w_k)$ , wobei  $w_1$  den Stimmenanteil von Partei 1 bedeutet,  $w_2$  denjenigen von Partei 2 und so weiter. Alle  $w_j$  liegen zwischen 0 und 1 und addieren sich zu 1 (nicht abgegebene und ungültige Stimmen bleiben unberücksichtigt). Wenn nur drei Parteien beteiligt sind, bildet die Menge aller Wahlausgänge ein gleichseitiges Dreieck mit den Ecken  $(1, 0, 0)$ ,  $(0, 1, 0)$  und  $(0, 0, 1)$ . An dessen Stelle tritt für größere Werte von  $k$  ein reguläres Tetraeder ( $k=4$ ) oder allgemein ein so genanntes Simplex im  $(k-1)$ -dimensionalen Raum. Im Folgenden sei der Einfachheit halber nur der Fall  $k=3$  betrachtet. Die Ergebnisse lassen sich aber ohne Weiteres auf mehr Parteien verallgemeinern.

Für gewisse Punkte in dem Dreieck ist die Sitzzuteilung von vornherein klar, weil die zugehörigen Idealansprüche bereits ganze Zahlen sind. Für geringfügig abweichende Wahlergebnisse sollte ein vernünftiges Zuteilungsverfahren dieselbe Sitzverteilung ergeben. Allgemein ist also jeder Idealpunkt von der Teilmenge jener Punkte umgeben, denen dieselbe Sitzverteilung zugewiesen wird. Damit zerfällt die Menge aller denkbaren Wahlergebnisse in die »Einzugsbereiche« der verschiedenen Sitzverteilungen (Bild links).



Für drei Parteien und ein Parlament mit fünf Sitzen ergeben sich nach der Quotenmethode mit Ausgleich nach größten Resten (a) sowie der Divisormethode mit Aufrundung (b), Standardrundung (c) und Abrundung (d) die hier gezeigten Idealpunkte und Zuteilungspolygone. Bei der Divisormethode mit Aufrundung erhält eine Partei schon bei einer einzigen Stimme einen Sitz. Die Einzugsbereiche der Idealpunkte am Rand sind daher »unendlich dünn«: Sie bestehen nur aus einem Linienstück.

# WÄHLEN SIE AUS UNSEREN VORTEILSABOS:

## JAHRESABO:

- 12 Ausgaben zum Preis von nur € 6,60 (statt € 7,40) pro Ausgabe; Schüler, Studenten und Azubis zahlen sogar nur € 5,55.
- 1 Begrüßungspräsent zur Wahl



Weitere  
aktuelle  
Präsente unter  
[spektrum.de/  
september](http://spektrum.de/september)

Raten Sie sich klug! Das Buch »Wie Schwarze Löcher Spaghetti machen« präsentiert 77 unterhaltsame Wissenschaftsrätsel aus der Rubrik »DenkMal« von spektrumdirekt.

Nutzen Sie die Himmelscheibe von Nebra in ihrer Originalverwendung! Als geprägter Blechkalender (Maße 30 x 20 cm) ist sie ein praktischer Blickfang für zu Hause oder Ihr Büro!



## EIN ABO – VIELE VORTEILE

- 1 Nutzen Sie Ihren Sparvorteil gegenüber dem Einzelkauf.
- 2 Sie verpassen keine Ausgabe und bekommen das Heft sicher verpackt und pünktlich nach Hause geschickt.
- 3 Profitieren Sie vom kostenlosen Onlinezugang auf alle Spektrum-Ausgaben seit 1993.
- 4 Jeden Monat finden Sie im Internet einen nicht im Heft publizierten Zusatzartikel.
- 5 Sie können ausgewählte Sonderhefte gratis downloaden.
- 6 Mit Ihrem persönlichen Mitgliedsausweis (zum Download) kommen Sie in den Genuss zahlreicher Vergünstigungen.
- 7 Als Abonnent können Sie unser Produkt des Monats günstiger bestellen.

Ihr Zugang zu den  
Onlinevorteilen:

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

**Spektrum**  
DER WISSENSCHAFT

Wissenschaft aus erster Hand

# MEHR WISSEN, WENIGER ZAHLEN, NICHTS VERPASSEN!

## LESER WERBEN LESER:

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



Der Universalgutschein BestChoice ist einlösbar bei bis zu 100 Anbietern in der Bundesrepublik wie z. B. Amazon, IKEA, Douglas, OBI oder WOM. Umtausch gegen Bargeld ist ausgeschlossen.



Der Regenschirm »Sonnenfraktale« begleitet Sie durch trübe Regentage und bietet unter seinem großen Dach auch zwei Personen Schutz (Ø 1,30 m).

## SO KÖNNEN SIE BESTELLEN:



MIT DER BESTELLKARTE



TELEFON: 06221 9126-743



FAX: 06221 9126-751



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

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

## SPEKTRUM VERSCHENKEN

VERSCHENKEN SIE EIN JAHR  
LESEVERGNÜGEN

Das erste Heft des Abonnements verschicken wir – zu dem von Ihnen gewünschten Termin – zusammen mit einer Grußkarte in Ihrem Namen an den Beschenkten. Das Präsent schicken wir an Ihre Adresse.

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

## MINIABO

SIE MÖCHTEN SPEKTRUM  
DER WISSENSCHAFT GERNE  
NOCH TESTEN?

Mit einem Spektrum-Miniabo (3 Ausgaben) zahlen Sie pro Heft nur € 4,83 und erhalten außerdem noch ein Präsent zur Wahl!

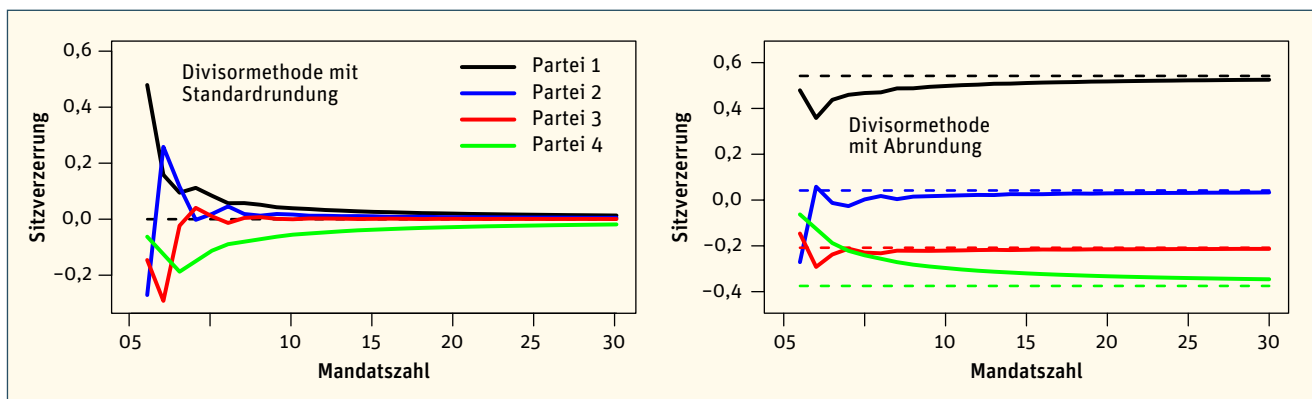
[www.spektrum.de/september](http://www.spektrum.de/september)

## PRODUKT DES MONATS

Das Salz- und Pfefferstreuer-Set »Biegsie« aus Edelstahl ist eine gelungene Synthese aus Gewürzstreuer und Schraubenschraube. Gewürzt wird durch ein einfaches Biegen der Schraubenschrauben. Höhe 75 mm, Lieferung ohne Füllung. Preis für Abonnenten: € 28,- inkl. Versand Inland (statt € 34,90)



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



Die Sitzverzerrung nähert sich mit der Mandatszahl asymptotisch einem Grenzwert, den sie schon bei 30 Abgeordneten fast erreicht. Die Grafik demonstriert das für zwei Zuteilungsverfahren am Beispiel von vier Parteien, die absteigend nach ihrem Stimmenanteil geordnet sind (größte Partei: 1; kleinste Partei: 4). Eigentlich sollte die Sitzverzerrung gegen null konvergieren, was bei der Divisormethode mit Abrundung aber nicht der Fall ist.

Der Erwartungswert für den Idealananspruch aller Parteien bei gleicher Wahrscheinlichkeit aller Wahlausgänge ist der Mittelpunkt des Dreiecks und beträgt übereinstimmend ein Drittel. Für den Erwartungswert der Sitzverteilung nehme man jede Sitzverteilung mal dem Flächenanteil des zugehörigen Einzugsbereichs am Dreieck und addiere alle diese Produkte.

Dieses Addieren ist im allgemeinen Fall allerdings ziemlich kompliziert und bedarf ausgefeilter kombinatorischer Methoden. Unter der realistischen Annahme, dass nicht alle Wahlergebnisse gleich wahrscheinlich sind, muss man sich das Dreieck mit einer Masse behaftet denken, deren Dichte die Wahrscheinlichkeit des jeweiligen Wahlausgangs widerspiegelt, und mit den Schwerpunkten des Dreiecks und der Einzugsgebiete rechnen.

Es stellt sich heraus, dass alle Einzugsbereiche geradlinig begrenzt sind. Man könnte sie beim Dreieck »Zuteilungspolygone« nennen; im allgemeinen, höherdimensionalen Fall heißen sie »Zuteilungspolytope«. Wegen ihrer einfachen Gestalt sind ihre Flächen relativ leicht zu berechnen. Aber auch die bloße Betrachtung kann schon gewisse Einsichten vermitteln. Wenn zum Beispiel der Idealpunkt nicht genau in der Mitte des Zuteilungspolytops liegt, ist zu befürchten, dass in dem Verfahren eine systematische Verzerrung steckt.

Das Bild muss symmetrisch bezüglich der drei Spiegelachsen des gleichseitigen Dreiecks sein; sonst läge der absurde Fall

vor, dass das Zuteilungsergebnis von der Reihenfolge abhängt, in der die Parteien berücksichtigt werden. Es genügt also, von den sechs gleichen oder spiegelbildlich gleichen Teildreiecken ein einziges zu betrachten. Das ist sogar notwendig, weil sonst ein Fehler des Verfahrens rechnerisch von den entsprechenden Fehlern in den anderen Teildreiecken kompensiert würde und dadurch unentdeckt bliebe.

### Systematische Verzerrungen

Diese geometrisch-kombinatorisch inspirierte Berechnungsmethode bestätigt zunächst Eigenschaften der einzelnen Zuteilungsverfahren, die schon durch Ausprobieren zahlreicher Einzelfälle bekannt waren, liefert jedoch zusätzlich handfeste Beweise.

Interessant ist vor allem der Grenzfall großer Parlamente. Je mehr Sitze zu vergeben sind, desto genauer kann das Wahlergebnis abgebildet werden, unabhängig von der Zuteilungsmethode. Wenn ein Verfahren im Grenzfall eines unendlich großen Parlaments die Proportionalität herstellt, nennt man es »asymptotisch unverzerrt«. Numerische Untersuchungen ergaben, dass 30 hier schon eine gute Näherung an unendlich darstellt. Ab dieser Parlamentsgröße zeigen die Verfahren nur noch sehr geringe Abweichungen vom asymptotischen Verhalten.

Das Quotenverfahren mit Ausgleich nach größten Resten ist asymptotisch unverzerrt, desgleichen das Divisorverfahren mit Standardrundung. Die übrigen Divisorverfahren zeigen systematische

Verzerrungen, wohlgernekt auch in großen Parlamenten, wo sich Stimmenanteil und Sitzverteilung eigentlich gut in Einklang bringen lassen. So begünstigt das Divisorverfahren mit Abrundung die großen Parteien. Bei der Aufrundung verhält es sich genau umgekehrt.

Mit dem beschriebenen Verfahren kann man neuerdings auch die Auswirkungen von Sperrklauseln wie der deutschen Fünf-Prozent-Hürde präzise quantifizieren. Für alle Parteien, die daran nicht scheitern, gibt es eine beruhigende Nachricht. Sie werden nicht nur genauso korrekt behandelt wie zuvor; die Sperrklausel wirkt sogar als gleichmäßiger Dämpfer für die Sitzverzerrung. Diese wird bei einer Fünf-Prozent-Klausel zum Beispiel um  $k \cdot 5$  Prozent verringert. Die fünf Parteien, die bei der letzten Bundestagswahl ins Parlament einzogen, kamen also in den Genuss einer um 25 Prozent geringeren Verzerrung.

Über das konkrete Ergebnis hinaus ist es erstaunlich, dass das hier vorgestellte Verfahren überhaupt zum Ziel führt. Man beginnt mit einer völlig unrealistischen Annahme, nämlich der Unterstellung, dass alle Wahlergebnisse gleich wahrscheinlich sind. Nur weil diese Annahme die Situation ganz erheblich vereinfacht, gelingt es, durch – immer noch schwierige – Berechnungen überhaupt zu einem Ergebnis zu kommen. Erst nachträglich lässt sich dann nachweisen, dass sich dieses Ergebnis nur geringfügig ändert, wenn man die Annahme fallen lässt. Manchmal ist es also relativ uninteressant, ob ein mathematisches Modell der Realität entspricht; es genügt, dass man damit rechnen kann.

**Udo Schwingschlägl** ist in Physik und Mathematik promoviert und Privatdozent an der mathematisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Augsburg.

## ONKOLOGIE

# Wie Blutkrebszellen das Gehirn befallen

Bei einer Leukämie im Kindesalter, die im Prinzip gut behandelbar ist, überwinden die Krebszellen nach zunächst erfolgreicher Therapie manchmal die Blut-Hirn-Schranke. Mit neuen Erkenntnissen über den Mechanismus lässt sich dieser fatale Rückfall vielleicht verhindern.

Von Andreas Baumann

Jedes Jahr erkranken in Deutschland etwa 400 Kinder an einer besonderen Form von Blutkrebs: der akuten lymphatischen Leukämie der T-Zellreihe (abgekürzt T-ALL). Diese Krankheit bedeutete noch vor wenigen Jahrzehnten den fast sicheren Tod. Heute sind die Aussichten deutlich besser: Ungefähr 80 Prozent der Kinder können durch Chemo- und Strahlentherapie geheilt werden. Allerdings gibt es eine beträchtliche Rückfallquote, die Ärzten weiterhin Kopfzerbrechen bereitet. In rund der Hälfte dieser Rezidive befällt der Krebs das Gehirn oder Rückenmark, was eine weitere Behandlung nahezu aussichtslos macht.

Ein Forscherteam um Ioannis Aifantis vom Krebs-Institut der New York University konnte nun klären, wie es die Krebszellen schaffen, die Blut-Hirn-Schranke zu überwinden, welche die Neurone des Zentralnervensystems gegen den Blutkreislauf abriegelt. Die entscheidende Rolle spielt demnach ein Rezeptor auf der Oberfläche der Krebszellen. An ihm könnten künftige Medikamente ansetzen.

Es gibt mehrere Arten von Leukämie. Aber alle haben gemeinsam, dass im Knochenmark zu viele funktionsuntüchtige Vorläufer der weißen Blutkörperchen produziert werden. Durch diesen Überschuss sind die anderen Bestandteile des Bluts stark vermindert.

Man unterscheidet zwischen chronischen und akuten Formen der Leukämie. Zu letzteren gehört die T-ALL. Dabei sind Abwehrzellen des Körpers betroffen, die im Thymus heranreifen und deshalb T-Lymphozyten oder kurz T-Zellen heißen. Deren Vorläufer, die so genannten Thymozyten, vermehren sich in diesem Fall unkontrolliert. Die Folgen

sind unter anderem Blutarmut, Blutgerinnungsstörungen und hohes Fieber.

Frühere Untersuchungen hatten gezeigt, dass ein Gen namens *Notch1* mit der Entwicklung von T-ALL zusammenhängt. Es zählt zu den so genannten Protoonkogenen, die im normalen Erbgut vorkommen und gewöhnlich das Wachstum der Zelle steuern. Schon eine kleine Mutation kann jedoch dazu führen, dass sie zu Onkogenen werden und ein ungebremstes Wuchern begünstigen. Bei fast der Hälfte aller T-ALL-Patienten finden sich mutierte Versionen von *Notch1*.

Für ihre Untersuchung führten die Forscher überaktive Formen dieses Gens in Mäuse ein. Erwartungsgemäß erkrankten die betreffenden Mäuse nicht nur an Leukämie; die wuchernden Thymozyten überwandern auch die Blut-Hirn-Schranke und drangen in die Zerebrospinalflüssigkeit vor, die Gehirn und Rückenmark umspült und vor mechanischen Belastungen schützt.

## Verborgener Zugangsschlüssel

Als Nächstes suchten Aifantis und seine Kollegen nach anderen Genen, die von *Notch1* reguliert werden und für den Befall des zentralen Nervensystems verantwortlich sein könnten. Als guter Kandidat erwies sich eines, auf dem das Protein CCR7 verschlüsselt ist. Der Eiweißstoff befindet sich in der Außenmembran von Lymphozyten und fungiert dort als Rezeptor für so genannte Chemokine. Diese kleinen Signalproteine werden bei Infekten, Verletzungen oder Entzündungen produziert und locken Immunzellen – darunter auch Lymphozyten – an, die sich daraufhin an der kritischen Stelle im Körper sammeln, um dort beispielsweise Krankheitserreger zu bekämpfen.

CCR7 spielt also eine wichtige Rolle bei der Bewegung der weißen Blutkörperchen. Als Rezeptor lagert es die beiden



Internationale Fachmesse  
 ■ Ideen ■ Erfindungen ■ Neuheiten  
**5. – 8. November 09**

Die No. 1  
 im Kontakt zur  
 Erfindung!



- **Neue Ideen für den Markt.** Die iENA 2009 Nürnberg ist der internationale Markt für Ideen, Erfindungen und Neuheiten.
- **Wichtig für alle,** die Erfindungen und Neuheiten verwerten und Top-Kontakte zu Erfindern suchen.
- **Erfinder-Symposium** zum Thema „Patentfonds und andere Finanzierungsmöglichkeiten für Erfinder“ am 6. November von 10 – 13 Uhr (Teilnahme im Eintritt enthalten)
- **Fachberatung und Information**

**Messe Nürnberg · Halle 12**



Kompetenzpartner:



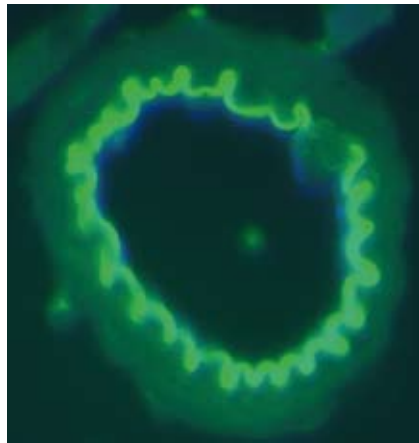
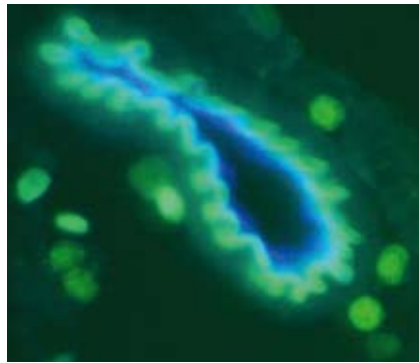
Ein Programm  
 des Bundes-  
 ministeriums für  
 Wirtschaft und  
 Technologie

In Kooperation mit:



Veranstalter/Organisation  
 AFAG Messen und Ausstellungen GmbH  
 Projektmanagement iENA 2009  
 Messezentrum 1, 90471 Nürnberg  
 ☎ 09 11 - 9 88 33 - 570  
 ☎ 09 11 - 9 88 33 - 579  
 ✉ [iena@afag.de](mailto:iena@afag.de) · [www.iena.de](http://www.iena.de)

Wenn Leukämiezellen (grün fluoreszierend) über große Mengen eines Rezeptors namens CCR7 auf ihrer Oberfläche verfügen, können sie mit dem Chemokin CCL19 (blau fluoreszierend) in der Wand kleiner Venen im Gehirn interagieren und auf diese Art die Blut-Hirn-Schranke überwinden (oben). Fehlt das CCL19, bleibt ihnen der Übertritt aus dem Blutgefäß ins Zentralnervensystem verwehrt (unten).



IOANNIS AIFANTIS, LANGONE MEDICAL CENTER, NEW YORK UNIVERSITY

Chemokine CCL19 und CCL21 an. Früheren Untersuchungen zufolge ist das Zusammenwirken dieser drei Proteine an der Metastasenbildung von Brust- oder Hautkrebs beteiligt. Das Team von Aifantis stellte nun fest, dass das Gen für CCR7 bei T-ALL-Patienten in rund 80 Prozent der Lymphozyten überaktiv ist. Wurde durch eine Mutation *Notch1* ausgeschaltet, entstand der Rezeptor dagegen nur noch in sehr geringer Menge.

Um die Rolle von CCR7 bei der akuten lymphatischen Leukämie zu prüfen, injizierten Aifantis und seine Kollegen zwei Gruppen von Labormäusen, die nicht über ein funktionierendes Immunsystem verfügten, jeweils unterschiedliche Sorten in Zellkultur vermehrter Thymozyten von T-ALL-Patienten. Bei der einen Sorte funktionierte der Rezeptor normal, während ihn die Forscher bei der anderen blockiert hatten. Wie sich zeigte, lebten die Tiere, die Krebszellen mit blockiertem CCR7 erhielten, wesentlich län-

ger als die anderen. Eine genauere Untersuchung ergab bei ihnen deutlich weniger Tumoren. Außerdem waren Gehirn und Rückenmark nicht befallen – im Unterschied zu den Mäusen, denen Thymozyten mit funktionierendem CCR7-Gen übertragen worden waren.

Zum Schluss konnten die Forscher noch klären, welches der beiden Che-

mokine als Locksignal für den Rezeptor agiert. Die Antwort war insofern einfach, als sich CCL21 in den Leukämie-Mäusen gar nicht nachweisen ließ. Dagegen fand sich CCL19 in kleinen Venen des Gehirns nahe den Stellen, wo Tumorzellen die Blut-Hirn-Schranke überwunden hatten. Um sicherzugehen, schleusten die Wissenschaftler in immundefekte Mäuse, die auf Grund einer Mutation kein CCL19 bildeten, Leukämiezellen ein. Wie erwartet, verbreiteten sich die Krebszellen im ganzen Körper, aber nicht im Gehirn oder Rückenmark.

»Vielleicht gibt es Antikörper oder kleine Moleküle, mit denen man die Interaktion zwischen dem Chemokin und seinem Rezeptor verhindern oder zumindest reduzieren kann«, hofft Aifantis. »Mit etwas Glück ließe sich das als vorbeugende Behandlung gegen T-ALL-Rückfälle mit Infektion des zentralen Nervensystems einsetzen.« Bisher versucht man solche Rezidive mit Strahlen- und Chemotherapie abzublocken, was jedoch teils erhebliche Nebenwirkungen hat. Ein Medikament, das einen Angriff auf Gehirn und Rückenmark unterbindet, indem es die beiden Proteine daran hindert, miteinander in Kontakt zu treten, wäre also eine hochwillkommene Alternative.

**Andreas Baumann** ist freier Wissenschaftsjournalist in Darmstadt.

## GENETIK

# Schnipseljagd beim Strudelwurm

Strudelwürmer bestechen durch die wundersame Fähigkeit, abgetrennte Körperteile nachwachsen zu lassen – selbst den Kopf. Verantwortlich dafür sind unter anderem RNA-Schnipsel, die Berliner Forscher jetzt ins Visier nahmen.

Von Michael Groß

Ein Großteil der Erkenntnisse der modernen Biologie stammt von einer recht kleinen Zahl von Modellorganismen, die besonders intensiv erforscht werden. Dazu gehören aus dem Tierreich die Maus, die Tauffliege und der Fadenwurm.

Demnächst dürften die Strudelwürmer diesem erlauchten Klub beitreten. Die nur einige Millimeter oder Zentime-

ter langen Wassertierchen würden einen bisher kaum untersuchten Hauptast im Stammbaum des Lebens vertreten: den »Überstamm« der Lophotrochozoen, der auch Muscheln und Tintenfische einschließt, aber bisher nicht einmal eine deutsche Bezeichnung hat. Die Tauffliege zählt dagegen ebenso wie der Fadenwurm zum Überstamm der Häutungstiere (Ecdysozoa) und die Maus zu dem der Neumünder (Deuterostomia).

Was die Strudelwürmer den gängigen Modelltieren der Biologie voraushaben, ist ihre bemerkenswerte Fähigkeit zur Regeneration amputierter Körperteile. Sogar ein abgetrennter Kopf wächst wieder nach. Wissenschaftler führen das darauf zurück, dass die Tiere zu rund einem Viertel aus noch nicht festgelegten Stammzellen bestehen, die sich in die Zelltypen des verlorenen Gewebes verwandeln können. Das Studium der un-

# NEUES AUS DEM LESERSHOP



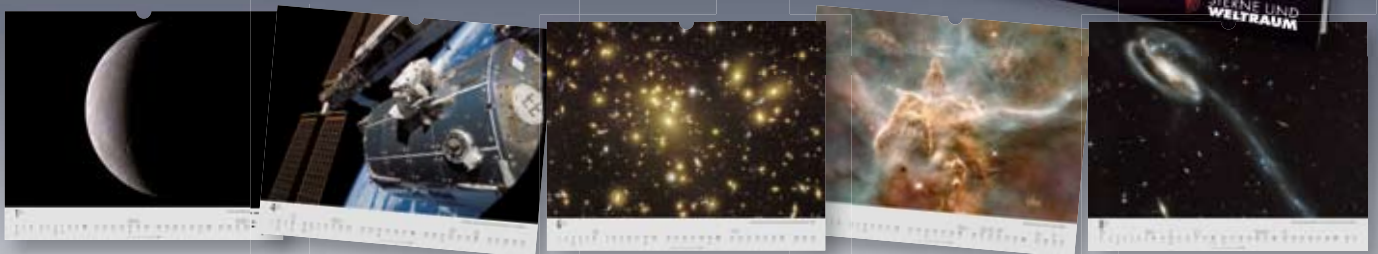
## AHNERTS ASTRONOMISCHES JAHRBUCH 2010

Wo und wann ist der Planet Mars am Himmel zu sehen? Welche besonderen Ereignisse sind in der kommenden Nacht zu beobachten? Ahnerts Astronomisches Jahrbuch liefert alle wichtigen Informationen für das eigene Erkunden des Sternenhimmels. Der neu gestaltete Kalender präsentiert Tag für Tag die bedeutendsten astronomischen Ereignisse. Sternkarten für jeden Monat, Beschreibungen der Himmelsobjekte und viele Astroaufnahmen von erfahrenen Amateurastronomen erleichtern die Orientierung am Nachthimmel. Für Einsteiger und fortgeschrittene Sternfreunde ist der »Ahnert« das unentbehrliche Standardwerk. Ca. 210 Seiten, € 10,90 zzgl. Porto, als Standing Order € 8,50 inkl. Inlandsversand; ISBN: 978-3-941205-27-7; Erscheint am 18. 09. 2009

## KALENDER »HIMMEL UND ERDE 2010«

Astronomen präsentieren im Bildkalender »Himmel und Erde 2010« ihre schönsten Aufnahmen und lassen Sie an den fantastischen Möglichkeiten der modernen Naturbeobachtung teilhaben. Zusätzlich bietet er wichtige Hinweise auf die herausragenden Himmelsereignisse 2010 und erläutert auf einer Extraseite alle auf den Monatsblättern des Kalenders abgebildeten Objekte knapp und anschaulich. 14 Seiten; 13 farbige Großfotos; Spiralbindung; Format: 55 x 45,5 cm; € 29,95 zzgl. Porto; als Standing Order € 27,- inkl. Inlandsversand; ISBN 978-3-411-80663-8

Unter [www.spektrum.com/kalender2010](http://www.spektrum.com/kalender2010) können Sie sich die Kalendermotive online anschauen.



Eine Bestellmöglichkeit für diese und noch mehr Produkte finden Sie unter:

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

**Spektrum**  
DER WISSENSCHAFT

Wissenschaft aus erster Hand

Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH | Slevogtstraße 3-5 | 69126 Heidelberg | Tel.: 06221 9126-743 | Fax: 06221 9126-751  
service@spektrum.com

## Springers Einwüfe

### Lernen Computer einst voneinander?

Erst als soziale Wesen werden Automaten ganz zu sich kommen.

**Mücken lernen nichts.** Wenn ich in einer lauen Sommernacht bei Kerzenschein auf dem Balkon sitze, taumeln sie scharenweise in die Flamme. Das Flugprogramm der Mücke besagt: Sorge für konstanten Winkel zum Licht, dann behältst du beim Fliegen die Richtung bei. Diese Regel funktioniert am Tag tadellos, weil die Sonne praktisch unendlich weit entfernt ist; doch bei Nacht und Kerzenlicht verführt sie den Insekten-Ikarus zum Spiralflug in den Flammentod.

Kerbtiere realisieren also ihr kurzes Leben lang ein evolutionär vorgegebenes, vererbtes Programm, das starr ausgeführt wird. Sie sind kleine Automaten. Deswegen erlaube ich mir folgenden Analogieschluss von der Bio- auf die Technoevolution: Wenn wir handelsübliche Computer bauen und programmieren, entsteht etwas, was mit seinem starren Verhalten einem Insektenhirn entspricht. Vielleicht kommt daher auch der Eindruck, dass heutige Roboter sich insektenhaft verhalten, wenn sie ihre vorprogrammierten Bewegungen ausführen.

Allerdings erproben Neurowissenschaftler und Informatiker bereits maschinelles Lernen. Computeralgorithmen und Roboter, die mit so genannten neuronalen Netzen operieren, verbessern ihr Verhalten, indem sie Erfahrungen sammeln. Dieser Vorgang kann wiederum als Modell für Lernprozesse dienen, mit denen ein neugeborenes Säugetier- oder Menschenkind – sogar mutterseelenallein – Dinge, insbesondere Gesichter, zu unterscheiden vermag (*Science*, Bd. 325, S. 284).

**Aber das einsame Sammeln von Erfahrungen** ist natürlich nur eine Schrumpfform des Lernens. Moses im Weidenkörbchen, Wolfskinder, Tarzan und Kaspar Hauser bilden lediglich fabelhafte Ausnahmen von der allgemeinen Regel: Lernen ist ein sozialer Vorgang unter Artgenossen.

Das gilt für Säugetiere generell – und für uns Menschen erst recht. Kein Lebewesen kommt so unreif auf die Welt wie unsereins. Wir können von vornherein weder sprechen noch gehen, weder Werkzeuge nutzen noch uns in andere hineinversetzen. Der Schweizer Biologe Adolf Portmann sprach darum schon Mitte des vorigen Jahrhunderts vom Menschen als »physiologischer Frühgeburt«, einem »sekundären Nesthocker«, der das erste Lebensjahr als »extrauterines Frühjahr« erlebt.

Deswegen sind wir Menschen von Anfang an auf ein ganz besonders intensives soziales Lernmilieu angewiesen, mit der Mutter im Zentrum und nahestehenden Artgenossen rundum. Gerade das Defizit an Programmierung – worin manche Anthropologen bloß die Instinktunsicherheit des menschlichen »Mängelwesens« erblickt haben – ermöglicht die Plastizität und Vielfalt unserer Kulturleistungen.

Darf ich von unserer bioevolutionären Programmflexibilität einen kühnen Analogieschluss auf die zukünftige Technoevolution von Robotern ziehen? Je lernfähiger und anpassungsfähiger autonome Automaten agieren sollen, desto »unreifer« müssen sie aus der Produktion in die Anwendung entlassen werden. Um rasch auf selbst für ihre Programmierer unvorhersehbar wechselnde Anforderungen zu reagieren, sollen sie das meiste erst lernen, wenn sie schon zur Welt gekommen sind.

Aber wie? Am besten kooperativ, im Informationsaustausch mit ihresgleichen. Ich stelle mir einen Kindergarten für lernfähige Roboter vor, in dem sie interaktiv, angeleitet von einem menschlichen – oder künstlichen? – Erzieher, immer komplexere Erfahrungen sammeln und untereinander auf eigene Gedanken kommen. Ob sie uns dabei, wie in Sciencefiction-Romanen manchmal ausgemalt, letztlich über den Kopf wachsen?



Michael Springer

gewöhnlichen Organismen sollte somit auch wertvolle Aufschlüsse für die menschliche Stammzellforschung und die regenerative Medizin erbringen.

Das komplette Erbgut des Strudelwurms *Schmidtea mediterranea* wurde kürzlich entziffert. Doch das allein besagt noch nicht viel. Mit dem exponentiellen Anwachsen der Genomdatenbanken hat sich inzwischen nämlich eine gewisse Ernüchterung breitgemacht. Immer deutlicher zeigt sich, dass die Kenntnis des Erbguts allein auf die meisten biologischen Fragen keine Antwort gibt. Entscheidend ist vielmehr die Regulierung, das heißt das gezielte An- und Abschalten, der einzelnen Gene. Das gilt vor allem für die Embryonalentwicklung und die Wachstumsphase, aber natürlich auch für die Regeneration verloren gegangener Körperteile.

### Blockade selbstsüchtiger Gene

Als Genregulatoren fungieren in erster Linie klassische Transkriptionsfaktoren. Sie müssen sich an die DNA anlagern, damit ein bestimmter Abschnitt überhaupt abgelesen und in Boten-RNA-Moleküle übersetzt wird. Letztere dienen dann als Vorlage für die Synthese des betreffenden Proteins an Ribosomen.

Wesentliche Beiträge zur Regulierung leisten aber auch, wie man erst seit knapp einem Jahrzehnt weiß, kurze RNA-Fragmente wie zum Beispiel die micro-RNAs (miRNA). Sie sorgen im Rahmen der so genannten RNA-Interferenz dafür, dass bestimmte Boten-RNA-Moleküle nach ihrer Synthese gleich wieder abgebaut werden und so die Herstellung des betreffenden Proteins unterbleibt (Spektrum der Wissenschaft 10/2003, S. 52).

Seit 2006 kennt man auch eine Gruppe von etwas längeren RNA-Schnipseln, die mit einem Protein namens Piwi (*P-element induced wimpy testis*, vom P-Element verursachte Hodenverkümmern) wechselwirken und deshalb piRNAs heißen. Sie dienen gleichfalls dazu, Boten-RNA-Moleküle mit einer bestimmten (»komplementären«) Basensequenz in einem Komplex zu binden, der sie dann zerschneidet. Allerdings kommen sie nur in Hoden vor. Nach bisherigen Erkenntnissen besteht ihre Hauptaufgabe darin, zu verhindern, dass bewegliche genetische Elemente (Transposonen) an eine neue, zufällige Stelle im Genom springen und dabei eventuell ein wichtiges Gen zerstören, indem sie es auseinander-





ALEJANDRO SÁNCHEZ ALVARADO, UNIVERSITY OF UTAH

reißen. So kommen in piRNAs sich wiederholende kurze Abschnitte vor, die auch für Transposonen typisch sind.

Frühere Untersuchungen hatten schon ergeben, dass die Stammzellen des Strudelwurms sowohl mi- als auch piRNAs enthalten und dass letztere eine Schlüsselrolle beim Nachwachsen von Gewebe spielen. Um die Genregulation des Tiers besser zu verstehen, unternahm die Arbeitsgruppe von Nikolaus Rajewsky am Berliner Max-Delbrück-Centrum für Molekulare Medizin deshalb nun eine Bestandsaufnahme aller RNA-Schnipsel von *S. mediterranea* (*Proceedings of the National Academy of Sciences*, Bd. 106, S. 11546). Die Forscher katalogisierten Millionen solcher Fragmente und identifizierten auf dieser Basis 122 miRNAs, genau doppelt so viele, wie bisher bekannt waren. 13 davon kamen bevorzugt in den Stammzellen vor und dürften somit eine Rolle bei der Regenerationsfähigkeit des Strudelwurms spielen. Interessanterweise kennt man aber nur von einer einzigen ein Gegenstück bei embryonalen Stammzellen von Säugetieren.

Die Anzahl der piRNAs erwies sich als wahrhaft gigantisch. Rund 1,2 Millionen verschiedene Exemplare standen schließlich in dem Katalog, den die Forscher zusammentrugen. Die riesige Menge mag zunächst überraschen, ist jedoch insofern verständlich, als aus den Stammzellen des Strudelwurms auch Keimzellen hervorgehen können, die der Vermehrung dienen. Bei denen kommt es entscheidend darauf, zu verhindern, dass Transposonen das Erbgut verändern und dabei schädigen – was ja die ureigene Aufgabe der piRNAs ist.

Ein Zusammenhang mit der Regenerationsfähigkeit ließ sich in diesem Wust an RNA-Schnipseln zwar bisher nicht feststellen. Immerhin erbrachte der Vergleich mit anderen Modellorganismen aber interessante neue Erkenntnisse zur

Die unscheinbaren Strudelwürmer – hier zwei Exemplare der nun genetisch näher untersuchten Art *Schmidtea mediterranea* – sind Meister der Regeneration abgetrennter Körperteile. Obwohl sie als Wirbellose dem Menschen stammesgeschichtlich sehr fern stehen, zeigen sie wie unsereins eine zweiseitige Symmetrie und enthalten Gewebe, die sich von allen drei Keimblättern – Ekto-, Meso- und Endoderm – ableiten.

Stammesgeschichte. Es zeigte sich nämlich, dass die piRNAs des Strudelwurms in der Art und Weise, wie sie bewegliche genetische Elemente blockieren, denen der Tauffliege ähneln. Andererseits erinnert die Organisation der zugehörigen Gene im Erbgut eher an die Maus. Das deutet auf eine verschlungene Evolutionsgeschichte des Gesamtsystems hin.

Mit der Entzifferung des Genoms und dem Katalog der RNA-Schnipsel steigen die Chancen von *S. mediterranea*, zu einem neuen Modellorganismus für die Gruppe der Lophotrochozoen und für das Phänomen der Regeneration zu avancieren. Allerdings sind Verallgemeinerungen, wie eine aktuelle Untersuchung über den Axolotl (*Ambystoma mexicanum*) deutlich macht, mit Vorsicht zu genießen. Auch dieser mittelamerikanische Schwanzlurch zeichnet sich durch eine hohe Regenerationsfähigkeit aus. Doch ist sie anders als beim Strudelwurm und im Gegensatz zu bisherigen Vermutungen offenbar nicht auf Stammzellen zurückzuführen, sondern auf den gezielten Transport von bereits spezialisierten Zellen (*Nature*, Bd. 460, S. 60). Das stellten Mitglieder der Arbeitsgruppe von Elly Tanaka an der Technischen Universität Dresden fest, als sie das Nachwachsen von amputierten Gliedmaßen beim Axolotl genauer untersuchten.

Merke also: Modellorganismen repräsentieren immer nur einen kleinen Teil der Biologie. Und wenn sich die Regeneration des Strudelwurms schon von der des Axolotls unterscheidet, darf man nicht unbedingt erwarten, dass sich ihre Mechanismen ohne Weiteres auf den Menschen übertragen lassen. Trotzdem verdient es das Phänomen, genauer ergründet zu werden.

**Michael Groß** ist promovierter Biochemiker und arbeitet als freier Wissenschaftsjournalist in Oxford ([www.michaelgross.co.uk](http://www.michaelgross.co.uk)).



## wichtige onlineadressen

### ▶ CONTOO

Das Konferenzportal zur Organisation, Verwaltung und Präsentation wissenschaftlicher Tagungen  
[www.contoo.de](http://www.contoo.de)

### ▶ Managementwissen

per Fernlehre kostengünstig ortsunabhängig erwerben  
Qualitätsmanager, Qualitätsbeauftragter  
[www.cqa.de](http://www.cqa.de)

### ▶ Expedition Zukunft

ScienceExpress – ein Wissenschaftszug fährt quer durch Deutschland  
[www.expedition-zukunft.org](http://www.expedition-zukunft.org)

### ▶ Kernmechanik – von Kernspin bis Chemie, von Dunkler Materie und Energie

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

### ▶ SciLogs

Die größte deutschsprachige Webseite mit Wissenschaftsblogs  
[www.scilogs.de](http://www.scilogs.de)

Hier können Sie den Leserinnen und Lesern von Spektrum der Wissenschaft Ihre WWW-Adresse mitteilen. Für € 98,00 pro Monat (zzgl. MwSt.) erhalten Sie einen maximal fünfzeiligen Eintrag, der zusätzlich auf der Internetseite von Spektrum der Wissenschaft erscheint. Mehr Informationen dazu von

**iq media-marketing gmbh**

**Susanne Förster**

**Telefon 0211 61 88-563**

**E-Mail: [susanne.foerster@iqm.de](mailto:susanne.foerster@iqm.de)**

# Fachwerkbrücken und andere Nullsummenspiele

Kirchhoffs Knotenregel für den Transport elektrischer Ladungen gilt auch für Impulsvektoren. Man nennt sie dann meistens Kräfterdreieck.

Von Norbert Treitz

Was tut man, wenn man ein mechanisches System in Bewegung versetzen will? Eine Kraft »ausüben«. Und was tut man, wenn man ein elektrisches System in Aktion versetzen will? Eine elektrische Spannung »anlegen«. Da erscheint es nur natürlich, zwischen mechanischen und elektrischen Systemen eine Analogie herzustellen, in der die Kraft der elektrischen Spannung entspricht.

Das funktioniert auch ziemlich weit gehend. Ein elektrischer Schwingkreis aus Spule, Kondensator und ohmschem Widerstand lässt sich Stück für Stück auf ein schwingendes System aus Masse, Feder und Dämpfungsglied abbilden.

Problematisch wird es erst bei Netzen, wenn also elektrische Leitungen sich an Knotenpunkten verzweigen wie bei den Widerstandsnetzen, die ich im August 2006 in dieser Rubrik besprochen habe, oder wenn im mechanischen Fall

mehrere Balken sich in einem Punkt treffen wie bei einem Fachwerk. Um mit der genannten Analogie aus einem mechanischen ein elektrisches Netz zu machen oder umgekehrt, muss man das Netz topologisch »umstülpeln« (dualisieren).

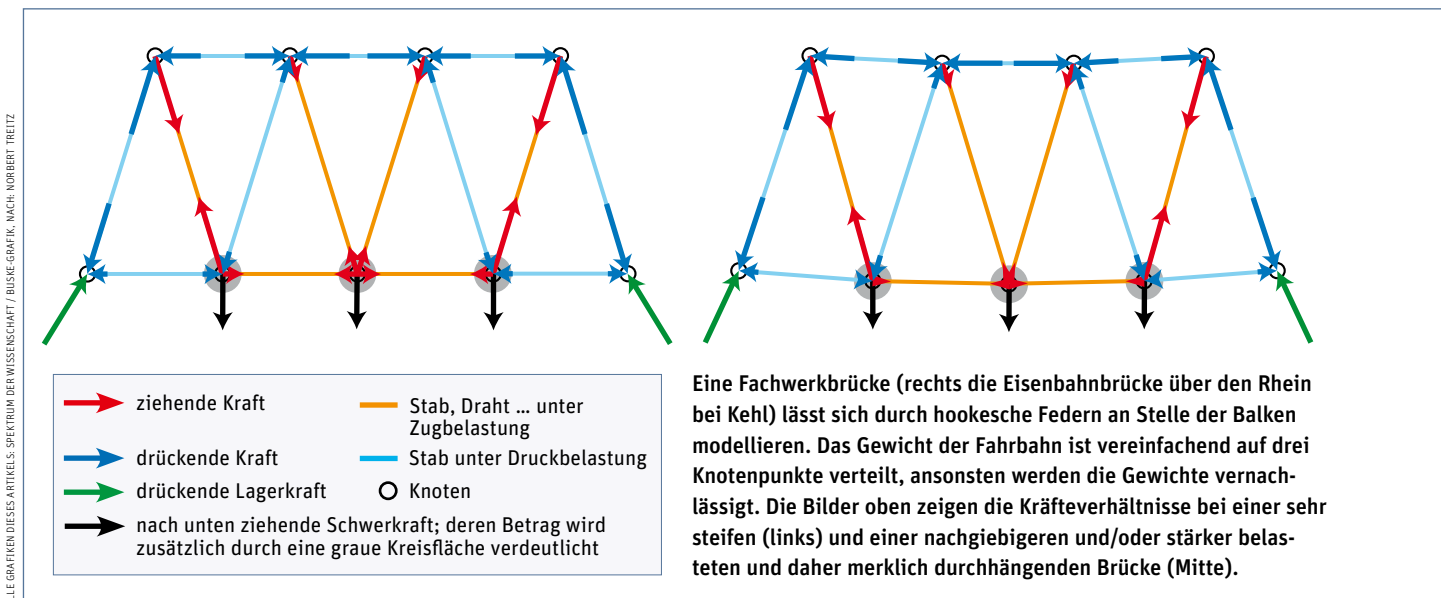
Eine andere Analogie, die 1932 von W. Hähnle und 1933 von F.A. Firestone vorgeschlagen wurde, ist auf den ersten Blick weniger einleuchtend, leidet aber nicht an dieser Komplikation. Der Kraft entspricht hierin nicht die Spannung, sondern die Stromstärke (Tabelle S. 28).

Bei näherer Betrachtung schwindet der Charme der Kraft-Spannungs-Analogie beträchtlich. Der physikalische Kraftbegriff ist nämlich längst nicht so unkompliziert, wie man zunächst glauben möchte. Wenn wir umgangssprachlich von »Kraft« reden, meinen wir in der Regel etwas anderes, meistens Energie, Leistung oder Impuls. Selbst Lehrbücher formulieren an dieser Stelle nicht immer ganz sauber. Wer übt die Kraft auf die

straffe Leine aus, der Hund oder der Baum, an den er angebunden ist? Beide gleichermaßen, aber entgegengesetzt orientiert: so die für die Kraft korrekte Antwort. Was nur der Hund und nicht der Baum beigetragen hat, ist die Energie zum Spannen der Leine.

Das ist das Ärgerliche an den Muskeln: Sie setzen auch dann Energie um, wenn sie mechanisch keine abgeben. Als Beispiel für Kraft ist die Muskelkraft daher so ungeeignet wie ein Schnabeltier als Musterbeispiel für einen Säuger.

Vor allem aber ist nicht einzusehen, warum die zeitliche Ableitung einer Größe elementarer sein soll als die Größe selbst. Das zweite Gesetz Newtons aus den »Principia« besagt, dass die Kraft der zeitlichen Änderung des Impulses proportional ist. Heute pflegen wir dieses Gesetz zu einer Definition umzufunktionieren: Kraft *ist* die zeitliche Änderung des Impulses, was bei konstanter Masse gleich Masse mal Beschleunigung ist.





ERICH HERMES, DEUTSCH EVERN

Bei einer Hängebrücke (links die Rheinbrücke bei Emmerich) liegen die oberen Aufhängepunkte der Tragseile, wenn man das Gewicht der Seile vernachlässigt, nicht etwa auf einer Kettenlinie, sondern auf einer gewöhnlichen Parabel. Die Uferverankerungen des großen Seils werden auch waagrecht belastet.

Und schon ist der Impuls die einfache Größe und die Kraft die abgeleitete.

Auch bei einem Wasser- oder Sandstrahl kann man fragen, ob man die Strahlstärke als Menge pro Zeit oder die übertragene Menge (Sand oder Wasser) als Strahlstärke mal Zeit anschaulicher verstehen kann. Wasser und Sand sind sehr konkret, ihre Transportraten etwas weniger. Kurioserweise ist bei der elektrischen Ladung (die besser »Elektrizitätsmenge« heißen sollte) nicht die einfache, sondern die komplizierte Auffassung offiziell. Ein Coulomb ist nicht etwa definiert als eine bestimmte Anzahl an Elementarladungen, sondern als eine Amperesekunde, weil es einfacher ist, die Stärke eines elektrischen Stroms – über dessen magnetische Wirkung – zu messen, als Elektronen zu zählen.

Das Analogon von Newtons Gesetzen für Wassermengen lautet ungefähr so:

► Erstens: Wenn kein Wasser ausläuft oder verdunstet, bleibt seine Menge gleich.

► Zweitens: Die Änderung einer Wasserfüllmenge ist proportional zum einlaufenden Wasserstrom.

► Drittens: Bei zwei miteinander verbundenen und ansonsten isolierten Gefäßen ist die Wasserzunahme im einen gleich der Abnahme im anderen.

So banal klingt das, jedenfalls wenn man an wasserdichte Gefäße gewöhnt ist und das wertvolle Nass nicht in Sieben transportieren muss. Das wäre die Analogie zur übermächtigen Reibung mittelalterlicher Verkehrsmittel, bei denen man sich um den Bremsweg keine Gedanken machen musste und von Impulserhaltung nichts zu spüren war.

## Impuls und elektrische Ladung: Erhaltungsgrößen

Das ist die wesentliche Eigenschaft, die der Impuls der Kraft voraus hat: Er ist eine Erhaltungsgröße. In einem abgeschlossenen System bleibt die Summe aller Impulse konstant.

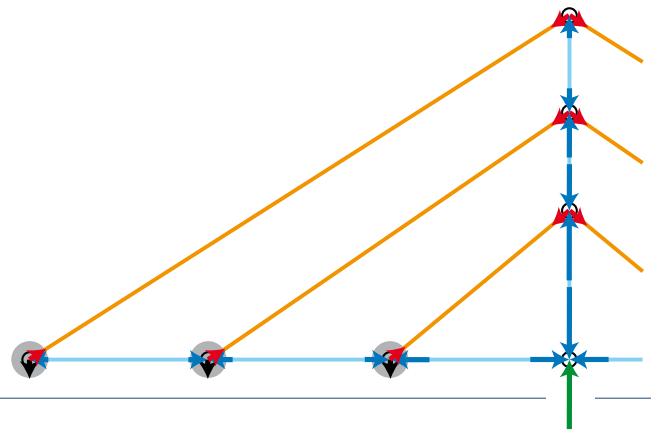
Die nicht sehr klare Formulierung »actio gleich reactio« ist ein Spezialfall der Impulserhaltung, bei dem man einen in Wirklichkeit untrennbaren Gesamtprozess in Teilereignisse zerlegt denkt. Das kann ziemlich willkürlich sein wie bei dem Jäger mit dem Schießgewehr; der zerlegt den Schuss nur deshalb in das Herausfliegen der Kugel mit hoher Geschwindigkeit einerseits und den Rückstoß gegen seine Schulter andererseits, weil der eine Effekt von ihm erwünscht ist und der andere eher lästig. Aber diese Zuordnung ist höchst subjektiv; ein Hase sieht das eher umgekehrt.

Die Eigenschaft, in einem abgeschlossenen System erhalten zu bleiben, hat die Vektorsumme aller Impulse mit einer Wasser- oder Sandmenge ebenso gemein wie mit der Elektrizitätsmenge, die man meistens »elektrische Ladung« nennt. Deswegen ist es durchaus sinnvoll, mechanische und elektrische Netze miteinander in Analogie zu setzen.

KARL GOTSCH, BAIERSBRONN



Echte Schrägseilbrücken (rechts die Beeckerwerther Autobahnbrücke bei Duisburg) sind viel flacher und eleganter als das Modell, bei dem das Verhältnis von Höhe zu Breite größer ist als in der Realität, damit alle Kraftpfeile in einem gemeinsamen Maßstab sichtbar sind. Fast die komplette Last einer Schrägseilbrücke (hier auf Knotenpunkte zwischen den Fahrbahnsegmenten verteilt, Gewichte von Pfeilern und Seilen sind vernachlässigt) liegt auf den Pfeilern. Die Uferverankerungen sind auch senkrecht beliebig wenig belastet. Diese Bauweise ist daher mit nur einem Pfeiler auch für Drehbrücken optimal geeignet.



Warum sind die abgeschlossenen Systeme so wichtig? Bei der Elektrizität ist es zu Recht als irreführend verpönt, nicht abgeschlossene Systeme und unvollständige Stromkreise zu diskutieren, obwohl man technisch bei Radios oder Fahrzeugen Teile der Stromkreise im »Chassis« oder in der »Erde« gewissermaßen versteckt. So haben Straßen- und Eisenbahn im Gegensatz zum Oberleitungsbus nur einen Fahrdraht.

Einem mechanischen System dagegen fällt es viel schwerer, von seiner Umwelt abgeschlossen zu sein. Wie könnte ein Sprinter allein auf der Welt starten, ohne Startklötze und ohne sonstige Wechselwirkung mit seinem Planeten? In der Mechanik sind wir daran gewöhnt, den Rest der Welt je nach Bedarf als ein »äußeres Schwerfeld« oder Ähnliches zusammenzufassen – was sinnvoll sein kann – und ihn dabei weit gehend aus dem Blick zu verlieren und vor den Lernenden zu verstecken, was weniger sinnvoll ist.

Wandern Erhaltungsgrößen durch ein Wegenetz, so gilt fast von selbst an Verzweigungen die Additivität, die wir beim Gleichstrom als Knotenregel von Kirchhoff kennen: Die in jeweils einen Ver-

zweigungspunkt einlaufenden »Stromstärken« der Erhaltungsgröße müssen zusammen null sein. Sonst würde sich diese Größe in dem Knotenpunkt anhäufen, was in einem elektrischen Netz bis auf winzige Mengen unmöglich ist und in einem mechanischen das ganze Netz deformieren würde. Das gilt nicht nur für Ströme elektrischer Ladung, sondern auch für Energieströme und unter gewissen Alltagsbedingungen – besonders anschaulich – auch für Wasserleitungen oder die Wanderwege von Bargeld.

Auch Impuls strömt durch ein mechanisches Netz, wie man leicht sieht, wenn man mit dem Hammer auf eine Stelle des Netzes schlägt und sich daraufhin eine Deformationswelle ausbreitet. Wenn sich das Netz in Ruhe befindet, kann man sich immer noch Impulsströme vorstellen. Die allerdings addieren sich zu null, so als ob zwei Leute synchron auf beide Enden eines jeden Stabs einhämmern würden.

### Einschleichen ins Gleichgewicht

Elektrische wie mechanische Netze haben frappierende Ähnlichkeiten in ihrem Einschwingverhalten. Legt man an ein Netz

aus elektrischen Widerständen eine konstante Spannung an, so stellt sich binnen Sekundenbruchteilen ein stationäres Fließgleichgewicht mit lauter konstanten Einzelspannungen und Teilstromstärken ein. (Dabei unterstellen wir, dass sich die angelegte Spannung und die Widerstandswerte der einzelnen Bauteile nicht ändern, sich also insbesondere die Widerstände nicht nennenswert erwärmen.)

An jedem Knotenpunkt ist dann die Summe der einlaufenden Stromstärken null; das sagt uns Kirchhoffs Knotensatz. (Abgehende Ströme positiver Ladungen werden mit negativem Vorzeichen gerechnet.) Wenn das nicht so ist, häuft sich elektrische Ladung in diesem Knotenpunkt an. Dann wirkt er trotz seiner sehr geringen (elektrischen) Kapazität gegen den Rest der Welt wie eine sehr kleine Kondensatorplatte, und sein Potenzial steigt etwas an. Damit ändern sich auch die anliegenden Teilspannungen und als Folge davon die Stromstärken. Mit geringen ohmschen Widerständen, das heißt bei supraleitendem Drahtverhau oder bei großen Kondensatoren und Spulen im Netz, gibt es zappelnde Schwingungen, die fast nie aufhören. In

ELEKTRIZITÄT NACH ÄLTERER ANALOGIE	MECHANIK	ELEKTRIZITÄT NACH NEUERER ANALOGIE
Zeitintegral der Spannung (Spannungsstoß)	Impuls	elektrische Ladung
elektrische Spannung	Kraft = Impulsstromstärke	elektrische Stromstärke
elektrische Stromstärke	Geschwindigkeit	elektrische Spannung
Ohm-Leitwert	1/Reibungskoeffizient	Ohm-Widerstand
Induktivität	Masse	Kapazität
Kapazität	1/Federkonstante	Induktivität
Leistung	Leistung	Leistung
elektrische Feldenergie	Federenergie	magnetische Feldenergie
magnetische Feldenergie	Bewegungsenergie	elektrische Feldenergie
Zeit	Zeit	Zeit
Reihenschaltung	Parallelschaltung	Parallelschaltung
Parallelschaltung	Reihenschaltung	Reihenschaltung



ERIC HERMES, DEUTSCHE EVERN

unserem Fall mit dominierenden ohmschen Widerständen schleichen dagegen die einzelnen Potenziale zu dem erwähnten Fließgleichgewicht.

Wird Kirchhoffs Regel auf viele Knotenpunkte angewandt, so ergibt sich ein Gleichungssystem; das kann man im Prinzip lösen und erhält die Spannungen und Stromstärken im ganzen Netzwerk. Natürlich lösen die Drähte keine Gleichungen, bevor sie den Strom in sich fließen lassen; aber man kann deren Verhalten, insbesondere den Einschwingvorgang, im Computer nachbilden. Dessen Endzustand ist ein Fließgleichgewicht, für das es nicht darauf ankommt, welche – kleinen – Kapazitäten man den Knotenpunkten zuschreibt.

Nun wechseln wir von der Elektrizität zur Mechanik und lassen Impuls- statt Ladungsportionen wandern. An die Stelle der Drähte treten Stäbe, Drähte, Ketten, Seile oder auch wieder Drähte.

Aber im Gegensatz zur elektrischen Ladung ist Impuls ein Vektor, so dass es hier auch auf die Richtung ankommt. Stäbe, Seile und so weiter können nur solche Impulsvektorbeiträge leiten, die in ihrer Längsrichtung genau vorwärts oder genau rückwärts orientiert sind, aber kein bisschen seitwärts. Unter Druck sind Stäbe gegenüber ihrer neutralen Länge etwas verkürzt, unter Zug ebenso wie Seile, Ketten oder Drähte etwas verlängert. Nach dem Gesetz von Hooke (*tensio sic vis*) sind die Beträge der Impulsübertragungsraten (also der Kräfte) zu diesen Längenabweichungen proportional, jedenfalls in den idealen Fällen, die leicht zu rechnen und oft auch technisch erwünscht sind.

Weite Bereiche der Statik behandeln »starre« Netzwerke, bei denen die elastischen Längenänderungen nicht auffallen (und kaum Energie aufnehmen). Man kann dabei für die Berechnung des Gleichgewichts, den kleinen Kapazitäten des elektrischen Netzes entsprechend,

beliebig große Federkonstanten ansetzen, also »sehr harte« Federn.

Werden Stäbe auf Druck belastet, dürfen sie in der Realität nicht zu dünn sein, damit sie nicht knicken; werden sie dagegen nur auf Zug belastet, kann man sie auch durch Drähte, Seile oder Ketten ersetzen. Die Elemente sind an den Verknüpfungspunkten (»Knoten«) frei gegeneinander beweglich. Bei einem Netz aus ziehenden Fäden können das Knoten im ganz wörtlichen Sinn sein.

Die Massen spielen hierbei bescheidene Rollen: Wir idealisieren die Stäbe als masselos (analog zu induktivitäts- und kapazitätsfrei gedachten Drähten in der Elektrik) und verteilen andere Massen auf die Knotenpunkte. Für statische Probleme sind ihre Größen nur für die Gewichtskräfte bedeutsam, da wir annehmen können, dass Schwingungen durch innere Reibung in den Stäben weggedämpft werden.

Wie im elektrischen Netz kann man nun den Einschwingvorgang eines mechanischen Netzes, zum Beispiel einer Brücke, im Computer modellieren. Das Analogon der kirchhoffschen Regel ist hier die Bedingung, dass in jedem Knotenpunkt die (Vektor-)Summe der angreifenden Kräfte im Gleichgewicht gleich null sein muss. Ist das nicht der Fall, so gibt es einen Kraftüberschuss; dadurch gerät der Knotenpunkt in Bewegung und kommt bei hinreichender Dämpfung in einer geänderten Position zur Ruhe, wodurch wiederum die Längen der in diesem Punkt eingehängten hookeschen Federn sich wenig, aber entscheidend ändern. Mit den neuen Positionen berechnet der Computer die Kräfte aufs Neue, bestimmt daraus die abermals geänderten Positionen und so weiter, bis sich – im Gleichgewichtszustand – nichts mehr ändert. Damit vollzieht das Programm in vielen kleinen Schritten die Dynamik des Systems nach. Bei hinrei-

chend starker innerer Reibung handelt es sich wieder um ein Einschleichen in eine Gleichgewichtsfigur.

Wenn die Federkonstanten sehr groß sind (harte Federung, »starres« System), ändern sich die Positionen der Knoten nicht merklich auf dem Bildschirm gegenüber einem kräftefreien System, bei kleinen (weich und nachgiebig) aber sehr wohl: Dann hängt eine Brücke bei Belastung mehr oder weniger deutlich durch (Bild S. 26 rechts).

Einzelne Knoten können als fest in der Erde verankerte »Lagerpunkte« gekennzeichnet werden, ihre Positionen werden vom Programm festgehalten. In der Realität benötigen sie dazu »von außen« kommende Impulsströme: Lagerkräfte an Stativen, Wänden oder Fundamenten. Ebenso wie die Lagerkräfte überschreiten die Gewichtskräfte die Grenzen des ansonsten abgeschlossenen Systems; beide zusammen müssen in der Statik die Vektorsumme null haben.

In der Praxis kommen oft Beispiele vor, die im Wesentlichen zweidimensional sind. So genügt es im Allgemeinen, das Verhalten einer Brücke durch den »Blick von der Seite« aus zu betrachten. ◀



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

**Meyer, E., Guicking, D.:**

Schwingungslehre. Vieweg, Braunschweig 1974.

**Smith, M. C.:** Synthesis of Mechanical Networks: the Inerter. In: IEEE Transactions on Automatic Control 47(10), S. 1648 – 1662, 2002. Online unter [www-control.eng.cam.ac.uk/Homepage/publication.php?id=859](http://www-control.eng.cam.ac.uk/Homepage/publication.php?id=859).

**Treitz, N.:** Brücke zur Physik. Harri Deutsch, Frankfurt am Main 2003.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/1002946](http://www.spektrum.de/artikel/1002946).

# Bedroht die Quantenverschränkung EINSTEINS THEORIE ?

Dem Schöpfer der Relativitätstheorie widerstrebte die »spukhafte Fernwirkung«, die räumlich getrennte Teile eines Quantensystems zu gemeinsamem Verhalten zwingt. Tatsächlich erschüttert die Verschränkung manche Grundlagen der Physik.

Von David Z. Albert und Rivka Galchen

Unsere Intuition sagt uns: Um einen Stein zu bewegen, muss man ihn berühren oder einen Stock zur Hand nehmen, der seinerseits den Stein berührt. Oder man gibt einen Befehl, der durch Luftschwingungen das Ohr eines anderen erreicht, der wiederum mit einem Stock den Stein anstößt – oder etwas in der Art. Ganz allgemein vermag dieser Intuition zufolge jedes Ding nur Dinge in unmittelbarer Nachbarschaft direkt zu beeinflussen. Diese Intuition, die von unserer Alltagserfahrung tausendfach bestätigt wird, nennen wir »Lokalität«.

Freilich gibt es auch indirekte Effekte; doch sie werden in jedem Fall durch eine nahtlos zusammenhängende Kette von Ereignissen übertragen, deren jedes das nächste direkt nach sich zieht. Wenn wir scheinbar auf eine Ausnahme von dieser Regel stoßen, löst sich dieser Eindruck bei näherer Betrachtung in Luft auf: Wir machen durch einen Knopfdruck Licht und bedenken selten, dass das durch Drähte geschieht; oder wir hören Radio und machen uns in der Regel nicht bewusst, dass das Gerät unsichtbare Wellen empfängt.

Die Quantenmechanik widerspricht so mancher Intuition, aber keiner, die tiefer sitzt als die Lokalitätsannahme. Von den Anfängen der wissenschaftlichen Naturforschung bis zur Entstehung der Quantenmechanik glaubten die Gelehrten, eine vollständige Beschreibung der physikalischen Welt sei im Prinzip gleichbedeutend mit der Einzelbeschreibung jedes ihrer kleinsten und elementarsten Bausteine. Die komplette Geschichte der Welt lasse sich durch die Summe der Geschichten aller Teile ausdrücken.

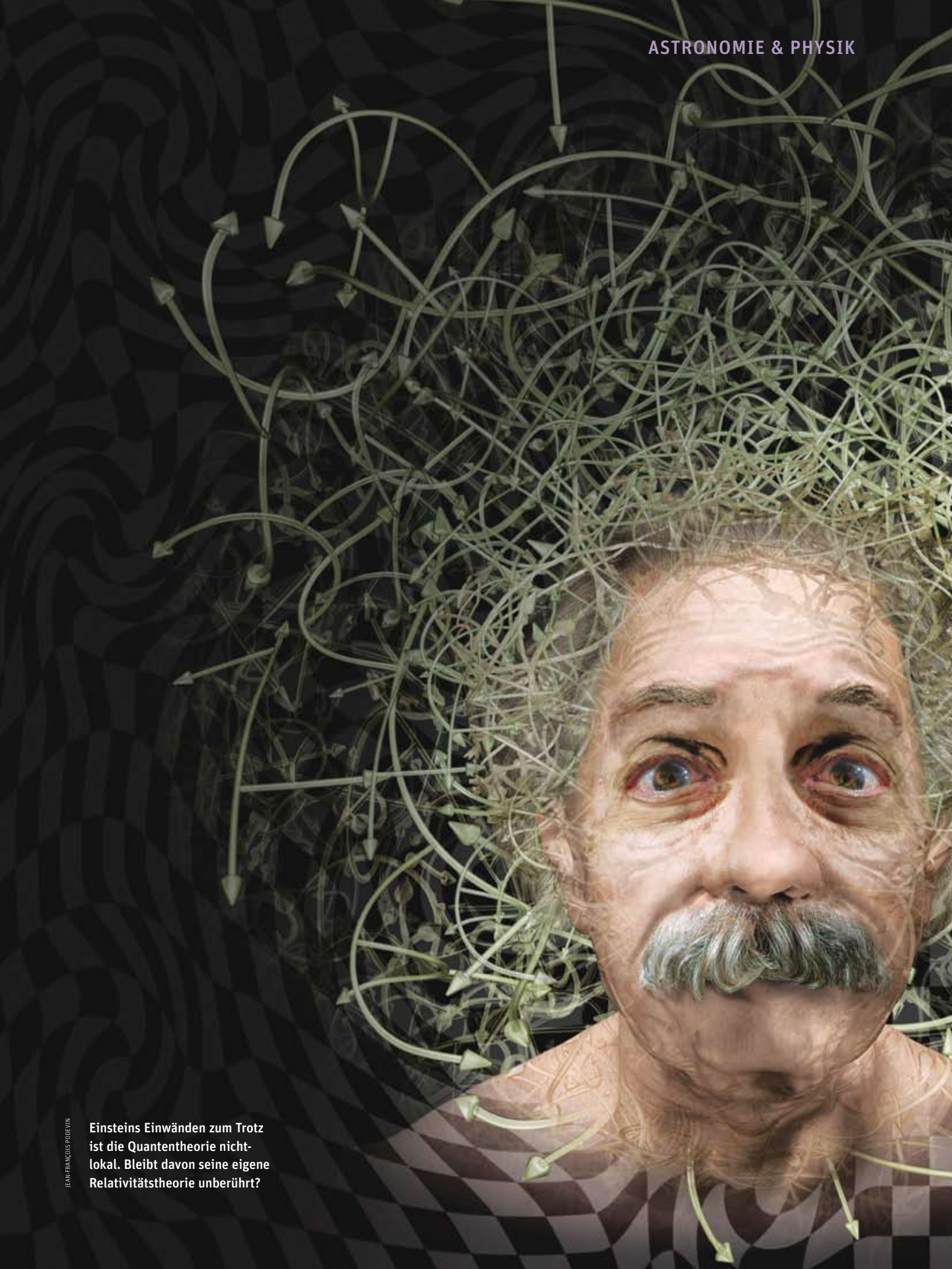
Die Quantenmechanik verstößt gegen diesen Glauben. Reale, messbare, physikalische Eigenschaften von Teilchenensembles können auf ganz konkrete Weise über die Summe der einzelnen Teilcheneigenschaften hinausgehen, davon abweichen oder gar nichts mit ihnen zu tun haben. Zum Beispiel vermag man gemäß der Quantenmechanik zwei Teilchen so anzuordnen, dass ihr Abstand exakt einen Meter beträgt, obwohl keines der beiden für sich genommen einen genau definierten Ort hat.

Außerdem behauptet die so genannte Kopenhagener Deutung, die der große dänische Physiker Niels Bohr zu Beginn des vorigen Jahrhunderts proklamierte und die bis heute als Standardinterpretation der Quantenmechanik gilt: Der Grund dafür ist nicht, dass wir die exakten Orte der einzelnen Teilchen nicht kennen, sondern dass es diese exakten Orte einfach nicht gibt. Nach dem Ort eines einzelnen Teilchens zu fragen, ist demnach so sinnlos wie die Frage nach dem Familienstand der Zahl Fünf. Das Problem ist nicht epistemologisch, das heißt eine Frage unseres Wissens, sondern ontologisch, das heißt eine Frage des Seins.

Wenn Teilchen auf diese Art zusammenhängen, sagen die Physiker, sie seien miteinander quantenmechanisch verschränkt. Bei der verschränkten Eigenschaft muss es sich keineswegs immer um den räumlichen Ort handeln. Zwei Teilchen können entgegengesetzte Spins haben, obgleich keine der beiden Spinrichtungen definitiv feststeht. Oder es ist exakt nur eines der Teilchen angeregt, aber keines von beiden ist definitiv das angeregte. Partikel können ungeachtet ihrer Orte, ihrer Beschaffenheit und der aufeinander ausgeübten Kräfte verschränkt sein – im Prinzip auch ein Elektron und Neutron an entgegengesetzten Enden der Milchstraße. Somit erzeugt die Ver-

## In Kürze

- ▶ **Unsere Erfahrungswelt scheint sich »lokal« zu verhalten:** Wir vermögen nur Objekte zu beeinflussen, die uns direkt zugänglich sind.
- ▶ Doch in der Quantenmechanik gibt es eine **seltsame Fernwirkung**, die so genannte Verschränkung: Zwei verschränkte Teilchen reagieren synchron, ohne materiellen Zwischenträger.
- ▶ Dieser nichtlokale Effekt wirft ein ernstes Problem für Einsteins spezielle Relativitätstheorie auf und **erschüttert damit die Grundlagen** der Physik.



JEAN-FRANÇOIS POBEVIN

Einsteins Einwänden zum Trotz ist die Quantentheorie nicht-lokal. Bleibt davon seine eigene Relativitätstheorie unberührt?

## DAS EPR-GEDANKENEXPERIMENT

Wie Albert Einstein, Boris Podolsky und Nathan Rosen (»EPR«) zeigten, erzeugt die Quantenverschränkung zweier Teilchen verblüffende Resultate, wenn zwei weit voneinander entfernte Beobachter – Alice und Bob – je eines der Teilchen untersuchen.

### QUANTENSPINS



**Elektronen haben Spins**, deren Orientierung durch Pfeile bezeichnet wird (oben). Wenn Alice den Spin eines Elektrons messen will (unten) und dafür beispielsweise eine vertikale Messachse wählt, findet sie entweder Aufwärts-Spin oder Abwärts-Spin, jeweils mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit. Wählt sie eine waagrechte Achse, so findet sie Links-Spin oder Rechts-Spin.

### MESSUNGEN



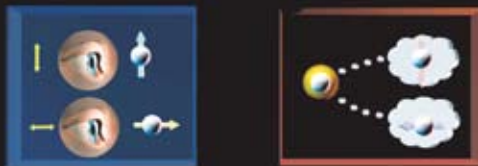
**Zwei Teilchen können so verschränkt sein**, dass ihre Spins entgegengesetzt orientiert sind, obwohl keiner der beiden Spins für sich genommen eine definierte Richtung hat. Angenommen, Alice misst an ihrem Teilchen Aufwärts-Spin (unten). Selbst wenn Bob und sein Teilchen sich beliebig fern von Alice aufhalten und er es wie sie längst der vertikalen Achse misst, wird er stets feststellen, dass sein Teilchen den entgegengesetzten Abwärts-Spin hat.

### VERSCHRÄNKTE SPINS



**EPR folgerten:** Da Bob hundertprozentig sicher sein kann, Abwärts-Spin zu messen, muss der Spin seines Teilchens schon vor seiner Messung abwärts gezeigt haben. Doch Alice könnte ebenso gut eine waagrechte Messachse gewählt und etwa Rechts-Spin erhalten haben. Daraus würde aber folgen, dass Bobs Teilchen von vornherein Links-Spin hatte.

### EPR-ARGUMENT



**EPR zogen den Schluss:** Da kein Quantenzustand erlaubt, dass Bobs Teilchen mit Sicherheit Abwärts-Spin und ebenso sicher Links-Spin aufweist, muss die Quantenmechanik eine unvollständige Theorie sein.

schränkung eine früher ganz und gar undenk- bare Intimität innerhalb der Materie.

Dieses Phänomen liegt neuen und viel ver- sprechenden Forschungsgebieten wie der Quan- teninformation und der Quantenkryptografie zu Grunde; daraus werden vielleicht schon bald Computer und abhörgeschützte Datenkanäle mit ungeahnten Möglichkeiten hervorgehen (siehe »Quantencomputer mit Ionen« von Christopher R. Monroe und David J. Wine- land, SdW 6/2009, S. 34).

Doch aus der Verschränkung folgt anschein- end auch das dem Alltagsverstand zutiefst widerstrebende Phänomen der Nichtlokalität: die Möglichkeit, etwas physikalisch zu beein- flussen, ohne es direkt oder über eine Kette verbindender Zwischenglieder zu berühren. Nichtlokalität bedeutet, dass eine Faust in Köln eine Nase in Berlin zu brechen vermag, ohne irgendetwas anderes im ganzen Land – ein Luftmolekül, ein Elektron in einem Draht oder ein Lichtflimmern – zu beeinflussen.

Albert Einstein hatte gegen die Quanten- mechanik zahlreiche Einwände; er kritisierte keineswegs nur ihre Zufälligkeit mit dem allzu oft bemühten Zitat »Gott würfelt nicht«. Der einzige Einwand, den er in einer wissenschaft- lichen Publikation stringent formulierte, betraf die Seltsamkeit der quantenmechanischen Ver- schränkung. Diese Kritik ist heute als das EPR-Argument bekannt, nach den drei Auto- ren Einstein, Boris Podolsky und Nathan Ro- sen (siehe Kasten links). In ihrem 1935 publi- zierten Artikel »Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?« beantworten sie die Titelfrage mit einem klaren Nein.

Ihr Argument stützt sich auf eine spezielle Anweisung im quantenmechanischen Algorith- mus für die Vorhersage experimenteller Ergeb- nisse. Angenommen, wir messen den Ort eines Teilchens, das mit einem zweiten quanten- mechanisch so verschränkt ist, dass keines der beiden, wie oben erwähnt, für sich genommen einen präzisen Ort hat. Wenn wir das Mess- ergebnis erhalten, verändern wir natürlich un- sere Beschreibung des ersten Teilchens, denn

## WECHSELHAFTE WIRKLICHKEIT

**Nach unserer Alltagserfahrung** ist die Welt lokal: Wir können einen Stein nur durch direkte Berührung bewegen oder durch Berühren eines Stocks, der den Stein berührt. Stets müssen wir eine zusammenhängende Kette solch direkter, lokaler Verbindungen erzeugen. Doch seit Beginn der modernen Naturwissen- schaft im 17. Jahrhundert tauchten immer wieder »Nichtlokalitäten« auf.



PHOTO RESEARCHERS / BILL SANDERSON

**1687:** Isaac Newtons universel- les Gravitationsgesetz, die erste wissenschaftliche Beschreibung der Schwerkraft, ist ein Fernwir- kungsgesetz. Newton versucht diese Nichtlokalität zu beheben und entwirft eine erfolglose Theorie, in der winzige unsichtbare Teilchen den scheinbar leeren Raum erfüllen.



THE GRANGER COLLECTION, NEW YORK



wir wissen jetzt für einen Moment, wo es war. Doch der Algorithmus zwingt uns außerdem, unsere Beschreibung des zweiten Teilchens zu ändern – und zwar augenblicklich, ganz unabhängig davon, wie weit es entfernt ist oder was zwischen den beiden Teilchen liegt.

Bevor Einstein diese Konsequenz hervorhob, war die Verschränkung ein unumstrittener Teil des quantenphysikalischen Weltbilds. Er aber fand sie nicht nur seltsam, sondern zweifelhaft. Ihm kam sie »spukhaft« vor. Vor allem schien sie nichtlokal zu sein.

### Ein veränderter Realitätsbegriff?

Damals war niemand bereit, die Möglichkeit echter physikalischer Nichtlokalitäten in Betracht zu ziehen – weder Einstein noch Bohr noch sonst jemand. In ihrem Artikel unterstellten Einstein, Podolsky und Rosen, die Nichtlokalität der Quantenmechanik könne nur ein Scheineffekt sein; es müsse sich um eine mathematische Anomalie handeln, jedenfalls aber um ein entbehrliches Artefakt des Algorithmus. Gewiss könne man quantenmechanische Vorhersagen aushecken, ohne nichtlokale Schritte zu bemühen.

Darum zogen sie folgenden Schluss: Wenn es – wie seinerzeit jeder annahm – in der Welt keine echte physikalische Nichtlokalität gibt und wenn die experimentellen Vorhersagen der Quantenmechanik zutreffen, dann muss diese Theorie gewisse Aspekte der Welt unberücksichtigt lassen. In der Geschichte der Welt muss es Teile geben, welche die Quantenmechanik nicht erwähnt.

Bohr antwortete auf diese Veröffentlichung praktisch über Nacht. Sein hastiger Widerlegungsversuch griff keines der konkreten wissenschaftlichen Argumente auf, sondern bemängelte – auf unklare und manchmal geradezu orakelhafte Weise – die Verwendung des Worts »Wirklichkeit« und die Definition von »Elementen der physikalischen Wirklichkeit« im EPR-Artikel. Der Däne ließ sich ausgiebig über die Unterscheidung von Subjekt und Objekt aus, über die Bedingungen, unter denen man sinnvolle Fragen stellen könne, und

über das Wesen der Sprache. Es sei notwendig, »endgültig auf das klassische Kausalitätsideal zu verzichten und unsere Haltung gegenüber dem Problem der physikalischen Wirklichkeit von Grund auf zu revidieren«.

Bohr ließ keinen Zweifel daran, dass er Einstein, Podolsky und Rosen in einem Punkt zustimmte: Selbstverständlich komme eine echte physikalische Nichtlokalität nicht in Frage. Die scheinbare Nichtlokalität sei nur ein Grund mehr, warum wir den altmodischen und im EPR-Artikel so offensichtlichen Anspruch aufgeben müssten, wir könnten aus den Gleichungen der Quantenmechanik ein realistisches Bild der Welt ablesen – also ein Bild dessen, was tatsächlich vor unserer Nase von einem Moment zum nächsten existiert. Bohr bestand praktisch darauf, dass wir die Welt nicht nur unscharf wahrnehmen, sondern dass es jenseits dieses schattenhaften und unbestimmten Bilds nichts Wirkliches geben kann.

Diese Antwort war eine seltsam philosophische Reaktion auf einen eindeutig naturwissenschaftlichen Einwand. Noch seltsamer war, dass sie umgehend zum offiziellen Standpunkt der theoretischen Physik erhoben wurde. Darüber weiter nachzudenken galt schon bald als Ketzerei. Die Physiker opferten damit ihren alten Anspruch, die wirkliche Beschaffenheit der Welt zu entdecken, und verbannten metaphysische Fragen für lange Zeit ins Reich der Fantasie.

Selbst heute herrscht über diesen wichtigen Teil von Einsteins Erbe große Unklarheit. Walter Isaacson versichert den zahlreichen Lesern seiner 2007 erschienenen Einstein-Biografie, dessen Zweifel an der Quantenmechanik seien seither zerstreut worden. Doch das ist nicht wahr.

Es dauerte 30 Jahre, bis sich jemand mit dem EPR-Argument wissenschaftlich ernsthaft auseinandersetzte. Aus einem berühmten Artikel des irischen Physikers John S. Bell von 1964 ging hervor: Bohr irrte, als er sein Verständnis der Quantenmechanik für unanfechtbar hielt, während Einstein sich darüber täuschte, was daran falsch war. Um zu begrei-

### ANDERE AUSWEGE

Einige Physiker meinen, John S. Bells mathematischer Beweis für die Nichtlokalität der quantenmechanischen Welt lasse gewisse Schlupflöcher offen.

#### Viele Welten

Bell nahm selbstverständlich an, dass Quantenexperimente eindeutige Ergebnisse haben. Doch gemäß der Vielwelten-Interpretation spaltet jede Quantenmessung das Universum in Zweige auf, in denen alle unterschiedlichen Resultate parallel auftreten (siehe »Parallelwelten«, Spektrum-Dossier 1/2009). Darum kann unser Universum »lokal« sein, wenn Kopien des Experimentators zahllose unsichtbare Paralleluniversen bewohnen. Dieser Ansatz schafft freilich viele knifflige Probleme.

#### Den Realismus preisgeben?

Da Bell von der Annahme ausging, die Welt verhalte sich »lokal realistisch«, glauben viele, er habe bewiesen, dass entweder die Lokalität oder der Realismus verletzt wird. Demnach könnte die Welt lokal sein, wenn sie den Realismus verletzt. Doch das ist ein Missverständnis: Das ursprüngliche Argument von Einstein, Podolsky und Rosen schließt die Möglichkeit der Quantenlokalität aus, ohne den von Bell verwendeten Realismus zu bemühen.

**1785:** Charles Coulomb stellt für die elektrostatischen Kräfte eine zu Newtons Gravitationsgesetz analoge Formel auf. Elektrische Effekte scheinen auf Fernwirkung zu beruhen.



PHOTO RESEARCHERS / CORBELLA MOLLOY

**1831:** Michael Faraday beschreibt den Magnetismus durch Kraftlinien. Die Physiker rechnen mit elektrischen und magnetischen Feldern, die den Raum erfüllen. Die auf ein Teilchen wirkenden Kräfte werden zumindest formal als Nahwirkung beschrieben. Doch diese Felder gelten nur als bequeme Rechenhilfen, nicht als real.

**1849:** Hippolyte Fizeau und Jean Bernard Foucault messen für die Lichtgeschwindigkeit 298 000 Kilometer pro Sekunde; aber noch weiß niemand, was Licht wirklich ist.

CORBIS / LAWRENCE MANNING



## BELLS THEOREM UND DIE PHYSIKALISCHE WIRKLICHKEIT

**Die Nichtlokalität unserer physikalischen Welt** folgt aus einem 1964 von John S. Bell bewiesenen Theorem und aus immer raffinierteren Experimenten seit den 1980er Jahren. Das Theorem beruht auf dem rätselhaften Verhalten verschränkter Teilchen, auf das Einstein, Podolsky und Rosen 1935 hingewiesen hatten (siehe Kasten S. 32). Das EPR-Argument geht davon aus, dass die Welt lokal ist. Deshalb kann eine Spinmessung, die Alice an dem einen Partner eines Teilchenpaares durchführt, nicht augenblicklich den Zustand des weit entfernten Parterteilchens bei Bob verändern. Also muss Bobs Teilchen von vornherein definierte Spinwerte für jede beliebige Messachse besitzen. Folglich muss die Quantenmechanik unvollständig sein, denn sie legt diese Werte nicht fest, sondern garantiert nur, dass Bobs Messung stets zu Alices Messresultat passt.

Bell fragte nun: Angenommen, Alices und Bobs verschränkte Teilchen haben definierte Werte; können solche Teilchen die quantenmechanisch vorhergesagten Werte für alle von Alice und

Bob gewählten Messachsen liefern? Erinnern wir uns: Alice und Bob müssen je eine Messachse wählen, längs der sie den Spin bestimmen; diese Achsen können beispielsweise um 45 oder 90 Grad gegeneinander gekippt sein. Wie Bell mathematisch bewies, erzeugen zahlreiche Messungen längs unterschiedlicher Achsen eine statistische Verteilung der Resultate, die von den Vorhersagen der Quantenmechanik abweicht. Keine Vorwahl definierter Werte vermag die Quantenmechanik zu befriedigen.

**Für praktische Experimente** wählen die Forscher an Stelle der Elektronen lieber verschränkte Photonen, deren Polarisation längs unterschiedlicher Achsen gemessen wird. Die Resultate bestätigen die quantenmechanischen Vorhersagen. Somit können diese Photonen nach Bells Theorem keine definierten Werte haben. Da dies dem EPR-Argument widerspricht, muss die Annahme, die Natur sei lokal, falsch sein. Wir leben in einem nicht-lokalen Universum.

fen, worin der Irrtum wirklich bestand, muss man die Idee der Lokalität preisgeben.

Die entscheidende Frage ist, ob es sich bei den Nichtlokalitäten im quantenmechanischen Algorithmus um bloßen Schein handelt oder nicht. Bell war offenbar der Erste, der genau untersuchte, was diese Frage bedeutet. Wodurch lassen sich echte physikalische Nichtlokalitäten von bloß scheinbaren unterscheiden? Bell argumentierte so: Falls es einen lokalen Algorithmus gibt, der dieselben experimentellen Vorhersagen macht wie der quantenmechanische Algorithmus, dann haben Einstein und Bohr mit Recht die Nichtlokalitäten der Quantenmechanik als bloße Artefakte verworfen. Falls hingegen kein Algorithmus Nichtlokalitäten zu vermeiden vermag, muss es sich um echte physikalische Phänomene handeln. Bell analysierte nun einen speziellen Verschränkungsfall und schloss daraus, ein solcher lokaler Algorithmus sei mathematisch unmöglich. Somit ist die physikalische Welt tatsächlich nichtlokal.

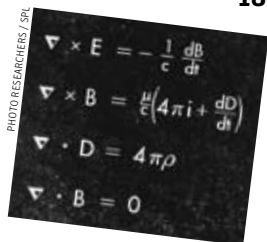
Diese Schlussfolgerung stellt alles auf den Kopf. Für Einstein, Bohr und alle Übrigen war immer ausgemacht gewesen, dass jede echte Unverträglichkeit zwischen Quanten-

mechanik und Lokalitätsprinzip die ganze Theorie gefährden würde. Doch wie Bell nun zeigte, ist Lokalität nicht nur unvereinbar mit dem abstrakten theoretischen Apparat der Quantenmechanik, sondern auch mit gewissen empirischen Vorhersagen der Theorie. Seit 1981 haben insbesondere die Experimente von Alain Aspect am Institut d'Optique in Palaiseau (Frankreich) keinen Zweifel gelassen, dass diese Vorhersagen in der Tat zutreffen. Ins Wanken geriet also nicht die Quantenmechanik, sondern das Lokalitätsprinzip – und damit vermutlich auch die spezielle Relativitätstheorie, denn sie scheint Lokalität vorauszusetzen (siehe Kasten S. 36).

Die meisten Physiker verdrängen bis heute die volle Bedeutung von Bells Arbeit. Bell hatte gezeigt: Jede Theorie, welche die empirischen Vorhersagen der Quantenmechanik für verschränkte Teilchenpaare zu reproduzieren vermag – die Quantenmechanik selbst eingeschlossen –, muss ihrem Wesen nach physikalisch nichtlokal sein.

Diese Botschaft ist praktisch ignoriert worden. Stattdessen behauptet fast jeder, Bell habe bloß Folgendes gezeigt: Jeder Versuch, das or-

**1865:** James Clerk Maxwells Gleichungen enthüllen, dass elektromagnetische Felder ein dynamisches Eigenleben haben und das Vakuum mit 298 000 Kilometern pro Sekunde durchqueren. Der Elektromagnetismus ist lokal, und Licht ist eine elektromagnetische Welle.



**1905:** Einsteins spezielle Relativitätstheorie vereint die maxwellschen Gleichungen und das Prinzip, dass für gleichförmig bewegte Beobachter dieselben physikalischen Gesetze gelten müssen. Doch dafür wird die Idee einer absoluten Gleichzeitigkeit abgeschafft.



thodoxe quantenmechanische Weltbild durch irgendeine – mit verborgenen Parametern versehene, deterministische oder im philosophischen Sinn realistische – Theorie zu ersetzen, die eher mit unseren klassischen metaphysischen Erwartungen übereinstimmt, müsste nichtlokal sein, um die quantenmechanischen Vorhersagen für EPR-Systeme zu reproduzieren. Bells Arbeit wurde zwar zur Kenntnis genommen, aber durch Scheuklappen.

Nur eine kleine Minderheit der Physiker vermied dieses Missverständnis und begriff, dass Bells Beweis und Aspects Experimente die Welt selbst als nichtlokal enthüllt hatten. Aber auch sie glaubten fast ausnahmslos, diese Nichtlokalität stelle keine besondere Bedrohung für die spezielle Relativitätstheorie dar.

Dieser Glaube beruht auf der Idee, die spezielle Relativitätstheorie sei untrennbar mit der Unmöglichkeit verbunden, Botschaften mit Überlichtgeschwindigkeit zu senden. Aus der Relativitätstheorie lässt sich folgern, dass kein materieller Träger einer Botschaft auf Geschwindigkeiten jenseits der des Lichts beschleunigt werden kann. Und weiter lässt sich folgern, dass eine überlichtschnelle Botschaft in manchen Bezugssystemen ankäme, bevor sie versendet wurde – wodurch alle Paradoxien der Zeitreise entfesselt würden.

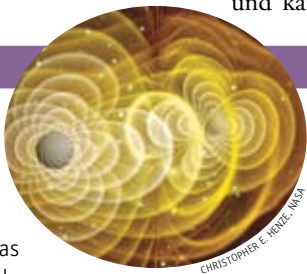
Schon 1932 bewies der brillante ungarische Mathematiker John von Neumann, dass die Nichtlokalität der Quantenmechanik keinesfalls zur instantanen Informationsübertragung genutzt werden kann. Viele Jahrzehnte lang deuteten praktisch alle Physiker diesen Beweis als Garantie für eine friedliche Koexistenz von quantenmechanischer Nichtlokalität und spezieller Relativitätstheorie.

Erst 30 Jahre nach Bells Artikel erfassten einige Physiker das volle Ausmaß des Problems. Die erste klare, offene und logisch makellose Diskussion leistete Tim Maudlin von der Rutgers University (New Jersey) 1994 mit seinem Buch »Quantum Non-Locality and Relativity«. Wie er zeigte, ist die Frage viel subtiler als die üblichen Plattitüden über instantane Botschaften.

Maudlins Arbeit erschien vor dem Hintergrund eines veränderten intellektuellen Klimas. Seit den frühen 1980er Jahren begann die Vorherrschaft von Bohrs Überzeugung, es könne keine altmodische, philosophisch-realistische Beschreibung der subatomaren Welt geben, überall spürbar zu bröckeln. Mehrere viel versprechende Ansätze boten anscheinend eine gute Beschreibung der von Bohr abgelehnten Art, zumindest in nichtrelativistischer Näherung. Dazu zählte zum einen die bohmische Mechanik, die David Bohm in den frühen 1950er Jahren entwickelt hatte – sie inspirierte Bells Arbeit, wurde aber sonst weitgehend ignoriert –, und zum anderen das GRW-Modell von GianCarlo Ghirardi, Alberto Rimini und Tullio Weber (siehe »David Bohms Quantentheorie« von David Z. Albert, SdW 7/1994, S. 70). Der alte metaphysische Anspruch der Physik, uns buchstäblich und direkt zu sagen, wie die Welt wirklich ist – ein Anspruch, der mehr als 50 Jahre lang unterdrückt worden war –, begann langsam wieder zu erwachen.

Maudlins Buch konzentrierte sich auf drei wichtige Punkte. Erstens: Die spezielle Relativitätstheorie macht Aussagen über die geometrische Struktur von Raum und Zeit. Die Unmöglichkeit, Masse, Energie, Information oder kausale Einflüsse schneller als Licht zu übertragen, garantiert noch überhaupt nicht, dass die geometrischen Aussagen der Theorie zutreffen. Darum bietet uns von Neumanns Beweis zur Informationsübertragung allein keinerlei Gewähr, dass quantenmechanische Nichtlokalität und spezielle Relativitätstheorie friedlich koexistieren können.

Zweitens: Die spezielle Relativitätstheorie ist tatsächlich mit einer riesigen Vielfalt hypothetischer Mechanismen zum überlichtschnellen Transfer von Masse, Energie, Information und kausalen Einflüssen vereinbar. Beispiels-



CHRISTOPHER L. HEISE, NASA

**1915:** In Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie spielt die Krümmung der Raumzeit für die Schwerkraft die gleiche Rolle wie das elektromagnetische Feld in der Theorie Maxwells. Die Gravitation ist lokal: Vibriert eine Masse, so breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit Gravitationswellen aus.



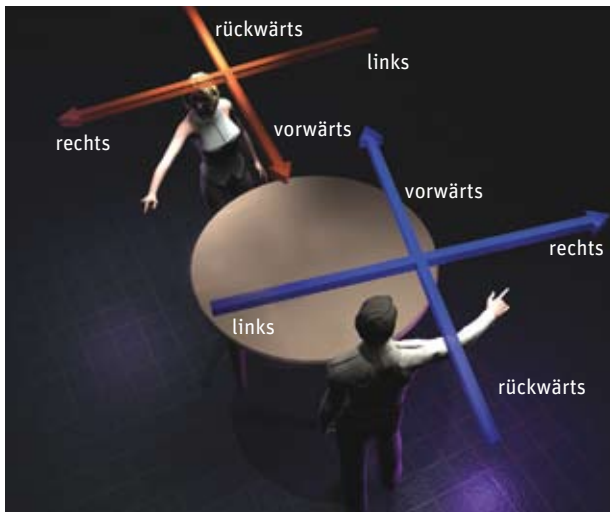
AP / ENILLO SEGRE VISUAL ARCHIVES. GRIFFITHS COLLECTION, PAUL EINHORN/IST

**1935:** Einstein, Podolsky und Rosen erklären die Quantenmechanik für unvollständig, da sie nichtlokale Phänomene erfordert. Niels Bohr (rechts) widerspricht: Wir müssen die Quantenmechanik akzeptieren und dafür alte Vorstellungen von »Wirklichkeit« opfern.

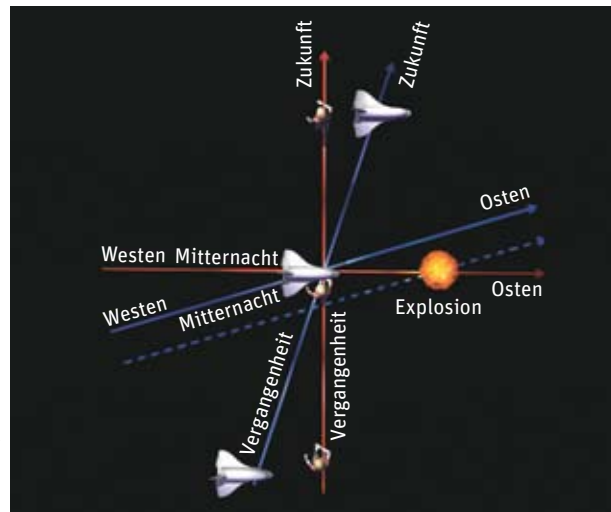
WARUM RELATIVITÄT UND NICHTLOKALITÄT SICH SCHLECHT VERTRAGEN

Die spezielle Relativitätstheorie stellt eine geometrische Beziehung zwischen Raum und Zeit her. Diese Beziehung macht den Begriff einer »instantanen Fernwirkung« nicht nur seltsam, sondern geradezu sinnlos.

Alice und Bob können sich weder darüber einig, welche Ereignisse gleichzeitig sind, noch über eine Theorie, die Fernwirkungen enthält. Hier löst Alice »augenblicklich« die entfernte Explosion aus, indem sie um Mitternacht einen Knopf drückt.



Alice und Bob stehen an verschiedenen Orten um einen Tisch. Sie interpretieren die Raumrichtungen rechts, links, vorwärts und rückwärts unterschiedlich. Wie die spezielle Relativitätstheorie zeigt, erleben bewegte Beobachter nicht nur den Raum, sondern auch die Zeit unterschiedlich.



Die Raum- und Zeitachsen von Alice (rot) kreuzen sich dort, wo Alice sich exakt um Mitternacht befindet. Bob fliegt über Alice hinweg fast mit Lichtgeschwindigkeit ostwärts. Seine Bewegung kippt seine Raum- und Zeitachsen (blau) relativ zu Alices Bezugssystem. Er erlebt die Explosion darum früher als Alice.

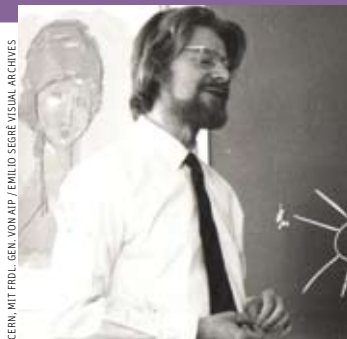
weise publizierte Gerald Feinberg von der Columbia University in New York in den 1960er Jahren eine in sich widerspruchsfreie relativistische Theorie der Tachyonen; diesen hypothetischen Teilchen ist es physikalisch unmöglich, sich langsamer als das Licht fortzupflanzen. Maudlin erfand weitere Beispiele.

Demnach bedeutet die bloße Existenz quantenmechanischer Nichtlokalität noch lange nicht, dass die Quantenmechanik nicht mit der Relativitätstheorie vereinbar ist. Es gibt also Hoffnung.

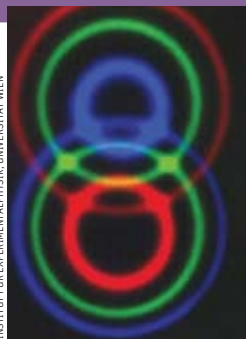
Doch wie Maudlin drittens betonte, ist die spezielle Sorte von Fernwirkung, der wir in der Quantenmechanik begegnen, etwas völlig an-

deres als die relativistischen Einflüsse bei Feinbergs Tachyonen oder in Maudlins anderen Beispielen. Die nichtlokalen Einflüsse zwischen quantenmechanischen Partikeln hängen weder von deren räumlicher Anordnung noch von ihren physikalischen Eigenschaften ab, sondern ausschließlich davon, ob die fraglichen Teilchen quantenmechanisch verschränkt sind oder nicht. Die quantenmechanische Nichtlokalität scheint vor allem absolute Gleichzeitigkeit zu erfordern – womit die spezielle Relativitätstheorie tatsächlich in ihrem Kern bedroht wäre. Das ist das Problem.

Aus dieser Debatte sind in allerjüngster Zeit zwei neue Resultate hervorgegangen. Das



**1964:** John S. Bell erweitert das EPR-Argument auf Fälle, in denen Spins längs unterschiedlicher Achsen gemessen werden, und zeigt: Keine lokale Theorie vermag die experimentellen Resultate der Quantenmechanik richtig vorherzusagen. Die Vorhersagen jeder lokalen Theorie müssen stets den so genannten bellschen Ungleichungen genügen.



**1981 bis heute:** Wie Alain Aspect, Anton Zeilinger und andere durch Experimente mit verschränkten Lichtzuständen bewiesen, gehorcht die Welt den Regeln der Quantenmechanik und nicht den bellschen Ungleichungen. Die Welt ist tatsächlich nichtlokal.

eine weist den Weg zu einer möglichen Versöhnung von quantenmechanischer Nichtlokalität und Relativitätstheorie; das andere verschärft den Eindruck, dass jede Kombination der beiden unsere tiefsten Intuitionen über die Welt brutal verletzen muss.

### Ist die Relativitätstheorie zu retten?

Das erste Resultat stammt von Roderich Tumulka, einem jungen deutschen Mathematiker, der gegenwärtig an der Rutgers University tätig ist. In einem 2006 veröffentlichten Artikel zeigte er, wie sämtliche empirische Vorhersagen der Quantenmechanik für verschränkte Teilchenpaare durch eine klug modifizierte GRW-Theorie reproduziert werden können. Zur Erinnerung: Diese Theorie macht einen Vorschlag, die Vorhersagen der Quantenmechanik auf philosophisch-realistische Weise herzuleiten. Tumulkas Modifikation, obzwar nichtlokal, verträgt sich dennoch bestens mit der Raumzeitgeometrie der speziellen Relativitätstheorie.

Dieser Ansatz ist noch ganz unausgereift. Niemand vermag derzeit eine zufrieden stellende Version von Tumulkas Theorie hinzuschreiben, die sich auf einander anziehende oder abstoßende Teilchen anwenden lässt. Außerdem führt seine Theorie eine neue Nichtlokalität in die Natur ein – eine nicht nur räumliche, sondern auch zeitliche! Um die Wahrscheinlichkeit eines künftigen Ereignisses zu berechnen, muss man nicht nur – wie bei physikalischen Theorien üblich – den gegenwärtigen Zustand eingeben, sondern auch bestimmte Fakten über die Vergangenheit. Immerhin hat Tumulkas Ansatz einige Gründe für Maudlins Sorge um die friedliche Koexistenz von Nichtlokalität und Relativitätstheorie beseitigt.

Das andere neue Resultat hat einer von uns (Albert) entdeckt. Es besagt: Um Quantenmechanik und Relativitätstheorie zu versöhnen, müssen wir eine weitere, besonders tief sitzende Überzeugung opfern. Wir pflegen ganz selbstverständlich zu glauben, dass alles, was sich über die Welt sagen lässt, im Prinzip in Form einer Geschichte erzählt werden kann. Genauer gesagt, alles physikalisch Sagbare kann die Form einer unendlichen Folge von datierten Einzelaussagen annehmen: »Zum Zeitpunkt  $t_1$  ist *dies* der physikalisch exakte Weltzustand« und »zur Zeit  $t_2$  ist *das* der Weltzustand« und so fort. Doch wenn Quantenverschränkung und relativistische Raumzeitgeometrie zusammenwirken, wird die physikalische Weltgeschichte unendlich viel reicher.

Das Problem ist, dass die spezielle Relativitätstheorie Raum und Zeit so verquickt, dass die quantenmechanische Verschränkung

zwischen räumlich getrennten physikalischen Systemen in eine Art Verschränkung zwischen physikalischen Situationen zu unterschiedlichen Zeiten übergeht. So entsteht etwas, was – um unsere anfängliche Formulierung über die Eigenart der Quantentheorie aufzugreifen – auf ganz konkrete Weise über eine Summe von Situationen zu getrennten Zeitpunkten hinausgeht, davon abweicht oder gar nichts mit ihnen zu tun hat.

Wie bei fast allen theoretischen Resultaten der Quantenmechanik kommt auch hier die Wellenfunktion ins Spiel. Dieses mathematische Gebilde führte der österreichische Physiker Erwin Schrödinger vor 80 Jahren ein, um Quantenzustände zu definieren. Aus der Wellenfunktion folgt das Phänomen der Verschränkung, die Unbestimmtheit der Teilchenorte – und nicht zuletzt die Nichtlokalität der Quantenmechanik.

Aber was ist die Wellenfunktion eigentlich? Über diese Frage reden sich Grundlagentheoretiker die Köpfe heiß. Ist sie ein konkretes physikalisches Objekt oder eine Art Bewegungsgesetz, ist sie eine interne Teilcheneigenschaft oder eine Beziehung zwischen räumlichen Punkten? Oder ist sie bloß unsere gegenwärtige Information über die Teilchen?

Mathematisch werden quantenmechanische Wellenfunktionen in einem abstrakten, vieldimensionalen Konfigurationsraum dargestellt. Falls wir darunter konkrete physikalische Objekte verstehen wollen, müssen wir die Idee akzeptieren, dass die Weltgeschichte sich weder im dreidimensionalen Raum unserer Alltagserfahrung abspielt noch in der vierdimensionalen Raumzeit der Relativitätstheorie, sondern in diesem gigantischen, unanschaulichen Konfigurationsraum, aus dem irgendwie die Illusion des dreidimensionalen Alltagsraums hervorgeht. Auch unsere dreidimensionale Vorstellung von Lokalität müsste als Produkt jenes abstrakten Raums verstanden werden. Die Nichtlokalität der Quantenphysik wäre unser Fenster in eine tiefere Wirklichkeitsebene.

Auf einmal ist der Status der speziellen Relativitätstheorie, mehr als ein Jahrhundert nach ihrer Entstehung, eine radikal offene Frage mit überraschend vielen Antworten. Diese Situation ist entstanden, weil Physiker und Philosophen endlich die losen Enden von Einsteins lange ignorierte Kritik an der Quantenmechanik aufgegriffen haben – ein weiterer Beweis für Einsteins Genie. Es könnte gut sein, dass der unterschätzte Vordenker dort irrte, wo wir ihm Recht gaben, und dort Recht hatte, wo wir glaubten, er sei im Irrtum. Vielleicht nehmen wir das Universum mit weniger getrübbten Sinnen wahr als allzu lange behauptet. ◀



**David Z. Albert** ist Professor für Philosophie an der Columbia University in New York sowie Autor der Bücher »Quantum Mechanics and Experience« und »Time and Chance«. **Rivka Galchen** unterrichtet an derselben Universität kreatives Schreiben. Sie veröffentlicht Geschichten und Essays, oft zu naturwissenschaftlichen Themen. Ihr erster Roman »Atmospheric Disturbances« erschien im Mai 2008 in den USA.

**Albert, D. Z.:** Quantum Mechanics and Experience. Harvard University Press, 1992.

**Bell, J. S.:** Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics: Collected Papers on Quantum Philosophy. Cambridge University Press, 2. Auflage 2004.

**Fine, A.:** The Shaky Game: Einstein, Realism, and the Quantum Theory. University of Chicago Press, 2. Auflage 1996.

**Maudlin, T.:** Quantum Non-Locality and Relativity: Metaphysical Intimations of Modern Physics. Wiley-Blackwell, 2. Auflage 2002.

**Wheeler, J. A., Zurek, W. H. (Hg.):** Quantum Theory and Measurement. Princeton University Press, 1983. (enthält den EPR-Artikel und Bohrs Antwort)

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/1002937](http://www.spektrum.de/artikel/1002937).

## Warum die Sonne (k)ein Loch in die Welt brennt

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

Im hellen Sonnenlicht scheinen selbst solide Gegenstände durchsichtig zu werden.

*Einst sah ich eine schwarz gekleidete Frau mit weißem Kopftuch; dieses Tuch schien doppelt so breit wie ihre Schultern zu sein, welche schwarz bekleidet waren.*

Leonardo da Vinci (1452–1519)



ALLE FOTOS: H. JOACHIM SCHLICHTING

Leonardo da Vincis Aufmerksamkeit galt auch unspektakulären, gleichwohl überraschenden Naturphänomenen: »So bemerken wir, wenn wir die Sonne durch die kahlen Zweige des Baums betrachten, dass alle Zweige, die vor der Sonnenscheibe liegen, so dünn sind, dass man sie nicht mehr sieht.« Und er führt weitere Beispiele für denselben Effekt an: »Einst sah ich eine schwarz gekleidete Frau mit weißem Kopftuch; dieses Tuch schien doppelt so breit wie ihre Schultern zu sein, welche schwarz bekleidet waren.« Sogar »zwischen den Zinnen von Befestigungen« entdeckte Leonardo das Phänomen: Da »gibt es Zwischenräume, die genauso breit sind wie die aufragenden Teile, und doch erscheinen Erstere etwas breiter als Letztere«.

Seine Liste von durch Sonneneinstrahlung seltsam veränderten Gegenständen, nachzulesen in der Schriftensammlung »Trattato della pittura«, lässt sich mühelos verlängern. So erleiden auch andere dunkle Objekte, etwa ein Schornstein, vor sehr hellem Hintergrund vermeintliche Substanzeinbußen. Umgekehrt wirken sehr helle Gegenstände wie die glatten Bahnschienen, die durch Sonnenreflexe aufleuchten, breiter, als sie tatsächlich sind, und die nach Neumond auftauchende Sichel scheint zu einer größeren Kugel zu gehören, als der im aschgrauen Licht schimmernde Restmond nahelegt.

Auch dieses Rätsel war Leonardo bekannt: Ein »in einem Teil seiner Länge zum Glühen gebrachte(r) Eisenstab, falls er sich an einem dunklen Ort befindet«, so ist in den »Aufzeich-

nungen« zu lesen, erscheint »an der glühenden Stelle viel dicker, und zwar umso dicker, je stärker er glüht«. (Natürlich meinte er damit nicht, dass sich der Stab durch die Hitze tatsächlich ausdehnt. Dieser reale Effekt ist so winzig, dass er mit bloßem Auge kaum wahrnehmbar ist.)

Die Ursache all dieser Phänomene ist nun weniger in der Physik als vielmehr in der menschlichen Physiologie zu suchen. Normalerweise werden Gegenstände entsprechend den Gesetzen der geometrischen Optik farb- und helligkeitstreu auf die Netzhaut des Auges abgebildet. Besonders helle Objekte erregen unsere Rezeptoren aber besonders stark, gegebenenfalls über deren Sättigungsgrenze hinaus.

Dann kann die Erregung auch auf benachbarte Sinneszellen übergreifen, und uns erscheint selbst das hell, was »in Wirklichkeit« viel dunkler ist. Warum aber zeigt sich dieser Effekt auch auf Fotografien? Geht die Analogie zwischen Wahrnehmung und fotografischer Abbildung tatsächlich so weit? Sie tut es. Über einen vergleichbaren Mechanismus aktiviert übergroße Helligkeit, die auf einen Film einfällt, benachbartes »Filmkorn« ebenso wie benachbarte digitale Pixel. Damit ist klar: Die Sonne brennt zwar kein Loch in die Welt – wohl aber in die Bilder, die wir uns von ihr machen. <

**Die tief stehende Sonne, betrachtet durch das Geäst eines Baums, scheint einige Äste regelrecht wegzubrennen (a). Und ein dunkel vor heller Sonne aufragender Schornstein wird teilweise stark überstrahlt (b). Umgekehrt werden Eisenbahnschienen durch Sonnenreflexe förmlich aufgeblasen – zumindest in unserer Wahrnehmung (c). Und auch die Mondsichel scheint, wenn sie wächst, den Umfang des Erdtrabanten zu vergrößern (d).**

### Literaturhinweise:

**Da Vinci, L.:** Trattato della pittura. Società Tipografica dei Classici Italiani, Mailand 1804.

**Da Vinci, L.:** Tagebücher und Aufzeichnungen. List-, Leipzig 1940.



**H. Joachim Schlichting** ist Professor und Direktor des Instituts für Didaktik der Physik an der Universität Münster.

**1959**

## Hoffnung im Kampf gegen Krebs

»Über einen der bedeutendsten Fortschritte im Kampf gegen den Krebs berichtet ... der Grazer Radiologe Prof. A. Leb: »Die voroperative Strahlenbehandlung ist eine der wenigen ... statistisch gesicherten Fortschritte in der Behandlung bösartiger Tumore.« Sie erfasst ... auch noch die für das Messer des Chirurgen unerreichbaren Tochtergeschwülste. Außerdem aber schwächt eine der Operation vorausgehende Bestrahlung auch den Haupttumor in seiner Vermehrungsfähigkeit.« *Deutsche Hebammen-Zeitschrift*, 11. Jg., Heft 9, September 1959, S. 315f

## Mögliches und Unmögliches kleben

»Tatsächlich vermag ein kleiner Batzen dieses bemerkenswerten Klebstoffs ... die 1,5 Tonnen eines mittleren Automobils zu tragen! Der neue »Leim«, Liquid Iron ... genannt, ist ein neues Mitglied einer Familie aufsehenerregender Klebstoffe, mit denen man seit etwa zehn Jahren in der Industrie alle möglichen und unmöglichen Dinge zusammenklebt. Kürzlich erschienen diese Klebstoffe auch in Kleinpackungen für den Bastler und Heimwerker.

Sie werden allgemein als Epoxyharzkleber bezeichnet und stets in zwei getrennten Behältern geliefert. Die Grundsubstanz ist das Kunstharz selbst, ... dem man gewöhnlich einen »Füller« aus Metallpulver, gemahlener Keramik, Bimsmehl oder Diatomeenerde hinzufügt ... Ein getrennter Behälter enthält ei-



**Werbeträchtige Demonstration der Tragkraft des neuen Klebstoffs**

nen flüssigen Katalysator, der, im richtigen Verhältnis zugegeben, das Harz aktiviert und es auf chemischem Wege aushärtet und »abbinden« lässt.« *Populäre Mechanik*, 4. Jg., Bd. 9, Heft 3, September 1959, S. 24ff

## Müll im Glas

»Für die Beseitigung radioaktiver Spaltprodukte aus Kernreaktoren wurden bereits zahlreiche Verfahren vorgeschlagen ... Stahltanks ... rosten ... Beton und Ziegel können ... ausgelaugt werden. In den Laboratorien der kanadischen Atomenergiebehörde wurde nun ein neuer Weg gefunden: Man schmilzt die Abfälle in ... spezielles Glas ... ein. Zu diesem Zweck werden die ... Spaltprodukte mit ... Nephelinsyenit und Ätzkalk versetzt, wobei die Säure einen Teil des ... Silikats unter Bildung eines festen Gels zersetzt ... Durch weiteres Erhitzen können alle ... Gase entzogen werden. Bei 1350 °C schließlich schmilzt das Gel und geht bei langsamer Abkühlung in den glasigen Zustand über, der durch Wasser praktisch nicht auslaugbar ist.« *Chemiker-Zeitung*, 83. Jg., Nr. 17, 10. September 1959, S. 580

## Narkose ohne Ekel

»Die allgemeine Betäubung (durch Chloroform, Äther usw.) ... geschah bisher ausschließlich mittels Einatmung. ... Vor allem kommt es dabei leicht zu einer Reizung der Atmungsorgane, vermehrter Schleimsekretion und Entzündungen ... Für den Patienten besonders unangenehm ist das Ängstgefühl, der Ekel und das Übelsein infolge der Einatmung der stechend riechenden Narkotika ... Alle

diese Nachteile lassen sich nach Professor Ludw. Burkhart vermeiden, wenn man das Narkotikum direkt in das Blut bringt. Das geschieht, indem man eine Lösung des Narkotikums in physiologischer Kochsalzlösung herstellt und ... durch eine in eine Vene (Ader) eingebundene Kanüle ... in das Blut langsam einfließen lässt.« *Die Umschau*, 13. Jg., Nr. 36, 4. September 1909, S. 779f

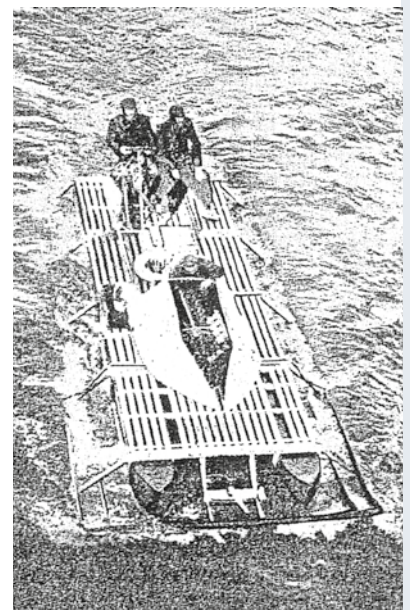
## Gefährlicher Irrtum

»Innerhalb der letzten 1 ½ Jahre ist es der staatlichen Grubenverwaltung in Joachimsthal gelungen, 13 g Radiumpräparate zu erzeugen, die ... im ganzen etwa 1 g Radium enthalten. Die gewonnenen Stoffe sind dem zuständigen Ministerium in Wien übergeben worden. ... Joachimsthal selbst hat im verflossenen Sommer bereits seine Wirksamkeit als Radiumkurort begonnen; es war voll besetzt, und man berichtet über gute Heilerfolge bei Gicht und rheumatischen Erkrankungen.« *Allgemeine Medicinische Central-Zeitung*, 78. Jg., Nr. 39, 25. September 1909, S. 548

## Nur Fliegen ist schöner

»Das Prinzip der Gleitboote ist ganz einfach und findet seine Anwendung bei dem Drachen, den Kinder in die Luft steigen lassen. Die Fläche des Drachens ist nach vorn geneigt, und wenn er vorwärts gezogen wird, so fließt die Luft unter ihm ab und hebt ihn zugleich hoch. Die ziehende Kraft wird beim Boote durch die treibende der Schraube ersetzt, und wenn nun der flache, nach vorn ansteigende Boden gegen das Wasser ... gedrängt wird, so muss dies eine hebende Wirkung auf das ganze Fahrzeug äussern, bis dasselbe ... die Oberfläche des Wassers kaum noch berührt, so dass hierdurch also der Fahrwiderstand des Wassers fast ausgeschaltet wird.« *Die Welt der Technik*, 71. Jg., Nr. 17, 1. September 1909, S. 321ff

**1909**



**Schnell unterwegs: das Gleitboot**

# NIKOTINSUCHT SCHON NACH EINER ZIGARETTE?

Abhängig macht manchmal schon eine einzige Zigarette, vor allem Jugendliche.  
Von da an wird das Gehirn nie mehr so funktionieren wie vorher –  
auch nicht bei späteren Nichtrauchern.

Von Joseph R. DiFranza

## In Kürze

- ▶ Zumindest bei Jugendlichen treten **die typischen Entzugserscheinungen** der Nikotinsucht oft innerhalb von Wochen nach dem ersten Zigarettenkonsum auf. Manche können schon nach einmaligem Genuss nicht wieder mit dem Rauchen aufhören.
- ▶ Anscheinend passt sich das Gehirn rasend schnell an die Droge an. Dieser Zustand benötigt **weitere Nikotinzufuhr** – wenn auch zunächst in großen Abständen. Selbst bei späterer Enthaltensamkeit erreicht das Gehirn nicht wieder seinen früheren Zustand.
- ▶ Wichtig sind daher **öffentliche Kampagnen** gegen das Rauchen gerade auch bei Jugendlichen.

**W**ie es sich mit der Suchtentwicklung beim Rauchen verhält, lernte ich im Medizinstudium. Da hieß es: Man raucht vor allem wegen des Genusses, und mit der Zeit wird man von diesem Gefühl psychisch anhängig. Weil sich die unmittelbaren physiologischen Nikotinwirkungen aber durch Gewöhnung abschwächen, sich also eine so genannte Toleranz aufbaut, greift man immer öfter zur Zigarette. Irgendwann, so erfuhr ich, sei eine kritische Menge für Sucht erreicht.

Denn weil das Blut erst ab etwa fünf Zigaretten am Tag stets Nikotin enthält, könne sich folglich erst jetzt auch eine körperliche Abhängigkeit entwickeln. Oft würde der Mensch dann schon seit Jahren rauchen, und gewöhnlich brauche es bis zur Sucht ein paar tausend Glimmstängel. In diesem Stadium bekommen Betroffene spätestens wenige Stunden nach dem letzten Tabakkonsum die typischen Entzugserscheinungen – wie innere Unruhe, Reizbarkeit und Konzentrationsschwierigkeiten. Glaubt man dieser Auffassung, so sind Raucher, die weniger als fünf Zigaretten pro Tag brauchen, nicht abhängig.

Als Arzt hatte ich dann die berühmte Patientin, die offenbar die medizinischen Lehrbücher nicht kannte. Eine Jugendliche erzählte mir bei einer ganz normalen Untersuchung,

sie könne mit dem Rauchen nicht mehr aufhören. Dabei habe sie erst vor zwei Monaten damit angefangen. Natürlich hielt ich das Mädchen für einen seltenen Ausnahmefall. Doch meine Neugier war geweckt. Ich befragte Schüler der nächsten Highschool nach ihren Erfahrungen. Eine 14-Jährige erzählte mir, schon zweimal habe sie wirklich versucht, das Rauchen aufzugeben, aber sie schaffe es nicht. Erstaunt erfuhr ich, dass dieses Mädchen in zwei Monaten nur wenige Zigaretten pro Woche konsumiert hatte. So wie sie ihre Entzugssymptome schilderte, klang das trotzdem genauso wie bei meinen kettenrauchenden Patienten, die am Tag zwei Schachteln aufbrauchten. Dass eine Abhängigkeit so rasch auftreten kann, noch dazu ohne eine tägliche Zigarette, widersprach meinen sämtlichen Vorkenntnissen über Nikotinsucht. Weitere Recherchen ergaben, dass dem Lehrbuchwissen die wissenschaftliche Basis fehlte.

Inzwischen befasste ich mich seit über zehn Jahren mit den Anfängen von Nikotinsucht bei frischen Rauchern. Diese Forschung wurde vom amerikanischen National Cancer Institute in Bethesda und vom National Institute on Drug Abuse (NIDA) in Rockville (beides Maryland) gefördert. Heute ist mir klar: Das alte Modell stimmte einfach nicht. Denn offenbar vermag bereits eine geringe Menge Nikotin das Gehirn bleibend zu verändern. Unter Umständen modifiziert anscheinend sogar





DAVID EMMITE PHOTOGRAPHY

**Nicht selten erleben Jugendliche schon in den ersten Wochen des Rauchens schwer unterdrückbare Suchtsymptome. Viele von ihnen konsumieren zu diesem Zeitpunkt wöchentlich erst maximal zwei Zigaretten.**

schon eine einzige Zigarette Neurone so, dass sich von nun an ein Verlangen nach der Droge einstellt. Sollte sich meine These bewahrheiten, böte das vermutlich auch den Medizinern neue Ansätze für Medikamente oder andere Therapien, die Rauchern das Aufhören erleichtern.

### Fataler erster Monat

Als meine Medizinerkollegen an der University of Massachusetts in Worcester und ich im Jahr 1997 mit diesen Forschungen begannen, mussten wir zunächst eine zuverlässige Richtgröße finden, um die ersten Abhängigkeits-symptome zu erkennen. Meiner Ansicht nach ist das entscheidende Kriterium für diese Sucht der Verlust von Autonomie oder Selbstbestimmung, was Experten oft als Kontrollverlust bezeichnen. Das bedeutet: Nur mit Anstrengung und bei schlechtem Befinden kann der Betroffene das Rauchen aufgeben. Ich entwarf dazu damals einen Fragebogen (die »*Hooked on Nicotin Checklist*« – HONC, siehe S. 48). Wer auch nur eine der Fragen bejaht, bei dem zeigt sich demnach schon eine beginnende Abhängigkeit. Inzwischen liegt die Liste in 13 Sprachen vor. Es handelt sich um das am besten abgesicherte Verfahren, eine Nikotinabhängigkeit zu erkennen. (Auch für andere Drogen ließe sich der Fragebogen leicht abändern.)

Hundertens von Jugendlichen legten wir die Checkliste drei Jahre lang wiederholt vor.

Resultat: Erschreckend oft entsteht die Abhängigkeit ganz schnell, wobei die Gefahr gleich im ersten Monat des Rauchens mit Abstand am größten ist. Sämtliche der nachgefragten Symptome können schon in den ersten Wochen auftreten, auch das Verlangen nach einer Zigarette sowie vergebliche Versuche, mit dem Rauchen aufzuhören. Diese Jugendlichen konsumierten im Schnitt nur zwei Zigaretten pro Woche, wenn sie bereits die ersten Abhängigkeitsanzeichen erlebten.

Als ich die Studie im Februar 2000 vorlegte und auch noch behauptete, einige der Teenager hätten schon nach ein oder zwei Zigaretten Symptome gezeigt, belächelte die Fachwelt meine Befunde. Viele Laien sagten mir dagegen, nach ihrer Erfahrung sei ich auf der richtigen Spur. Wie aber erklären sich die neuen Ergebnisse? Wie können Entzugerscheinungen auftreten, wenn im Blut Nikotin doch erst sporadisch vorkommt?

Anerkennung erhielt ich erst, als andere Forscherteams meine Ergebnisse bestätigten. Die betreffenden Studien leiteten Jennifer O'Loughlin von der McGill University in Montreal (Kanada), Denise Kandel von der Columbia University in New York und Robert Scragg von der University of Auckland (Neuseeland). Mittlerweile belegen ein Dutzend Untersuchungen, dass Entzugerscheinungen bei Rauchnovizen gar nicht selten vorkommen. Von dem Kreis derer, die solche Symptome



erfahren, geschieht das bei zehn Prozent innerhalb von zwei Tagen nach der ersten Zigarette. Innerhalb

eines Monats erleben solche Anzeichen 25 bis 35 Prozent von ihnen. Laut einer umfangreichen Erhebung an Jugendlichen in Neuseeland hatten 25 Prozent der neuen Raucher nach ein bis vier Zigaretten derartige Beschwerden. Wie sich zudem zeigte, steigt bei jungen Menschen mit so frühen Entzugssymptomen die Wahrscheinlichkeit, dass sie später einmal täglich zum Glimmstängel greifen werden, fast um das 200-Fache.

Was mag bereits eine einzelne Zigarette im Gehirn anrichten? Älteren Tierstudien zufolge bewirken ständige hohe Nikotinmengen – entsprechend täglich ein bis drei Packungen – deutliche Veränderungen an den Nervenzellen. So steigt die Zahl bestimmter Rezeptoren, die eine hohe Affinität zu der Droge haben. Durch Autopsien an Menschen wissen wir zudem, dass Hippocampus, Frontal- und Kleinhirn von Rauchern die anderthalbfache bis doppelte Menge dieser Rezeptoren besitzen.

Ich bat Theodore Slotkin von der Duke University in Durham (North Carolina), an Nagetieren auszutesten, bei welcher Nikotinkleinste Menge die Rezeptorenanzahl steigt. Die Ratten bekamen eine tägliche Drogenzufuhr entsprechend ein bis zwei Zigaretten. Unter diesen Bedingungen nahm schon am zweiten Tag die Rezeptorenmenge im Hippocampus zu, also in einer wichtigen Struktur für das so genannte Langzeitgedächtnis. Arthur Brody und seine Kollegen von der University of California in Los Angeles entdeckten dann, dass der Gehalt einer einzigen Zigarette ausreicht, um 88 Prozent der Nikotinrezeptoren des Gehirns zu besetzen. Zwar sind die genauen Hintergründe noch unklar. Doch dass sich die höhere Rezeptorenanzahl physiologisch auswirkt und schon deswegen zwei Tage nach der ersten Zigarette Entzugssymptome auftreten können, lässt sich vorstellen.

Der Suchtforschung zufolge sind Entzugssymptome die Konsequenz davon, dass sich der Körper an die Drogenwirkungen anzupassen versucht, indem er sie ausgleicht – also sozusagen gegenbalanciert, um seine Funktionen und den Stoffhaushalt im physiologischen Gleichgewicht zu halten (die Forscher nennen das Homöostase). Der Körper errichtet unter der Droge praktisch ein neues Gleichgewicht. Manche Suchtmittel bewirken beispielsweise, dass bestimmte Nervenzellen mehr neuronale Botenstoffe (Neurotransmitter) produzieren als normal. Im Gegenzug sorgt der Körper für mehr Hemmung. Ein Drogenentzug in die-

sem Zustand hat dramatische Folgen. Denn jetzt überwiegt die Hemmung und produziert die bekannten Symptome.

Dass schon eine einzige Zigarette solche Auswirkungen hat, wäre an sich nicht so verwunderlich. Schließlich gewöhnt sich der Körper sehr schnell an manche Suchstoffe, etwa Morphin. Erklärungsbedürftig erscheint aber, wieso es einerseits so mancher langjährige Raucher ohne Zigarette höchstens ein oder zwei Stunden aushält, und wieso andererseits anfangs eine einzige Zigarette genügt, die Entzugssymptome für Wochen zurückzuhalten – obwohl doch das Nikotin im Körper keinen Tag vorhält.

### Sucht ohne Genuss

Offensichtlich hat die Nikotinüberflutung im Gehirn lang anhaltende Nachwirkungen. Wie es aussieht, kurbelt der Suchtstoff Schaltsysteme an, in denen vielerlei Boten- und Signalstoffe mitwirken – darunter Acetylcholin, Dopamin, GABA, Glutamat, Noradrenalin, Opiatpeptide und Serotonin. So steigert eine einzige Nikotindosis die Noradrenalinproduktion im Hippocampus von Ratten mindestens einen Monat lang. Auch die Wirkung auf manche neurologischen und kognitiven Funktionen hält nachweislich über Wochen an. Ob speziell irgendwelche dieser Effekte mit den Entzugssymptomen zusammenhängen, wissen wir aber noch nicht.

Die Zeitspanne nach der letzten Zigarette bis zum Auftreten von Entzugssymptomen bezeichnen Mediziner als Latenzphase. Alle paar Wochen eine Zigarette zu rauchen kann in der ersten Zeit genügen. Doch langsam baut sich eine zunehmende Gewöhnung – Toleranz – an die Droge auf, und das symptomfreie Intervall wird immer kleiner. Das nennen wir abhängigkeitsbedingte Toleranz. Oft vergehen Jahre, bis jemand täglich fünf Zigaretten rauchen muss – während die Anpassungen, die Entzugssymptome hervorrufen, ja praktisch über Nacht auftreten können. Es ist eben nicht so, dass ein jahrelanger Nikotinmissbrauch schließlich Entzugssymptome erzeugt, sondern die Entzugssymptome von Anfang an sind meiner Meinung nach schuld, wenn jemand im Lauf der Jahre zum starken Raucher wird.

Oft heißt es, der Genuss sei das, was Nikotinabhängige suchen. In meiner Praxis erlebe ich jedoch Kettenraucher, die das Rauchen eigentlich verabscheuen. Müssten nicht gerade die am stärksten Abhängigen den Qualm am meisten genießen? Dagegen spricht eine Studie von Eric Moolchan vom National Institute on Drug Abuse: Er wies bei Jugendlichen nach, dass zwar deren Anhängigkeitsgrad mit der Zeit zunahm, ihr Spaß am Rauchen aber

### LEXIKON

#### Nikotinentzug:

Typisch sind Symptome wie starkes Verlangen nach der Droge (»Craving«), Unruhe, Nervosität, Reizbarkeit, Konzentrationsschwierigkeiten und Schlafstörungen.

#### Latenzphase bis zum nächsten »Craving«:

Das symptomfreie Intervall seit der letzten Zigarette; anfangs können das einige Wochen sein, nach Jahren des Tabakkonsums beträgt das freie Intervall manchmal nur noch Minuten.

#### abhängigkeitsbedingte Toleranz:

Durch diesen Mechanismus wird die Latenzphase immer kürzer. Die einmal erreichte Toleranz bleibt bestehen.

#### abstinenzbedingte Anpassungen im Gehirn:

Sie ahmen bei Exrauchern die Nikotinwirkung nach, hemmen also ebenfalls das Verlangen nach Nikotin, das wegen des Toleranzeffekts sonst nicht verschwinden würde.

zugleich sank. Brauchen wir also eine neue Theorie? Noch etwas Paradoxes fiel mir auf: Rauchen unterdrückt vorübergehend das Verlangen nach Nikotin, doch die Sucht verspürt nur jemand, der schon einmal geraucht hat. Wie kann ein- und derselbe Stoff ein Verlangen schüren und es unterdrücken?

Ich überlegte: Die sofortige und direkte Wirkung von Nikotin könnte sein, ein Begehren zu beheben. Aber mit der Zeit würde diese unmittelbare Unterdrückung wie bei allen abhängig machenden Drogen ins Extrem gesteigert, also immer heftiger ausfallen. Das ist die so genannte Sensitivierung oder Sensitisierung.

Als Gegenmaßnahme, so spekulierte ich, verändert sich das Gehirn: Um sein Gleichgewicht wieder einzuregulieren, sorgt es unverzüglich für Gegenanpassungen. Wenn dann später die unmittelbare Nikotinwirkung abflaut, stimmt aber die homöostatische Balance nicht mehr. Somit sorgen die Veränderungen im Gehirn für die typischen Missempfindungen des Entzugs und rufen letztlich das schier unbezwingbare Verlangen nach einer weiteren Zigarette hervor. Nach dieser Theorie von Sensitivierung und Homöostase würde Nikotin nicht süchtig machen, weil es Genuss verschafft, sondern weil es schlicht und einfach eine Zeit lang das Verlangen unterbindet, das »Craving«.

Ich stelle mir im Gehirn zwei komplementäre Systeme vor, die sich zueinander ähnlich wie die Schalen einer Waage verhalten (siehe Kasten rechts): das eine (A) erzeugt Begehren, das andere (B) hemmt Verlangen. (Ich spreche vom Craving generierenden und vom Craving hemmenden System.) Aktivität, also Stimulation des jeweiligen Systems, bedeutet in dieser Veranschaulichung, dass die Waagschale schwerer wird und sinkt, Hemmung, dass sie ansteigt.

Normalerweise hat das Craving erzeugende System A die Aufgabe, Sinnesreize, wie einen leckeren Duft, mit Situationen zu vergleichen, die als belohnend erlebt wurden – zum Beispiel die Erinnerung an eine bestimmte Speise – und dann das Verlangen danach zu schüren, damit wir die Speise essen. Das Gegensystem B ist dazu da, uns Sättigung, also Befriedigung des Gelüsts, zu signalisieren.

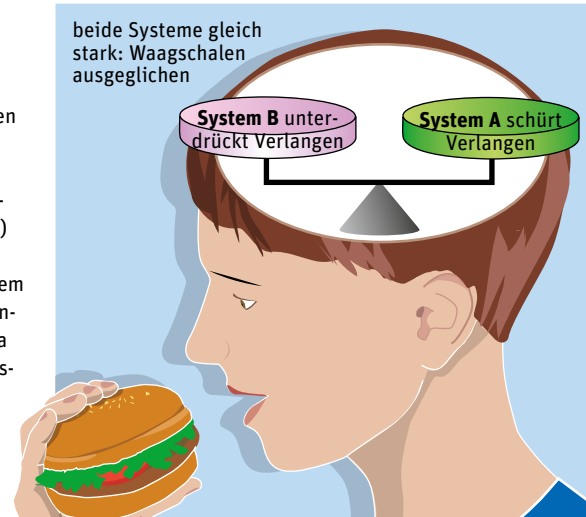
Der Körper bemüht sich nach meiner Vorstellung, die beiden Systeme auszugleichen. So befinden sich beim Nichtraucher die beiden Waagschalen meist einigermaßen im Gleichgewicht. Doch wenn nun Nikotin das System B aktiviert und dadurch Verlangen zu stark unterbindet, versucht der Organismus seinerseits die Aktivität von System A wieder zu steigern – und zwar indem sich entsprechende Anpassungen ausbilden. Lässt allerdings die Nikotinwirkung wieder nach, ist das

## NEUES MODELL ZUR NIKOTINSUCHT

**Nach der Sensitivierung-Homöostase-Theorie** bringt die Droge zwei Hirnsysteme (oberes Bild) aus der Balance. Daran passt sich das Gehirn sofort durch Gegenmaßnahmen an (Mitte). Von jetzt an geraten die beiden Systeme ohne Nikotin aus dem Gleichgewicht (unten).

### GESUNDES GLEICHGEWICHT

Normalerweise – bei Nichtrauchern – halten sich im Gehirn zwei Systeme die Waage: System A, das Verlangen (englisch *craving*) schürt, zum Beispiel nach Essen, und System B, das weiteres Verlangen unterdrückt, etwa weil man genug gegessen hat.

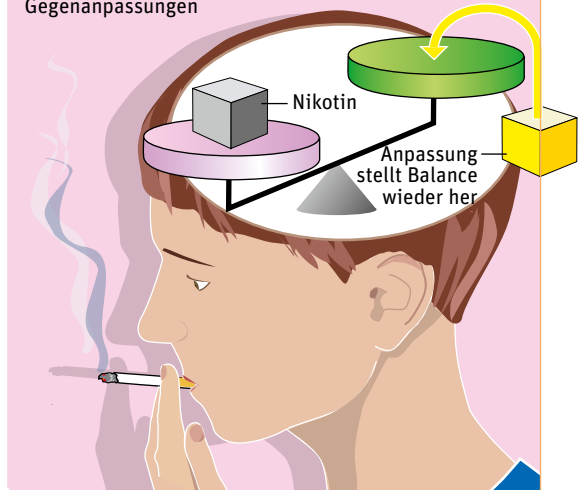


beide Systeme gleich stark: Waagschalen ausgeglichen

### ERSTE ZIGARETTE

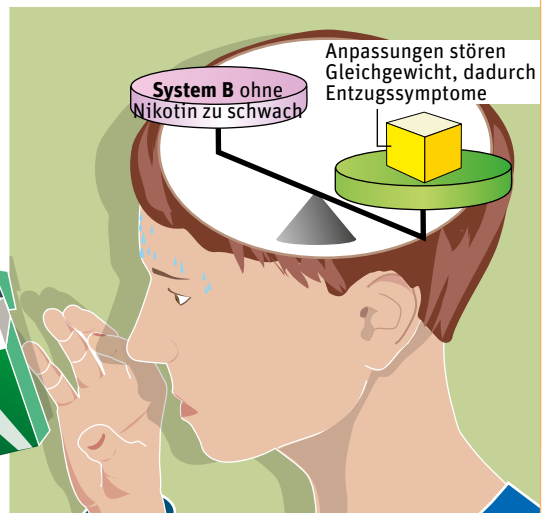
Nikotin stimuliert das unterdrückende System B: Die lila Waagschale erhält dadurch mehr Gewicht. Das Verlangen schürende System A gerät dadurch zu leicht. Dem setzt das Gehirn unverzüglich Anpassungen (gelb) entgegen, die ihrerseits auch dem System A mehr Gewicht verleihen.

Gegenanpassungen



### ENTZUGSSYMPTOME

Die Gegenanpassungen von System A sind bleibend. Wenn die Nikotinwirkung abflaut, wird deswegen das Verlangen hemmende System B im Verhältnis zu schwach, die Waagschale zu leicht. Aber weitere Nikotinzufuhr, die ja System B stimuliert, stellt das Gleichgewicht wieder her.



Anpassungen stören Gleichgewicht, dadurch Entzugssymptome

LISA APFELBÄCHER



## CHECKLISTE FÜR NIKOTINSUCHT

### Den Fragebogen HONC

(»Hooked on Nicotin Checklist«) entwickelte der Autor für Jugendliche. Wenn jemand nur eine der Fragen bejahen muss, zeigt dies nach Ansicht der Forscher eine beginnende Abhängigkeit von Nikotin.

- Hast du schon einmal vergeblich versucht, mit dem Rauchen aufzuhören?
- Rauchst du noch, weil dir das Aufhören so schwer fällt?
- Hast du schon einmal gedacht, dass du von Zigaretten abhängig bist?
- Kennst du das Gefühl, dass du jetzt unbedingt rauchen musst?
- War dir schon einmal so, als ob du jetzt dringend eine Zigarette bräuchtest?
- Leidest du darunter, an bestimmten Orten nicht rauchen zu dürfen, etwa in der Schule?

Wie war das, als du versucht hast, mit dem Rauchen aufzuhören (oder als du länger nicht geraucht hattest):

- Hattest du Konzentrationschwierigkeiten, weil du nicht rauchen konntest?
- Warst du besonders gereizt, weil du nicht rauchen konntest?
- Hattest du das Gefühl, du müsstest unbedingt rauchen?
- Warst du nervös, unruhig oder besorgt, weil du nicht rauchen konntest?

System A übererregt, also das Begehren übermäßig. Nur erneutes Nikotin kann wieder einen ausgeglichenen Zustand herbeiführen. Ich stelle mir vor, dass unter solchen Bedingungen Rezeptoren an Nervenzellen des Craving erzeugenden Systems praktisch unverzüglich ihre Konfiguration verändern. Das könnte das rasche Auftreten von Abhängigkeit bei Teenagern erklären.

Die ersten konkreten Hinweise darauf, dass solch ein Regelwerk in unserem Kopf wirklich existieren könnte, stammen von den unzähligen Hirnaufnahmen mit Magnetresonanztomografen (fMRT). Zeigt man Menschen zum Beispiel Bilder oder andere Signale, die bei ihnen ein Verlangen nach Nikotin, Alkohol, Kokain, Opiaten, ja selbst nach Schokolade auslösen, dann erhöht sich der Stoffwechsel an bestimmten Stellen des Frontallappens, auch im vorderen Gyrus cinguli. Dies könnte für die Existenz eines Systems sprechen, das Verlangen generiert. Hinweise darauf, dass Nikotin dieses System tatsächlich unterdrückt, entdeckten dann Hyun-Kook Lim und seine Kollegen von der Katholischen Universität von Korea in Seoul. Sie verabreichten den Versuchspersonen Nikotin und konnten obige Hirnregionen nicht mehr mit Bildern von Zigaretten oder rauchenden Menschen reizen.

Auch die immer kürzere Pause zwischen zwei Zigaretten, also die mit wachsender Abhängigkeit steigende Toleranz für Nikotin, erklärt das Gleichgewichtsmodell. Wird nämlich das Craving generierende System A wiederholt durch Zigarettenkonsum unterdrückt, erfolgt meiner Ansicht nach dort eine zusätzliche Gegenmaßnahme, um die Balance zu erhalten. Die weitere Anpassung hilft, die Aktivität dieses Systems wieder zu steigern, und sorgt dafür, dass das Nikotin im hemmenden System B immer kürzer wirkt – folglich das Verlangen immer schneller einsetzt. Zwar entsteht eine Toleranz sehr viel langsamer als die Veränderungen, die Entzugerscheinungen verursachen. Bevor Jugendliche fünf Zigaretten am Tag benötigen, verstreichen gewöhnlich mindestens zwei Jahre. Doch der einmal erreichte Toleranzgrad gräbt sich offenbar fest ein. Wenn meine jungen Patienten nach einer längeren rauchfreien Phase rückfällig wurden, dauerte es meist nur ein paar Tage, bis sie wieder genauso oft zum Glimmstängel griffen wie früher. Die Dauer der Abstinenz spielte dabei praktisch keine Rolle.

Um dieses Phänomen zu verstehen, befragten Robert Wellman vom Fitchburg State College (Massachusetts) und ich 2000 Raucher nach ihren Erfahrungen. Wie viel hatten sie vor einem Aufhörversuch geraucht? Wie lange hatten sie ausgesetzt? Wie viel rauchten

sie gleich nach dem Rückfall? Nach einer Abstinenz von drei Monaten fingen viele mit ungefähr 40 Prozent der früheren Quote wieder an. Die Latenzzeit für Entzugerscheinungen schien sich somit immerhin etwas vergrößert zu haben. Unseres Erachtens geschieht das bereits in den ersten Wochen nach dem Aufhören. Allerdings dauert es gewöhnlich nur wenige Wochen, bis ehemalige Raucher wieder bei der alten Menge angelangt sind.

Dabei ist es fast egal, ob die rauchfreie Phase länger als drei Monate dauerte. Selbst noch nach Jahren steigen die Leute gleich bei 40 Prozent der einstigen Quote wieder ein, typischerweise mit sechs oder sieben Zigaretten am Tag. Niemals wird es ein Rückfälliger bis zur nächsten Zigarette wieder so lange problemlos aushalten wie ein Neueinsteiger. Das bedeutet: Im Gehirn eines ehemaligen Rauchers wird es nie wieder so aussehen wie früher.

## Hirnumbau nach dem Entzug

Wie kommt es dann aber, dass sich die Gier nach dem Glimmstängel nach einiger Zeit der Abstinenz trotzdem legt? Die einstigen Raucher unserer Studie konnten uns das nicht erklären. Deswegen zog ich mein Gleichgewichtsmodell zu Rate. Es erscheint mir plausibel, dass sich das Gehirn eines ehemaligen Rauchers in ganz eigener Weise anpassen muss. Für ein neues Gleichgewicht ohne den Suchstoff ist es nötig, diesmal praktisch Effekte der Droge nachzuahmen – das heißt: ebenfalls das System für Verlangen zu unterdrücken. Denn wie es aussieht, kehrt das Gehirn nicht einfach in den Zustand vor dem Rauchen zurück. Es scheint vielmehr eine neue, besondere Umbauphase durchzumachen, und zwar jetzt Anpassungen auf der Basis eines Rauchergehirns. Somit erreicht das Gehirn nun einen anderen Zustand als jemals zuvor.

Diese These überprüften Slotkin und seine Mitarbeiter an Ratten. Sie verglichen das Geschehen im Gehirn in vier Phasen: wenn die Nager noch nie Nikotin ausgesetzt gewesen waren; während sie es erhielten; während des Entzugs; und einige Zeit nach dem Entzug. Tatsächlich traten bei gewissen Hirnrindenneuronen, die mit den Botenstoffen Acetylcholin und Serotonin arbeiten, bestimmte Veränderungen erst nach dem Ende des Entzugs auf. Ein nikotinentwöhntes Gehirn sieht also wirklich anders aus als jemals vorher. Hinweise auf Umbauten im menschlichen Gehirn nach zwei Monaten Abstinenz fand das Team um HeeJin Lim von der Katholischen Universität von Korea: Ein neurotroper Faktor des Gehirns, der neuronale Anpassungen anregt, kam während dieser Zeit dreimal so häufig vor wie sonst.

## SCHNELLER NIKOTINEFFEKT IM GEHIRN

**Nikotin verändert das Gehirn** tatsächlich sehr schnell. In einer Studie erhielten Ratten die Droge an fünf aufeinanderfolgenden Tagen. Nach der ersten Dosis steigerte sich die Hirnaktivität mäßig und lokal eher begrenzt (farbige Stellen im errechneten Querschnitt links). Doch nach der fünften Dosis zeigten die magnetresonanztomografischen Aufnahmen eine insgesamt viel stärkere und breiter gestreute Aktivität. Offenbar stellt sich das Gehirn außerordentlich rasch auf den Nikotineffekt ein. Deswegen können schon ganz wenige Zigaretten süchtig machen.



Solche Anpassungen bei ehemaligen Rauchern scheinen ihrerseits das Craving generierende System zu hemmen und so den Anpassungen für Nikotintoleranz entgegenzuwirken. Darum hört irgendwann das Verlangen nach einer Zigarette auf. Jedoch reaktivieren Schlüsselreize das alte Gefühl nur zu leicht wieder. Gibt ein Exraucher dem nur einmal nach, vermag die Droge selbst nach Jahren die Aktivität des Craving-Systems gleich wieder massiv zu unterdrücken wie bei einem Gewohnheitsraucher. Letztlich ist die Situation nun schlimmer als zuvor. Denn die Anpassungen an die Abstinenz ahmen ihrerseits die hemmende Nikotinwirkung nach. Damit sich unter der Droge wieder ein Gleichgewicht einstellt, müssten jene Veränderungen rückgängig gemacht werden. Dann aber fehlt den Toleranzanpassungen der Gegenspieler, sobald die Wirkung dieser einen Zigarette nachlässt. Deswegen gieren rückfällige Exraucher sofort wieder nach der nächsten.

Mein Modell, das hier nur vereinfacht dargestellt werden konnte, repräsentiert keineswegs die vorherrschende Meinung in der Suchtforschung. Nach meiner Ansicht stellt Abhängigkeit einen Unfall auf physischer Ebene dar und hat nicht, wie so viele meiner Kollegen glauben, primär psychische Gründe. Viel Begeisterung für mein Konzept darf ich also nicht erwarten. Ob die Theorie nun stimmt oder nicht, dass das Gehirn in dieser Weise von vornherein versucht, wegen der Sensitivierung ein neues Gleichgewicht einzuregeln – Tatsache bleibt, dass das Nikotin der ersten Zigarette genügt, um das Gehirn umzustrukturieren. Und auch wenn manche noch über die Suchtkriterien nachdenken, so

steht inzwischen doch fest, dass bei Jugendlichen sehr schnell etliche Symptome von Abhängigkeit auftreten. Das macht Kampagnen gegen das Rauchen umso wichtiger.

Um meine Theorie zu untermauern, müssten wir die Sensitivierung im menschlichen Gehirn nachweisen. Vom Rattengehirn machten Jean A. King und ihre Kollegen von der University of Massachusetts in Worcester in Zusammenarbeit mit mir Aufnahmen mit fMRT. Die Tiere wurden dazu an fünf Tagen hintereinander Nikotin ausgesetzt. Tatsächlich ergaben sich nach der fünften Dosis drastisch andere Bilder als nach der ersten (siehe Kasten oben). Unter anderem spielte sich nun im vorderen Gyrus cinguli und im Hippocampus viel mehr ab als zu Beginn. Jetzt untersuchen wir das Geschehen bei menschlichen Rauchern. Wir wollen dabei auch die beteiligten Hirnregionen identifizieren.

Langfristig geht es insbesondere um die Entwicklung von Medikamenten, die auf die postulierten Systeme im Gehirn einwirken. Die Hoffnung ist, die Nikotinsucht gezielter zu behandeln, vielleicht sogar zu heilen. Zwar verdoppeln heute verfügbare Nikotinersatzmittel die Erfolgsquote bei der Entwöhnung vom Rauchen. Doch die große Mehrheit schafft es auf Dauer selbst so nicht, damit aufzuhören. Meiner Theorie zufolge benötigen wir eine Therapie, die das Verlangen nach Nikotin unterdrückt, ohne dabei jedoch kompensatorische Reaktionen zu stimulieren, denn die verstärken im Grunde nur das Craving. Je genauer wir verstehen, wie sich das Gehirn durch die Droge Nikotin verändert, desto eher können wir Raucher von ihrer oft tödlichen Sucht befreien. ◀



**Joseph R. DiFranza** praktiziert als Allgemeinmediziner der University of Massachusetts in Worcester. Seit Jahrzehnten kämpft er gegen den Verkauf von Zigaretten an Jugendliche. Letztlich ist seinen Forschungen und Anstrengungen auch zu verdanken, dass die auf Kinder gemünzte Camel-Werbung aufhörte.

Die alltägliche Sucht (Artikelsammlung zum Thema Sucht). Report 1/2008, Spektrum der Wissenschaft.

**DiFranza, J. R., Wellman, R. J.:** A Sensitization-Homeostasis Model of Nicotine Craving, Withdrawal, and Tolerance: Integrating the Clinical and Basic Science Literature. In: *Nicotine & Tobacco Research* 7(1), S. 9–26, Februar 2005.

**DiFranza, J. R. et al.:** Measuring the Loss of Autonomy over Nicotine Use in Adolescents: The DANDY (Development and Assessment of Nicotine Dependence in Youths) Study. In: *Archives of Pediatrics & Adolescent Medicine* 156(4), S. 397–403, April 2002.

**DiFranza, J. R. et al.:** The Development of Symptoms of Tobacco Dependence in Youths: 30-Month Follow-up Data from the DANDA Study. In: *Tobacco Control* 11(3), S. 228–235, September 2002.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/1002938](http://www.spektrum.de/artikel/1002938).

# FLEDERMÄUSE – wie sie fliegen und jagen lernten



Neue Erkenntnisse der Genetik sowie sensationelle Fossilfunde erhellen endlich die Evolution der Fledermäuse – und glätten die Wogen einer langjährigen Debatte über die Ursprünge ihrer Flugfähigkeit und Echoortung.

Von Nancy B. Simmons

## In Kürze

- ▶ Fledertiere, zu denen **Fledermäuse und Flughunde** gehören, sind die einzigen Säugetiere, die den aktiven Flug beherrschen. Wissenschaftler wollen deshalb wissen, wie sie sich aus vierfüßigen Vorfahren entwickelten.
- ▶ Bis vor Kurzem galt, dass selbst **die ältesten bekannten fossilen Fledertiere** im Wesentlichen den heute lebenden Arten glichen.
- ▶ Fossilien einer neu entdeckten Fledermausart ermöglichen es den Forschern, die Verbindungen zwischen **Fledertieren und ihren flugunfähigen Ahnen** aufzudecken.
- ▶ Analysen aus **Genetik und Entwicklungsbiologie** werfen ein neues Licht auf den Ursprung der Fledertiere. Das betrifft ihren Platz im Stammbaum der Säugetiere ebenso wie die Evolution von Fledermausflügeln und Echoortung.

**W**enn Sie in der Abenddämmerung eines lauen Sommerabends Ihren Blick über den Himmel schweifen lassen, entdecken Sie vielleicht blitzschnell umherschwirrende Fledermäuse. Neben der erstaunlichen Eleganz der Flügel können Sie an diesen Tieren aber auch eine der spektakulärsten Erfolgsgeschichten der Evolution erkennen.

Gemeinsam mit ihren nahen Verwandten, den Flughunden, bilden Fledermäuse die Gruppe der Fledertiere, die mit Ausnahme der Antarktis jeden Kontinent erobert hat. Fledertiere sind eine ungewöhnlich artenreiche Gruppe, jede fünfte heute lebende Säugetierart gehört dazu. Der Schlüssel für die Entwicklung dieser Lebewesen zu so viel Prominenz liegt natürlich in ihrer Flugfähigkeit. Sie erlaubt es ihnen, Ressourcen auszubeuten, die andere Säugetiere nicht erreichen können. Dieser Erfolg war ihnen wohl kaum in die Wiege gelegt: Kein anderes Säugetier hat je den Luftraum erobert. Die Frage, wie es den Fledertieren im Einzelnen gelungen ist, von flugunfähigen Vorfahren zu Herrschern des Nachthimmels aufzusteigen, hat Biologen seit Jahrzehnten intensiv beschäftigt.

Doch dauerte es lange, bis wir einige Antworten fanden. Im Februar 2008 glückte es meinen Kollegen und mir, die Geheimnisse zweier Fossilien einer bis dahin unbekannteren Fledermausart zu lüften. Sie sollten uns grundlegende Einblicke in diese rätselhafte Verwandlung liefern. Die aus dem US-Bundesstaat Wyoming stammende Spezies *Onychonycteris finneyi* ist das ursprünglichste je entdeckte Fledertier. Zusammen mit anderen Fossilien-

funden und neuen Genanalysen hat uns *Onychonycteris* zu einem neuen Verständnis des Ursprungs und der Evolution der Fledertiere geführt.

Um zu verstehen, wie andersartig diese Tierordnung ist, blicken wir auf eines ihrer Markenzeichen: die Flügel. Einige Säugetiere wie die Flughörnchen können von Baum zu Baum gleiten, weil sich von den Vorder- zu den Hinterbeinen ein Gleitschirm aus Haut spannt. Tatsächlich vermuten die meisten Fachleute, dass Fledertiere von baumbewohnenden Vorfahren abstammen, die Gleitflieger waren. Zum aktiven Flug sind unter den Säugetieren jedoch nur sie in der Lage – das ist eine viel kompliziertere Angelegenheit als ein Gleitfliegen. Fledertiere verdanken diese Fähigkeit dem Aufbau ihrer Flügel.

Sie besitzen extrem verlängerte Unterarm- und Fingerknochen, welche die dünnen, elastischen Flughäute stützen und spannen. Diese Membranen erstrecken sich nach hinten und umfassen auch die Hintergliedmaßen, die etwas kleiner sind als diejenigen eines vierfüßigen Säugetiers von vergleichbarer Größe.

Viele Fledertiere haben zudem zwischen den Hintergliedmaßen eine Schwanzflughaut. Ein einzigartiger knorpeliger Sporn, auch *Calcar* genannt, setzt am Fußgelenk an und stützt





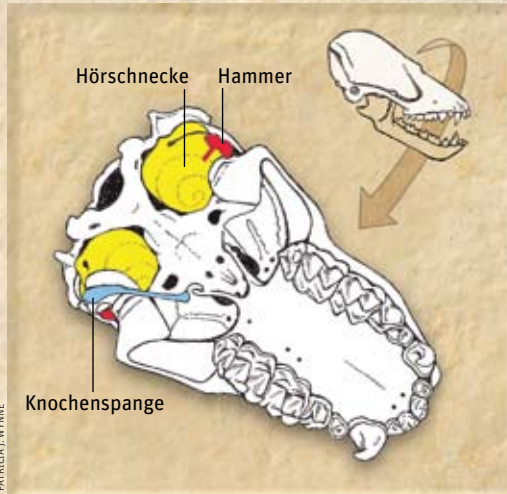
MINDEN PICTURES / NATURE PICTURE LIBRARY / JIM TAYLOR

Schnelle Jagd: Dank ihrer Flugfähigkeit und der Echoortung beherrschen Fledermäuse den Nachthimmel.

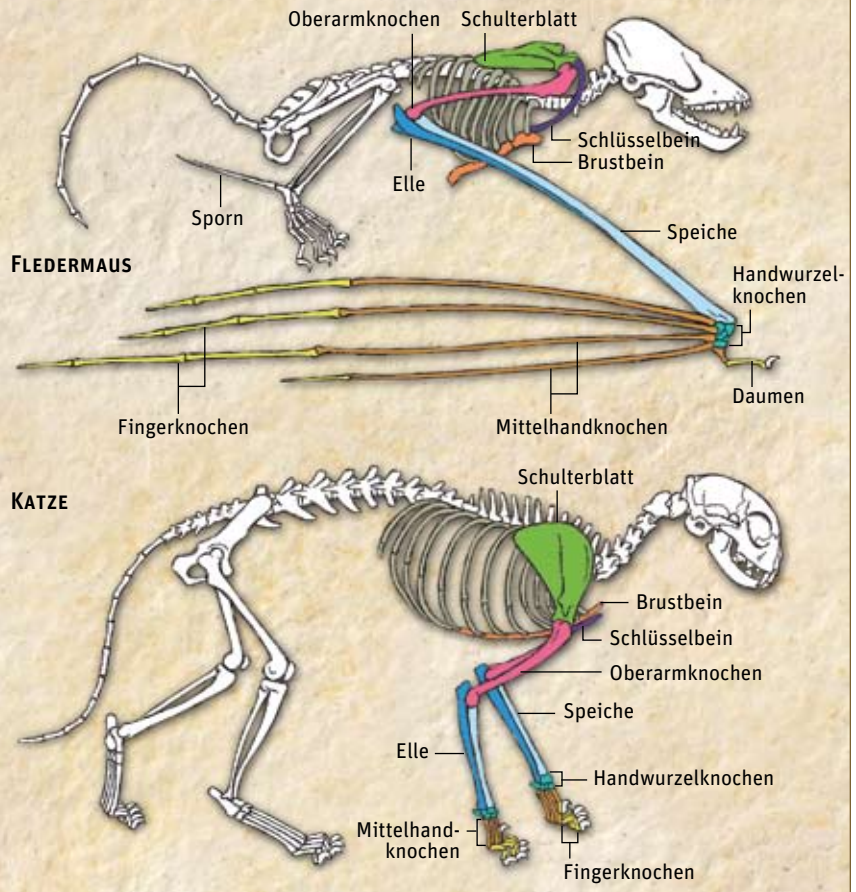
# WANDEL IM SÄUGETIER-BAUPLAN

**Die Abstammung der Fledertiere** von vierfüßigen Säugern zählt zu den dramatischsten Umgestaltungen der Evolution. Die meisten Veränderungen des Fledermausenskeletts dienen der Flugfähigkeit (rechts, farbige Knochen). Drei Knochen in Rachen und Ohr – eine Knochenspange als Aufhängeapparat des Kehlkopfes sowie Hammer und Hörschnecke – sind stark vergrößert und ermöglichen die Echoortung (links).

## SCHÄDEL EINER ECHOORTENDEN FLEDERMAUS



PATRICIA I. WYNN



Diese hochauflösende Röntgenaufnahme vom Inneren des Schädels der fossilen Fledermaus *Hassianycteris* zeigt ihre vergrößerte Hörschnecke (Cochlea) – Hinweis darauf, dass das Tier zur Echoortung in der Lage war. Forscher fragten sich lange, ob sich bei Fledermäusen zuerst die Echoortung oder das Fliegen entwickelte. Doch ebenso wie *Hassianycteris* zeigen auch alle anderen fossilen Fledermäuse, die vor 2008 bekannt waren, anatomische Merkmale für beide Fähigkeiten.

den freien Rand dieser Membran. Indem sie ihre Arme, Finger, Beine und Sporne bewegen, können Fledertiere ihre Flügelposition endlos variieren. Vor allem deshalb sind sie so exzellente Flieger.

Die meisten dieser Flugwesen beherrschen zudem die Kunst der Echoortung. Dazu stoßen sie hochfrequente Laute aus und analysieren deren Echos. So können diese zumeist nachtaktiven Tiere Hindernisse und Beutetiere besser aufspüren als allein mit ihrem Gesichtssinn. (Auch Fledermäuse können sehen.) Über 85 Prozent der heute lebenden Fledertierarten, nämlich alle Fledermäuse, navigieren mit Echoortung. Die übrigen gehören zu den nur in der Alten Welt lebenden Flughunden. Diese haben offenbar die Fähigkeit zur Echoortung verloren. Sie verlassen sich fast ausschließlich auf ihren Gesicht- und Geruchssinn, um ihre aus Früchten und Blüten bestehende Nahrung aufzuspüren. Lediglich manche Flughunde der Gattung *Rousettus* nutzen eine primitive Form von Echoortung.

Fledermäuse, die das können, haben einen charakteristischen Komplex anatomischer, neurologischer und verhaltensbiologischer Merkmale, der es ihnen erlaubt, hochfrequente Laute auszusenden und zu empfangen. Drei Schädelknochen sind dafür in besonderer Weise modifiziert (siehe Bild oben, links). Der

erste bildet eine lange, schlanke Knochenspange. Diese verbindet die Schädelbasis mit dem Kehlkopf. Bei den meisten echoortenden Fledermäusen läuft die Knochenspange am oberen Ende in eine paddelförmige Verbreiterung aus, die eine festere Verankerung ermöglicht. Die beiden anderen Knochen befinden sich im Ohr und könnten an die Echoortung angepasst sein. Schall nehmen alle Säuger über eine Kette von Gehörknöchelchen wahr, die die Schwingungen vom Trommelfell zum flüssigkeitsgefüllten Innenohr übertragen. Der Hammer ist der erste Knochen dieser Kette; bei den echoortenden Fledermäusen hat er einen großen, knollenförmigen Vorsprung, den Orbicularfortsatz. Er hilft, die Vibrationen im Knochen zu steuern. Über die Gehörknöchelchen erreichen die Töne das Innenohr, wo sie auf eine gewundene, mit Flüssigkeit gefüllte Hörschnecke treffen, die Cochlea (lateinisch für »Schnecke«). Fledermäuse haben im Vergleich zu anderen Säugern eine relativ große Cochlea. Damit können sie hochfrequenten Schall besser wahrnehmen und die Töne präziser voneinander unterscheiden.

In den 1940er Jahren entdeckten Biologen, dass die Flügeltiere mit Hilfe von Lauten »sehen« können. Damit wurde deutlich, dass die Echoortung zu dem großen evolutionären Erfolg und zur Vielfalt der Fledermäuse wesent-



MIT FÜLLGEM. VON JÜRGE HARBERSZETTER, FORSCHUNGSINSTITUT SENCKENBERG



lich beigetragen haben muss. Doch welche der beiden Schlüsselanpassungen – Flugfähigkeit und Echoortung – kam zuerst? Warum und wie entstanden sie im Lauf der Evolution? In den 1990er Jahren gab es dazu drei konkurrierende Hypothesen.

Der Flug-zuerst-Hypothese zufolge entwickelten Vorfahren der Fledermäuse den aktiven Flug, um ihre Mobilität zu verbessern sowie bei der Nahrungssuche Zeit und Energie zu sparen. Diesem Szenario entsprechend entstand die Echoortung später und half den ursprünglichen Fledermäusen, Beute aufzuspüren und bereits im Flug zu jagen.

Die Echoortung-zuerst-Hypothese geht demgegenüber von gleitfliegenden »Vorläuferfledermäusen« aus. Diese hätten fliegende Beute von ihren Beobachtungsposten in den Bäumen aus gejagt und dabei Echoortung eingesetzt, um die Beute schon aus größerer Distanz aufspüren zu können. Demzufolge wäre der aktive Flug erst später entstanden, um die Manövrierfähigkeit zu verbessern und die Rückkehr zum Ausgangspunkt zu erleichtern.

### Suche nach dem Missing Link

Die Tandem-Entwicklungshypothese nimmt dagegen an, dass sich Flugfähigkeit und Echoortung parallel entwickelten. Diese Vorstellung basiert auf experimentellen Hinweisen, wonach es für ruhende Fledermäuse energetisch sehr aufwändig ist, ihre Echoortungsrufe auszustoßen.

Im Flug sind die Energiekosten dagegen fast zu vernachlässigen, weil dann die Kontraktion der Flugmuskeln ohnehin dazu beiträgt, die Lunge zu füllen, und somit automatisch auch den Luftstrom erzeugt, der für intensive, hochfrequente Laute notwendig ist.

Die einzige Möglichkeit, um zwischen diesen Hypothesen zu entscheiden, besteht darin, das Auftreten der damit verbundenen Merkmale – spezialisierte Flügel oder vergrößerte Hörschnecken – im Stammbaum der Fledertiere nachzuverfolgen, um ihr erstes Erscheinen im Lauf der Evolution zu bestimmen. In den 1990er Jahren waren noch keine Fossilien bekannt, die ausschließlich diese Schlüsselmerkmale gehabt hätten.

Fledermausfossilien sind äußerst selten. Ursprüngliche Fledermäuse waren ebenso wie ihre modernen Verwandten kleine, zarte Geschöpfe. Sie besiedelten vorwiegend tropische Lebensräume, in denen die Verwesung besonders schnell einsetzt. Es gibt im Prinzip nur eine Möglichkeit, wie eine Fledermaus zum Fossil werden kann: Sie stirbt an einem Ort, an dem sie rasch von einer Sedimentschicht bedeckt wird, die sie sowohl vor Aasfressern als auch vor Mikroben schützt.

Bis vor Kurzem war die 52,5 Millionen Jahre alte *Icaronycteris index* die älteste und ursprünglichste bekannte Fledermaus. Benannt ist sie nach der mythologischen Figur des Ikarus, der mit seinen aus Wachs und Federn gebastelten Flügeln entgegen der Warnung seines Vaters Daedalus beim Probeflug der Sonne zu nahe kam. Diese Art wurde in den 1960er Jahren in den versteinerten Ablagerungen eines Sees der Green River Formation in Wyoming entdeckt. Die feinkörnigen Ton- und Kalksteine enthalten daneben auch bestens konservierte fossile Fische sowie verschiedene Insekten, Krokodile und Vögel.

Vier Jahrzehnte lang stützten wir unsere Kenntnisse für die früheste Phase der Fledermausevolution auf *Icaronycteris*. Das Bemerkenswerteste an ihr jedoch ist – Ironie des Schicksals –, wie sehr dieses Wesen der Urzeit heutigen Fledermäusen gleicht. Die Form ihrer Zähne etwa lässt darauf schließen, dass auch *Icaronycteris* wie die meisten Fledermäuse heute Insekten fraß.

Die Proportionen ihrer Gliedmaßen sind gleichermaßen modern: lange, schlanke Finger, verlängerte Unterarme und verkleinerte Hintergliedmaßen. Schulterblätter, Brustbein und Brustkorb bezeugen ebenfalls ein voll entwickeltes Flugvermögen. Außerdem besaß sie die anatomischen Voraussetzungen für die Echoortung.

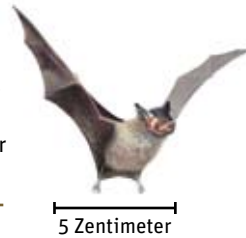
Und tatsächlich: Lebte diese Art heute, wäre sie auf den ersten Blick kaum von anderen Fledermäusen zu unterscheiden. Ihr wichtigstes Kennzeichen ist eine winzige Krallen am zweiten Finger (beim Menschen wäre dies der Zeigefinger, englisch *index finger*, daher der Arname). Heutige Fledermäuse haben im Gegensatz zu den meisten Flughunden nur am Daumen eine Krallen. Die Spitzen der anderen vier Finger sind zu dünnen, rutenförmigen Strukturen reduziert, die vollständig in die Flügelmembran eingebettet sind. Der Aufbau des zweiten Fingers von *Icaronycteris* scheint ein Überbleibsel von einem vierfüßigen Vorfahren zu sein.

Im Rückblick betrachtet hatte diese Art nie viel von einem Missing Link. Ein anderes fossiles Fledertier aus der Green River Formation scheint dafür weit passender: *Onychonycteris*. Die beiden bekannten Exemplare hatten private Sammler ausgegraben und später für wissenschaftliche Studien zur Verfügung gestellt. Sie wurden in derselben Gesteinsschicht wie *Icaronycteris* entdeckt und dürften deshalb aus ähnlicher Zeit stammen. *Onychonycteris* weist jedoch eine Kombination aus archaischen und modernen Merkmalen

## FLEDERTIER-EXTREME

### Die Kleinste

*Craseonycteris thonglongyai*, die Hummel- oder Schweinsnasenfledermaus, wiegt nur zwei Gramm.



### Der Größte

*Pteropus vampyrus*, der Kalong-Flughund, hat eine Flügelspannweite von fast zwei Metern.



### Das Lauteste

*Noctilio leporinus*, das Große Hasenmaul, erzeugt einen Ultraschallschrei, der mehr als 140 Dezibel erreichen kann. Das ist lauter als bei einem Rockkonzert in Lautsprechernähe.

### Die Geselligste

*Tadarida brasiliensis*, die Guano-Fledermaus, bildet Kolonien aus Millionen von Artgenossen. Die Bracken-Höhle bei Austin in Texas beherbergt 20 Millionen dieser Fledermäuse – die größte bekannte Fledermauskolonie.



### Die mit der längsten Zunge

Mit ihren 8,5 Zentimetern ist die Zunge der neotropischen Blatt Nase *Anoura fistulata* um rund 50 Prozent länger als der Körper. Sie saugt Nektar des Glockenblumengewächses *Centropogon nigricans* und ist dessen einziger bekannter Bestäuber.

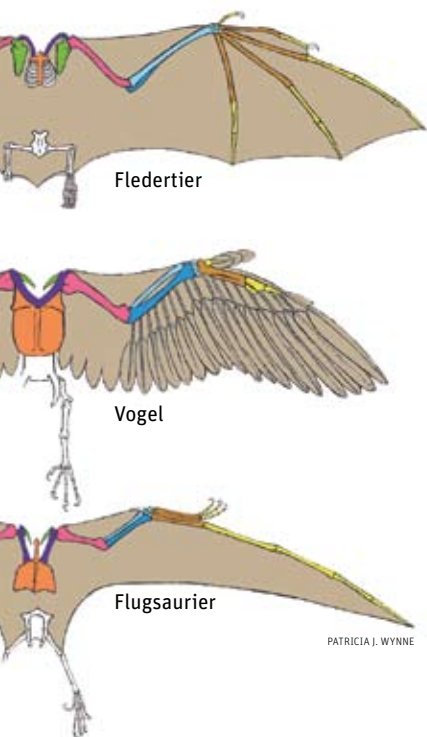
ILLUSTRATIONEN: LILA RUBENSTEIN, A. FISTULATA: NATHAN RUCHHALA UND RUBEN COOPER



MIT FRDL. GEN. DES AMNH UND ANIKA HEBS, FORSCHUNGSINSTITUT SENCKENBERG

## EIN FALL VON VIELFLIEGERN

Unter den Wirbeltieren entwickelte sich unabhängig voneinander in drei getrennten Linien das Fliegen: in Fledertieren, Vögeln und Flugsauriern. Deren Flügel gleichen sich nur äußerlich; im Aufbau sind sie sehr verschieden. Bei Fledertieren sind der Unterarm und die zweiten bis fünften Finger verlängert und bilden das wichtigste Gerüst zum Spannen der Flughaut. Dagegen werden die Federn des Vogelflügels vor allem von den Unterarm- und Handknochen getragen. Die Flughaut eines Flugsauriers schließlich spannt sich überwiegend über die Mittelhandknochen und dem extrem langen vierten Finger.



PATRICIA J. WYNNE

**Missing Link:** Die kürzlich entdeckte Art *Onychonycteris finneyi* – die ursprünglichste bekannte Fledermaus – schließt die Lücke zwischen modernen Fledertieren und vierfüßigen Säugern. Merkmale wie die stark verlängerten Finger sowie die Form von Brustkorb und Schulter belegen, dass *Onychonycteris* aktiv fliegen konnte. Doch hat sie noch relativ lange Hintergliedmaßen und Krallen an allen fünf Fingern – Überbleibsel von ihren nicht fliegenden Vorfahren. Dieser Art fehlen außerdem Merkmale, die mit der Echoortung in Verbindung stehen, was zeigt, dass Fledertiere ihre Flugfähigkeit vorher entwickelt haben mussten.

auf und ist damit praktisch genau der Vertreter eines Übergangsstadiums, auf den Evolutionsbiologen lange gehofft hatten.

Ich hatte das große Glück, Leiterin des Teams zu sein, die die Art *Onychonycteris finneyi* beschrieb und benannte. Wir wählten den Namen (griechisch für Krallenfledermaus), weil das Fossil, ebenso wie seine vierfüßigen Vorfahren, an allen fünf Fingern Krallen aufweist. Die Existenz dieser Krallen ist nicht das einzige Merkmal von *Onychonycte-*

*ris*, das an flugunfähige Säugetiere erinnert. Die meisten Fledertiere haben sehr lange Unterarme und vergleichsweise kleine Beine. Die Art *Onychonycteris* jedoch besitzt relativ zu anderen Fledertieren kürzere Unterarme und längere Beine.

Verglichen mit anderen Säugetieren nehmen die Gliedmaßen von *Onychonycteris* eine Zwischenstellung ein. Sie liegen zwischen denen aller bisher bekannten rezenter und fossilen Fledertiere (einschließlich *Icaronycteris*) und denen baumbewohnender Säuger, wie Faultiere oder Gibbons, deren Vordergliedmaßen wichtig für ihre Fortbewegung sind. Die Baumbewohner hangeln sich von Ast zu Ast. Die Fledertiere könnten also von baumbewohnenden Vorfahren abstammen, die sich auf ähnliche Weise fortbewegten.

Trotz dieser primitiven Merkmale ihrer Gliedmaßen belegen andere anatomische Ausprägungen von *Onychonycteris*, dass sie ein aktiver Flieger gewesen sein muss. Ihre langen Finger waren in Flughäute eingebettet, und die stabilen Schlüsselbeine haben die Vordergliedmaßen sicher verankert. Am versteiften Brustkorb mit dem kielförmigen Brustbein

dürften große Flugmuskeln angesetzt haben. An den deutlich fassettenreichen Schulterblättern waren offenbar weitere, speziell für ein ausdauerndes Flugvermögen erforderliche Muskeln verankert.

Die Proportionen ihrer Arm- und Fingerknochen erlauben Rückschlüsse auf den Flugstil von *Onychonycteris*. Ihre Flügel hatten eher kurze Spitzen, sie sind auch insgesamt gedrungen und breit. Unter den heutigen Fledertieren haben nur Mausschwanzfledermäuse vergleichbare Flügel. Diese Fledermäuse haben einen ungewöhnlich gleitend-flatternden Flugstil, mit kurzen Gleit- zwischen längeren Flatterphasen. Wir vermuten, dass *Onychonycteris* ganz ähnlich flog. Vielleicht bildete ihr Gleit-Flatter-Flug eine Übergangsstufe zwischen dem Gleiten der Fledertiervorfahren und dem kontinuierlichen Flügelschlag der meisten modernen Fledertiere.

Die Art *Onychonycteris finneyi* enthüllt nicht nur, wie ihre frühen Vorfahren flogen, sondern liefert uns außerdem einige wichtige Fakten zur Klärung der alten Streitfrage, ab wann Flugfähigkeit und Echoortung in der Stammesentwicklung auftauchten. Im Gegensatz zu anderen bekannten Fledermäusen aus dem Eozän, also der Epoche vor 55,8 Millionen bis 33,5 Millionen Jahren, scheint

## Im Eozän dürften Fledermäuse nur wenige Konkurrenten bei dem reichen Nahrungsangebot gehabt haben

*Onychonycteris* noch keines der drei knöchernen Merkmale für die Echoortung besessen zu haben. Das von uns wissenschaftlich bearbeitete Fossil besitzt eine kleine Hörschnecke sowie einen relativ kleinen Vorsprung am Hammer; der Knochenspanne, die den Kehlkopf befestigt, fehlt eine breite Verankerung. Gliedmaßen und Brustkorb zeigen jedoch eindeutig, dass diese Fledermaus fliegen konnte. *Onychonycteris* scheint deshalb ein Stadium der frühen Fledertierevolution zu repräsentieren, in dem die Tiere zwar schon fliegen konnten, aber noch nicht über eine Echoortung verfügten. Fossilien haben also unsere wichtigste Frage beantwortet: Flugfähigkeit kam zuerst, Echoortung später.

Der Erwerb dieser beiden Eigenschaften machte den Weg frei für eine glanzvolle adaptive Radiation der Fledertiere: eine rasante Phase der Auffächerung in viele spezialisierte Arten, wie sie nach einer bahnbrechenden Anpassung häufig vorkommt. Die heute lebenden Fledertiere werden in 19 Familien eingeteilt; ausgestorbene und nur fossil bekannte Fledertiere bilden weitere sechs Familien. Bemerkenswerterweise zeigen Studien, in denen

das zeitliche Auftreten von DNA-Sequenzen mehrerer Gene kalibriert wurde, dass alle diese 25 Familien bereits am Ende des Eozäns voneinander zu unterscheiden waren. Ein solcher Big Bang der Diversifikation ist in der Geschichte der Säugetiere ohnegleichen.

Flugfähigkeit und Echoortung waren jedoch zweifellos nicht die einzigen Faktoren, die zu der Radiation beigetragen haben. Der Ursprung dieser Hauptlinien der Fledertiere verlief offenbar parallel zum Anstieg der jährlichen Durchschnittstemperaturen, außerdem diversifizierten sich zugleich Pflanzen und ganz besonders die Insekten.

Ein fliegender Jäger konnte sich also an einem ansehnlichen Insektenbuffet bedienen, das von fliegenden Käfern über Köcherfliegen und Schaben bis hin zu winzigen Nachtfaltern reiche Auswahl bot. Und da sie damals zusammen mit Eulen und Nachtschwalben die einzigen flugfähigen nachtaktiven Jägern waren, hatten sie nur wenige Konkurrenten, die ihnen die reichen Ressourcen eozäner Nächte streitig machten.

Fossilien aus der Grube Messel bei Darmstadt bieten uns einen Einblick in diese frühe Mannigfaltigkeit. Obwohl mit 47 Millionen Jahren kaum jünger als die Fledermäuse der Green River Formation, sind sie viel artenreicher. Seitdem die wissenschaftlichen Ausgrabungen dort in den 1970er Jahren begannen, wurden in Messel sieben Fledermausarten entdeckt: jeweils zwei Arten *Archaeonycteris*, zwei *Palaeochiropteryx*, zwei *Hassianycteris* sowie *Tachypteron franzeni*, der älteste bekannte vollständige Fund der Glattnasen-Freischwänze (Emballonuridae), einer Fledermausfamilie, die auch heute noch existiert.

Es ist nicht schwer zu erkennen, warum die Messeler Fledermäuse prosperierten. Das Klima im Eozän war mild, es gab mehrere Seen, umgeben von üppigem subtropischem Wald. Der Häufigkeit ihrer fossilen Überreste zufolge lebte dort eine Vielzahl fliegender, laufender und Wasser bewohnender Insektenarten.

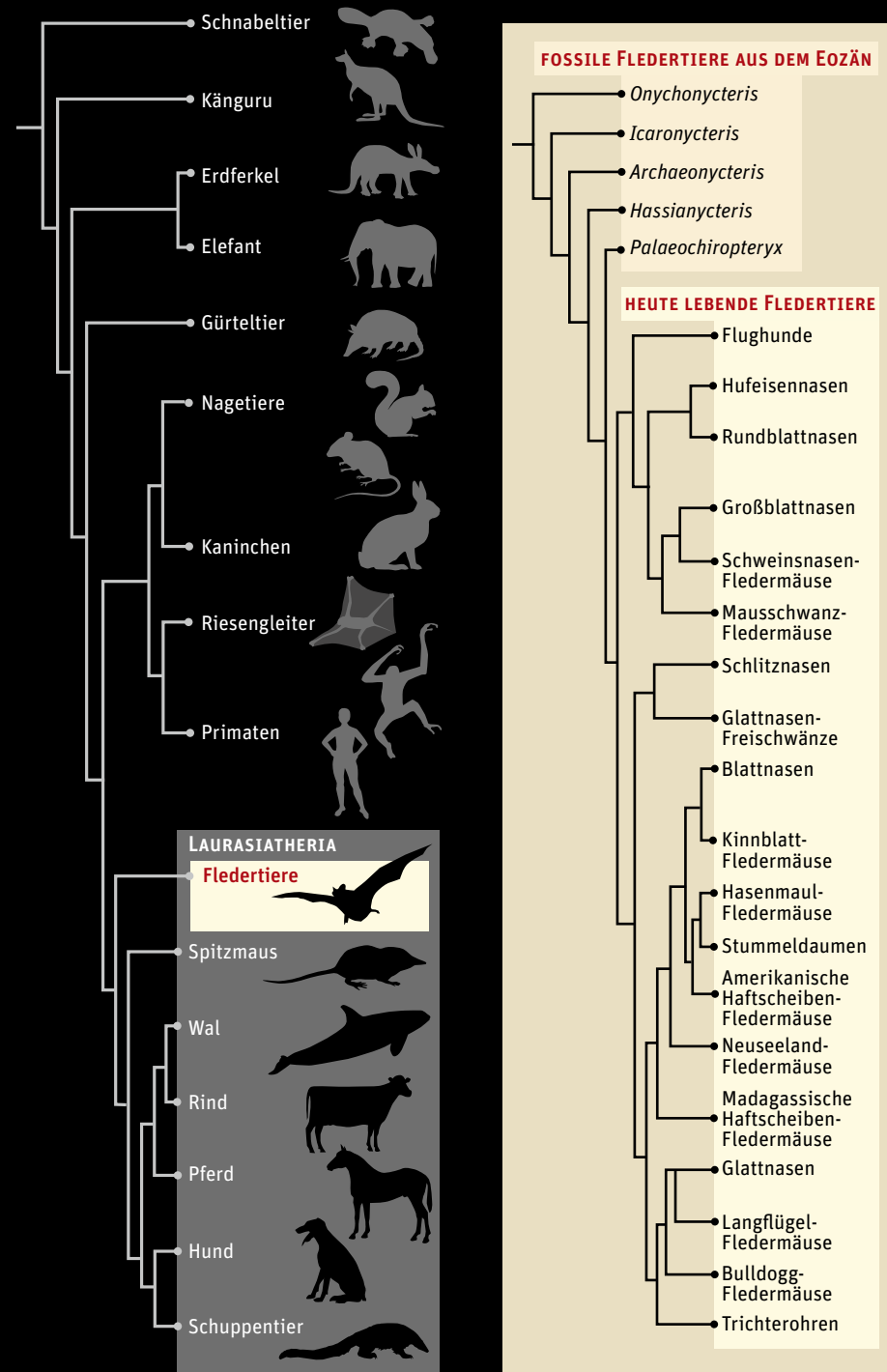
Die Fledermäuse der Grube Messel ernährten sich von diesen Beutetieren. Alle sieben Arten waren insektivor, aber jede hatte sich auf bestimmte Insekten spezialisiert; das verrät der gut erhaltene Mageninhalt. Während *Palaeochiropteryx* offenbar kleine Nachtfalter und Köcherfliegen jagte, scheint *Hassianycteris* größere Falter und Käfer bevorzugt zu haben. *Archaeonycteris* andererseits fraß wohl nur Käfer. Von *Tachypteron* ist kein Mageninhalt überliefert, doch wissen wir auf Grund ihres Gebisses, dass auch diese Fledermausart Insekten jagte.

## DER PLATZ DER FLEDERTIERE IN DER EVOLUTION

**Früher vermuteten Biologen**, die Fledertiere seien eng verwandt mit einer Gruppe kleiner, Insekten fressender Säugetiere, zu denen die Spitzmäuse gehören. Alternativ hielten es die Forscher für möglich, sie stünden Primaten und deren Anverwandten nahe – wie etwa den Riesengleitern. Neue genetische Analysen legen jedoch nahe, dass Fledertiere einer Gruppe von Säugetieren angehören, die als Laurasiatheria bezeichnet wird (Kasten unten).

Diese Gruppe umfasst unter den heute lebenden Tieren Hunde, Wale, Rinder und manche Insektenfresser. Die nächsten Verwandten der Fledertiere dürften Laurasiatheria sein, die ausgestorben sind. Um diese aufzuspüren, müssen Forscher Fossilien zu Tage fördern, die dem Ursprung der Fledertiere noch näher sind als *Onychonycteris*.

JEN CHRISTIANSEN



## VARIATIONEN ALLERORTEN

**Moderne Fledertiere sind eine kunterbunte Bande:** Hinsichtlich Körpergröße, Flügelform, Schädelform und Gebiss unterscheiden sie sich gewaltig. Diese morphologischen Unterschiede spiegeln die unterschiedliche Ernährung und ihre jeweiligen Lebensräume wider.



Insekten fressende Fledermäuse wie *Eptesicus fuscus* haben zumeist lange Schnauzen und Zähne mit großen ineinandergreifenden Zacken, mit denen sie ihre Beute durchstechen und zerschneiden.

*Vampyrum spectrum* und andere Fleisch fressende Fledermäuse sind größer als die meisten ihrer Insekten fressenden Verwandten, ihre Zähne ähneln sich jedoch. Zumeist haben sie kurze und breite Flügel, bestens geeignet, um beim Jagdflug nahe um Hindernisse zu navigieren. Als Jäger sind sie zwar weit verbreitet, aber nur mit kleinen Populationen.



Früchte fressende Fledertiere wie die Weiße Fledermaus *Ectophylla alba* haben oft kürzere Gesichtsschädel und einfachere Backenzähne als ihre Insekten oder Fleisch fressende Verwandtschaft. Doch zum Greifen von Früchten besitzen auch sie große Eckzähne.

Vampirfledermäuse wie dieser *Desmodus rotundus* haben rasiermesserscharfe Zähne, mit denen sie der Haut ihrer Beute winzige Schnitte zufügen, um das Blut aufzulecken. Vampire sind gute Flieger. Ungewöhnlich für Fledermäuse sind ihre langen Daumen und kräftigen Beine, mit deren Hilfe sie sich ihren Opfern eher laufend als fliegend nähern.



Nektar fressende Fledermäuse – wie diese Blütenfledermaus *Glossophaga soricina* – besitzen einfache Zähne und lange Schnauzen, die in Blüten hineinpassen. Ähnlich wie Ameisenbären haben sie lange, dehnbare Zungen. Die Zungenspitze mancher Arten ist mit borstenartigen Papillen bedeckt, mit denen die Tiere Nektar vom Grund röhrenförmiger Blüten aufnehmen. Mit ihren kurzen, kräftigen Flügeln können viele der Nektar fressende Fledermäuse an den Blüten auf der Stelle schweben.

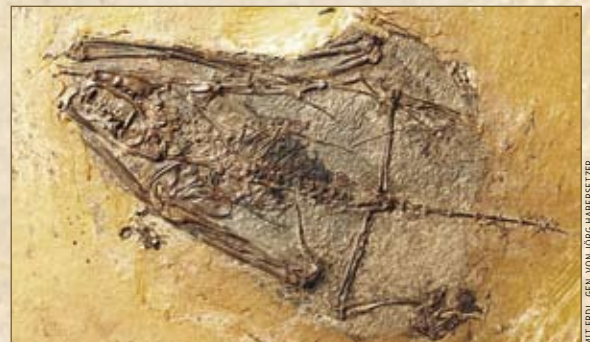
**Die Vielfalt moderner Fledertiere** könnte sehr alte Wurzeln haben. Fossilien aus der Grube Messel bei Darmstadt belegen, dass Fledermäuse bereits vor 47 Millionen Jahren begonnen haben, sich auf bestimmte Typen von Beuteinsekten zu spezialisieren. Bei manchen dieser Messeler Fledermäuse ist der Mageninhalt erhalten und erlaubt eindeutige Rückschlüsse auf die Nahrung. Wo Fledermäuse Beute suchten, ist weniger gesichert; Größe und Form ihrer Flügel geben darauf aber immerhin einige Hinweise.



*Palaeochiropteryx* fraß kleine Nachtfalter und Köcherfliegen. Mit ihrem kleinen Körper und ihren kurzen Flügeln jagte diese Fledermaus wahrscheinlich direkt über dem Boden in Pflanzennähe; sie könnte ein Ansitzjäger gewesen sein und Insekten im langsamen Flug erbeutet haben.



*Archaeonycteris* tat sich an Käfern gütlich. Diese kurzflügelige Fledermaus jagte wahrscheinlich ebenso wie *Palaeochiropteryx* nahe der Vegetation. Sie könnte jedoch darauf spezialisiert gewesen sein, Beute von Oberflächen einzusammeln, statt sie in der Luft zu fangen.



*Hassianycteris* jagte größere Nachtfalter und Käfer. Sie ist die größte in Messel gefundene Fledermaus, hatte schmale Flügel, konnte wahrscheinlich schnell fliegen und jagte ihre Beute an Seen und über Baumwipfeln.

Wovon aber ernährten sich nun *Onychonycteris* und *Icaronycteris*? Für eine eindeutige Antwort fehlt uns leider der Mageninhalt. Analysieren wir aber die Form der Zähne und berücksichtigen die zahllosen Insektenfossilien in den Gesteinen der Green River Formation, dann würden wir ebenso auf Insekten setzen.

Auch heute leben die meisten Fledermausarten von Insekten. Erst später in der Evolutionsgeschichte begannen einige Arten zudem Fleisch, Fische, Früchte, Nektar und Pollen zu fressen oder sogar Blut zu lecken.

Die bislang in Messel und der Green River Formation geborgenen Fossilien haben entscheidend dazu beigetragen, dass Forscher die Entwicklung der Fledertiere rekonstruieren konnten. Noch fehlen uns allerdings Fossilien, welche die Abstammung der Fledertiere von den Säugetieren belegen. Die baumbewohnenden Riesengleiter, also heutige gleitfliegende plazentale Säugetiere, ähneln Fledertieren so sehr, dass man sie lange Zeit für deren nahe Verwandte hielt.

Mark S. Springer von der University of California in Riverside und andere Forscher haben in den letzten Jahren eine Vielzahl von Säugetierarten in ihre DNA-Analysen mit einbezogen. Dabei zeigte sich, dass Fledermäuse nicht eng mit den Säugetiergruppen verwandt sind, zu denen Gleitflieger, Riesengleiter und Flughörnchen gehören. (Unabhängig von verwandtschaftlichen Beziehungen bieten sich diese Lebewesen als unverzichtbare Modelle dafür an, wie die Gliedmaßen der Fledertiervorfahren aufgebaut waren.)

Stattdessen lassen sie sich einer alten Stammeslinie zuordnen, die Laurasiatheria genannt wird (siehe Kasten S. 54). Zu anderen modernen Mitgliedern dieser Gruppe zählen so grundverschiedene Vertreter wie Raubtiere, Huftiere, Wale, Schuppentiere, Spitzmäuse, Igel und Maulwürfe. Die urtümlichsten Vertreter aber waren wahrscheinlich maus- oder hörnchengroße vierfüßige Säuger, die von Insekten lebten. Man nimmt an, dass die Laurasiatheria wahrscheinlich in der späten Kreidezeit vor etwa 65 bis 70 Millionen Jahren auf dem alten Superkontinent Laurasia entstanden sind, zu dem die heutigen Kontinente Nordamerika und Eurasien gehörten. Die genaue Stellung der Fledertiere in dieser Gruppe ist noch unklar. Zweifellos trennt ein beträchtliches Maß evolutionären Wandels *Onychonycteris* und andere Fledertiere von ihren vierfüßigen Vorläufern.

Einige Stufen dieser Entwicklung von flugunfähigen Landbewohnern zu aktiven Fliegern könnten überraschend schnell eingetreten sein – das legen jedenfalls neue Entdeckungen auf dem Gebiet der Entwicklungs-



genetik nahe. Obwohl die Finger von *Onychonycteris* für ein Fledertier eher kurz sind, sind sie im Vergleich zu anderen Säugern extrem lang.

Wie könnte diese Längenzunahme entstanden sein? Karen Sears, heute an der University of Illinois, und ihre Kollegen berichteten 2006, der Schlüssel zur Antwort liege womöglich in der Aktivität von Genen, die während der Individualentwicklung das Längenwachstum der Finger kontrollieren. Eine bestimmte Proteinklasse, so genannte BMPs (*bone morphogenetic proteins*; morphogenetische Proteine der Knochen), spielt dabei eine entscheidende Rolle.

Es ist möglich, dass eine kleine Änderung derjenigen Gene, die auch die BMPs regulieren, für längere Fledermausfingerknochen verantwortlich ist, sowohl für die Individualentwicklung als auch evolutiv. Falls das stimmt, könnte es erklären, warum fossil überlieferte Zwischenformen fehlen, die eine Zwischenposition oder eine Art Missing Link zwischen kurzfingerigen, flugunfähigen Säugern einerseits sowie langfingerigen Fledertieren wie *Onychonycteris* und *Icaronycteris* andererseits einnehmen. Dieser evolutionäre Übergang könnte sehr schnell eingetreten sein – mit nur wenigen oder gar keinen Übergangsformen. Forscher wollen wissen,

- wann die Linie der Fledertiere sich von anderen der Laurasiatheria trennte, und
- zu welchen Anteilen die frühe Evolution und Diversifikation jeweils auf den nördlichen beziehungsweise auf den südlichen Kontinenten stattfand.

Um die Fragen zu klären, benötigen wir Fossilien, die dem Ursprung der Fledertiere noch näher sind als *Onychonycteris*. Mit etwas Glück werden Paläontologen bei ihren Grabungen einmal auf solche Exemplare stoßen. Das würde uns helfen, diese und weitere Rätsel über den Ursprung der faszinierenden Tiere zu lösen. ◀



**Nancy B. Simmons** leitet die Abteilung für Zoologie der Wirbeltiere und ist Kuratorin der Abteilung für Säugetierkunde des American Museum of Natural History in New York. Ihr Spezialgebiet ist die Anatomie fossiler und lebender Fledertiere. In südamerikanischen Regenwäldern hat sie umfangreiche Freilandforschungen durchgeführt.

**Dietz, C. et al.:** Handbuch der Fledermäuse Europas und Nordwestafrikas: Biologie, Kennzeichen, Gefährdung. Kosmos, Stuttgart 2007.

**Habersetzer, J. et al.:** Die Evolution des Fluges und der Echoortung. In: Biologie in unserer Zeit 4(38), S. 246–253, 2008.

**Neuweiler, G.:** The Biology of Bats. Oxford University Press, 2000.

**Simmons, N. B. et al.:** Primitive Early Eocene Bat from Wyoming and the Evolution of Flight and Echolocation. In: Nature 451, S. 818–821, 14. Februar 2008.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/1002939](http://www.spektrum.de/artikel/1002939).

# WIE HAT SICH DIE MENSCHHEIT AUSGEBREITET



Über Erbgutvergleiche können Forscher nachvollziehen, wie sich der Mensch schrittweise über viele Jahrtausende von Afrika aus über die ganze Erde verbreitete. Die größte genetische Vielfalt herrscht tatsächlich in Afrika, die kleinste bei den indigenen Amerikanern.

Von Gary Stix

## In Kürze

- ▶ **Prähistorischer Wanderungen von Menschengruppen** lassen sich nicht nur aus Fossilien und Artefakten erschließen. **DNA-Vergleiche heutiger Bevölkerungen** zeigen manche Wege und Einzelheiten der Verbreitung viel genauer. Inzwischen nutzen Populationsgenetiker dazu auch komplette Genome.
- ▶ Außer Verwandtschaftsbeziehungen zwischen menschlichen Populationen klären die genetischen Analysen auch das Alter von **Bevölkerungen verschiedener Regionen**. Es gibt schon Landkarten der Verbreitungswege über die ganze Welt, die sich auf DNA-Vergleiche stützen.
- ▶ Zudem weisen **Genvergleiche** auf, wie sich Menschen an ein neues Klima, andere Nahrung und Krankheitsgefahren anpassten.

**E**ine Brücke über den Bab el-Mandeb, das »Tor der Tränen« der Sklavenzzeit, möchte ein Bauunternehmen eines Halbbruders von Osama Bin Laden errichten. Die 26 Kilometer breite Meerenge zwischen Arabien und Afrika verbindet das Rote Meer mit dem Golf von Aden. Künftig würden dann Pilger aus Afrika hoch über der denkwürdigsten Route der Menschheitsgeschichte nach Mekka ziehen. Wahrscheinlich passierten Afrikaner diese Stelle schon vor 50 000 oder 60 000 Jahren – allerdings ohne Rückkehr. Es mögen ein paar hundert oder tausend Menschen gewesen sein, die Arabien damals vermutlich in kleinen Booten erreichten.

Warum sie zu dem Zeitpunkt ihre ostafrikanische Heimat verließen, wissen wir nicht genau. Das Klima könnte sich verschlechtert haben, oder der alte Lebensraum bot nicht mehr genug Nahrung aus dem Meer. Fest steht aber, dass diese afrikanischen Auswanderer anthropologisch gesehen – in Körperbau, Verhalten, Hirngröße und Sprachfähigkeit – moderne Menschen waren wie wir. Bald zogen einige von ihnen noch weiter. Im Lauf von Jahrtausenden durchquerten Nachfahren ganze Kontinente, gingen über Landbrücken, erreichten Australien, Europa, Amerika und sogar Feuerland.

Knochenfossilien und Artefakte wie Speerspitzen erzählen bereits viel über die Verbreitungswege und den zeitlichen Ablauf dieser Migrationen. Doch letztlich liefern

die raren Funde der Anthropologie und Paläoarchäologie vielfach kein komplettes Bild vom Geschehen. Darum versuchen seit nunmehr 20 Jahren Populationsgenetiker, die Lücken mit ihren Methoden zu füllen. Sie zeichnen unsere Verbreitungsgeschichte anhand von DNA-Spuren in heutigen Bevölkerungen nach, die von den damals eingeschlagenen Routen zeugen.

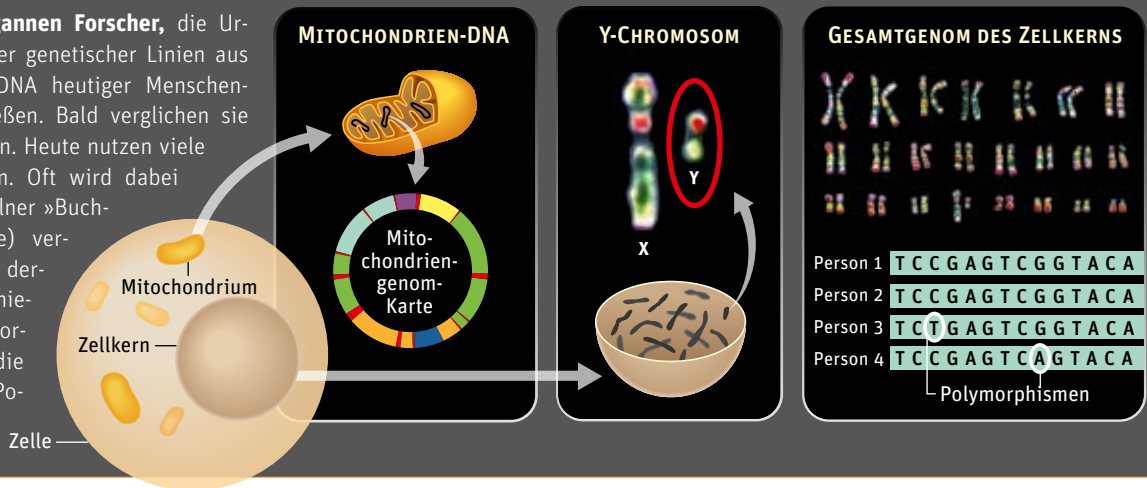
Das Erbgut aller heutigen Menschen ist zum allergrößten Teil identisch. Von den drei Milliarden »Buchstaben« – Nukleotiden – unserer DNA stimmen 99,9 Prozent überein. Doch in dem restlichen Promille steckt gewissermaßen die Verbreitungsgeschichte der Menschheit. Ein genetischer Vergleich von Ostafrikanern und Indianern kann darüber Auskunft geben, woher die Menschen kamen und wohin sie gingen. Bis vor ein paar Jahren griffen die Genetiker für solche Rekonstruktionen nur auf die Teile der DNA zurück, die allein von Vater zu Sohn – durch das Y-Chromosom – oder nur von der Mutter an ihre Kinder – mit den Mitochondrien – weitergegeben werden. (Letztere sind Zellorganellen mit eigener DNA, die nur mit der Eizelle vererbt werden.) Inzwischen beziehen die Forscher auch das übrige Erbgut ein. Sie vergleichen nun Varianten in Hunderttausenden von Nukleotidsequenzen, die sich über das gesamte Genom verteilen.

**Umfangreiche DNA-Vergleiche erhellen die Ausbreitungsroueten in der Frühzeit des modernen Menschen.**



GENSEQUENZEN IM VERGLEICH

Vor 20 Jahren begannen Forscher, die Ursprünge menschlicher genetischer Linien aus der Mitochondrien-DNA heutiger Menschengruppen zu erschließen. Bald verglichen sie auch Y-Chromosomen. Heute nutzen viele das gesamte Genom. Oft wird dabei der Austausch einzelner »Buchstaben« (Nukleotide) verglichen. Wenn an derselben Stelle verschiedene Nukleotide vorkommen, sprechen die Forscher von einem Polymorphismus.



Solche genomweiten Analysen liefern von den prähistorischen Wanderrouten Karten mit bisher nicht gekannter Genauigkeit. Auch bestätigen sie die inzwischen weithin akzeptierte These, dass der moderne Mensch in Afrika entstand. Die neuen Daten zeigen die hohe genetische Vielfalt der dortigen Menschen, von deren Genpool offenbar nur kleinere Teile in die übrige Welt gelangten. Den ältesten Ast des genetischen Stammbaums der Menschheit repräsentieren die Buschmänner, die jüngsten Zweige bilden die südamerikanischen Indios sowie die Pazifikvölker.

Im Grunde begann die Erforschung der genetischen Variabilität des Menschen im Ersten Weltkrieg. Damals entdeckten Ärzte in Thessaloniki, dass bestimmte Blutgruppen bei Soldaten aus verschiedenen Ländern unterschiedlich häufig auftraten. Entscheidende Impulse für genetische Vergleichsstudien menschlicher Bevölkerungen gab seit den 1950er Jahren der italienische, zuletzt in Stanford lehrende Genetiker Luigi Luca Cavalli-Sforza. Unter anderem zog er Blutgruppenproteine vieler indigener Völker heran, um genetische Verteilungsmuster bei verschiedenen Populationen zu bestimmen und hieraus zusammen mit anderen Daten, etwa zur Sprachverwandtschaft, die Herkunft menschlicher Populationen zu erschließen (siehe SdW 1/1992, S. 90).

Im Jahr 1987 erschien dann die aufsehenerregende Arbeit von Rebecca L. Cann und Allan C. Wilson von der University of California in Berkeley. Sie hatten Abschnitte der Mitochondrien-DNA vieler Menschen miteinander verglichen und kamen zu dem Schluss, dass wir alle von derselben Frau abstammen, einer Afrikanerin, die vor ungefähr 200 000 Jahren lebte. Seither kursiert die Schlagzeile von der »mitochondrialen Eva« – die im Übrigen natürlich

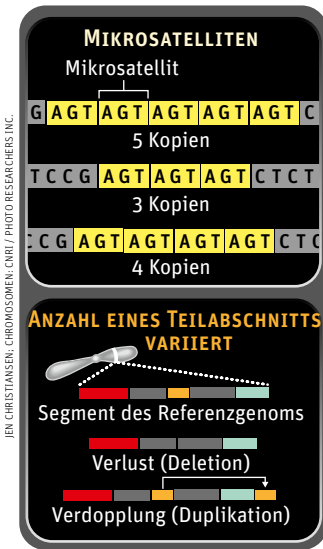
nicht die erste und damals einzige Frau war; vielmehr sagt der Befund, dass nur die – später vielfach aufgesplante – Linie ihrer Nachfahren heute noch existiert (SdW 6/1992, S. 72).

Cann und Wilson machten sich »neutrale« Mutationen in der Mitochondrien-DNA zu Nutze. Zeitlich offenbar recht regelmäßig pflegen einzelne DNA-Bausteine in bestimmten Abschnitten gelegentlich zu wechseln, ohne dass es Auswirkungen auf den Organismus hätte. Dieses Faktum verwenden die Forscher als so genannte molekulare Uhr: Aus den Mustern und der Anzahl solcher Mutationen, die sich über viele Generationen ansammeln, erschließen sie, wie eng oder entfernt verwandt Populationen miteinander sind. Vor allem können sie auch feststellen, wann sich zwei Linien trennten. Sie errechnen also einen Stammbaum der heutigen Menschengruppen, dessen verschieden alte Äste erkennen lassen, wann und auf welchen Routen der moderne *Homo sapiens* die einzelnen Regionen der Welt besiedelte.

Karten von Verbreitungsrouten

Vergleiche an Y-Chromosomen brachten noch genauere und breitere Erkenntnisse. Dieses Chromosom enthält viele Millionen Nukleotide, das Mitochondriengenom dagegen nur 16 000.

Wichtig für die Vergleiche sind so genannte genetische Marker, also charakteristische DNA-Abschnitte (Varianten), die einzelne Abstammungslinien kennzeichnen und somit auch die Verbreitungswege des modernen Menschen sichtbar machen. Die Routen und Wegverzweigungen lassen sich verdeutlichen, wenn man die Äste und Zweige solch eines Stammbaums aus Markern wie ein Straßennetz über den Globus legt. Die verschiedenen



Wichtig für die DNA-Vergleiche sind genetische Marker, also für einzelne Populationen typische Mutationsmuster. Dazu zählen Mikrosatelliten – kurze, unterschiedlich oft wiederholte Sequenzen (oben) – oder auch Variationen einzelner Teile eines längeren Abschnitts. Sie können fehlen oder mehrfach vorkommen (unten).



Marker erhalten dabei Nummern. (Genauer gesagt wird analysiert, wo die einzelnen Marker heute vorkommen und wie sie nacheinander in den diversen Linien entstanden sein müssen.)

Zum Beispiel zeigt das Bild unten die Historie des Y-Chromosoms, also praktisch die Verwandtschaft und Abstammung in den männlichen Linien – wie etwa die Herkunft der amerikanischen Ureinwohner: Die ersten Ankömmlinge aus Afrika in Arabien besaßen offenbar einen Marker (M), der die Nummer M168 erhielt. Das wäre der Name für den Weg über den Bab el-Mandeb. Eine Gruppe (Linie), die sich dann nach Norden wandte und die Arabische Halbinsel durchquerte, trug den Marker M89. Einige jener Menschen bogen schließlich von diesem Weg nach Osten ab und zogen nach Mesopotamien und noch weiter. Das war praktisch die Route M9. Danach ging es nördlich vom Hindukusch auf der M45 sozusagen links ab nach Norden. In Sibirien zweigte die M242 rechts ab und führte schließlich bis nach Alaska, das damals mit Asien durch eine Landbrücke verbunden war. Und noch später wanderten Amerikaner auf der M3 bis nach Feuerland.

Wie viel sich Experten weiterhin von solchen Analysen der Mitochondrien und der Y-Chromosomen versprechen, zeigt das so ge-

nannte geografische Projekt, ein weltweites, privat mit 40 Millionen Dollar finanziertes Gemeinschaftsvorhaben der amerikanischen National Geographic Society, von IBM und der Waitt Family Foundation. Unter Leitung des amerikanischen Anthropologen Spencer Wells teilen sich zehn Forschungsstätten in verschiedenen Ländern die Aufgabe, von 100 000 Ureinwohnern DNA-Proben zu sammeln und zu analysieren (Kasten S. 65). »Es geht um die Details des Ausbreitungsverlaufs«, kommentiert Wells. So kam heraus, dass die Khoisan, Buschleute in Südafrika, offenbar 100 000 Jahre lang von anderen Menschen genetisch isoliert waren. Und ein Ergebnis zur jüngeren Geschichte: Der Genpool libanesischer Männer lässt sich in Teilen bis zu den Kreuzrittern sowie bis zu den Muslimen von der Arabischen Halbinsel zurückverfolgen.

Allerdings stimmen die Ergebnisse der Paläogenetiker nicht immer mit denen der Paläontologen überein. So liefern Isotopenmessungen an Fossilien unter Umständen ein anderes Alter als die DNA-Vergleiche – ganz abgesehen davon, dass die Mutationsraten verschiedener Bereiche des Erbguts mitunter voneinander abweichen. Deswegen würden viele Anthropologen und Paläoarchäologen gerne alle Abstammungslinien, die sich genetisch ergaben, mit Fossilfunden und Artefakten bele-



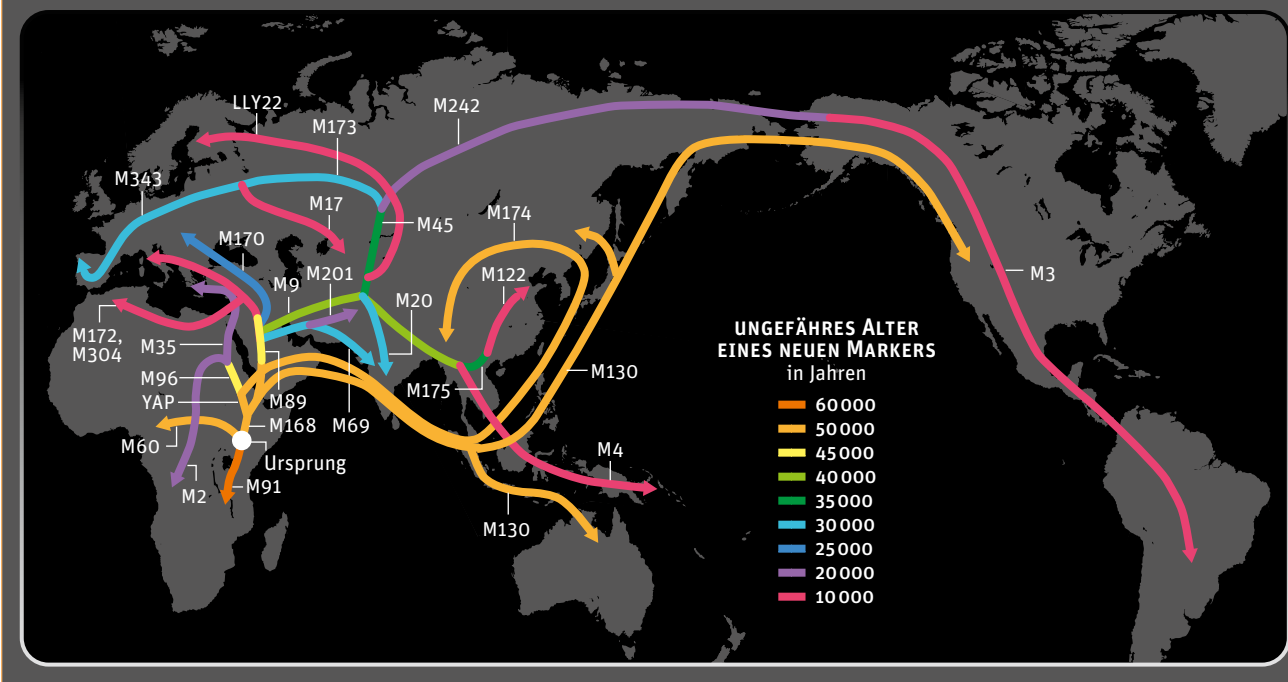
Das Magenbakterium *Helicobacter pylori* blieb dem Menschen treu. Seine DNA besagt, dass es vor ungefähr 55 000 Jahren mit ihm Afrika verließ und dass die südamerikanischen Indianer aus Ostasien kamen.

PHOTO RESEARCHERS / P. HAWTIN

## WANDERROUTEN DES Y-CHROMOSOMS

Diese Ausbreitungskarte für das Y-Chromosom erschlossen Populationsgenetiker aus genetischen Markern (M), die in verschiedenen Regionen typischerweise auftreten. Jede Nummer

bezeichnet eine Evolutionslinie und zugleich eine Wanderroute. Auch die seit einer Abzweigung verstrichene Zeit lässt sich bestimmen.



JEN CHRISTIANSEN, NACH: NATIONAL GEOGRAPHIC MAPS

gen. Leider aber sind passende Funde allzu selten und die Überreste oft nur fragmentarisch. Beispielsweise lässt sich an Mitochondrien und Y-Chromosomen recht gut rekonstruieren, wie die erste Route von Afrika nach Australien verlief. Unter anderem halfen dabei DNA-Proben von den Andamanen im Indischen Ozean. Doch Funde aus der Vorzeit hierzu gibt es so gut wie nicht.

Darum lassen sich viele Detailfragen letztlich nur durch noch mehr Erbgutvergleiche klären – wobei die DNA nicht einmal immer menschlich sein muss. Manch interessante Hinweise auf unsere frühe Geschichte liefern auch Viren, Mikroorganismen oder Parasiten, etwa Läuse oder Magenbakterien. Die haben sich mit dem Menschen verbreitet und ebenfalls verändert.

Vor allem aber nutzen die Populationsgenetiker jetzt neuere Ansätze, um ganze Genome im Detail miteinander zu vergleichen. Diese Verfahren erwuchsen insbesondere aus dem Humangenomprojekt, bei dem die DNA des Menschen fast komplett entziffert wurde. Der Anthropologe Tim Weaver von der University of California in Davis meint dazu: »Die statistische Aussagekraft steigt natürlich, wenn man seine Hypothesen an ganz vielen Stellen des Genoms für möglichst viele Personen aus möglichst vielen Bevölkerungen überprüft.«

Seit die Forscher nun eine große Anzahl so genannter Polymorphismen – variabler genetischer Abschnitte (siehe Bilder S. 60) – des drei Milliarden Nukleotide umfassenden menschlichen Genoms gleichzeitig untersuchen können, gelingen umwälzende Entdeckungen. Im Februar 2009 erschienen in den Fachzeitschriften »Science« und »Nature« zwei Artikel zu den bislang umfangreichsten dieser Studien (Kasten S. 64). Die beiden Teams analysierten jeweils mehr als eine halbe Million Polymorphismen, bei denen einzelne Nukleotide (DNA-Bausteine) ausgetauscht sind – fachlich SNPs (*single nucleotide polymorphisms*). Sie benutzen dazu DNA aus dem Human Genome Diversity Panel, einer Sammlung von Zelllinien von rund 1000 Individuen aus 51 Populationen, die am Centre d'Etude du Polymorphisme Humain (Forschungszentrum für Humanpolymorphismen) in Paris archiviert sind.

Diese Datenflut durchforsteten die Forscher auf mehreren Ebenen. So verglichen sie direkt den Austausch einzelner Nukleotide bei weit voneinander entfernten Populationen. Außerdem fahndeten sie nach Haplotypen: DNA-Abschnitte mit einer größeren Anzahl der gleichen ausgetauschten Nukleotide, die über viele Generationen als Block weitervererbt werden. Die »Nature«-Autoren suchten auch in langen

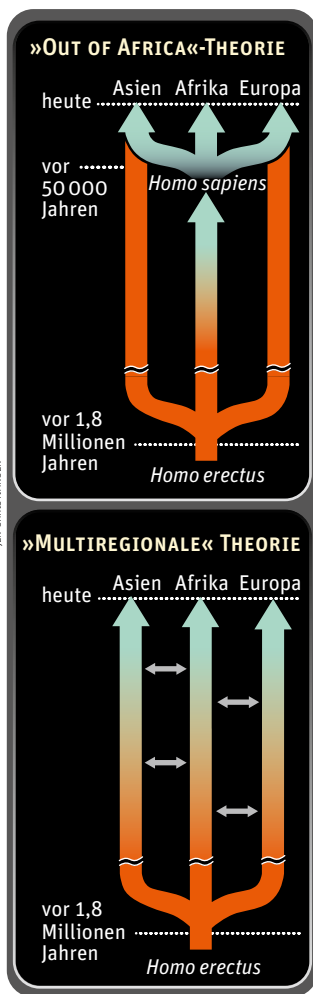
DNA-Abschnitten – von bis zu einer Million Nukleotiden –, ob darin irgendwelche Sequenzen mehrfach vorkommen oder verschwunden sind. Auch solche Muster eignen sich als Marker. Noah A. Rosenberg von der University von Michigan in Ann Arbor erläutert: »Jedes Genomstück hat seine eigene Geschichte. Die muss nicht die Vergangenheit des gesamten Genoms spiegeln. Aber wenn man viele Abschnitte zugleich betrachtet, am besten tausende Marker, erhält man ein recht passables Bild der prähistorischen Ausbreitung.«

**Ausgedünnte Variabilität**

Durch Analyse hunderttausender SNPs gelang es, eine Reihe von Bevölkerungsgruppen genetisch zu charakterisieren und engere Beziehungen von Populationen zueinander zu erkennen, auch dann, wenn diese heute weit voneinander entfernt leben. So lässt sich die Herkunft der südamerikanischen Ureinwohner bis zu den sibirischen Yakuten und einigen anderen asiatischen Stämmen zurückverfolgen. Die Basken sind mit einem kaukasischen Volk eng verwandt, die Han-Chinesen gliedern sich in Wirklichkeit in eine nördliche und eine südliche Population. Die Beduinen ähneln genetisch Volksgruppen aus Europa, Pakistan und dem Mittleren Osten.

Die neuen Ergebnisse passen sowohl mit Befunden aus Anthropologie, Archäologie, Linguistik und Biologie zusammen als auch mit den Daten von Mitochondrien und Y-Chromosomen. Zudem stützen sie die These, dass der moderne Mensch aus Afrika stammt. Danach verließ einst eine kleine Anzahl anatomisch moderner Menschen Afrika. Die neue Population wuchs heran, irgendwann zog ein Teil weiter, und so fort. Auf diese Weise besiedelte der moderne *Homo sapiens* Schritt für Schritt die ganze bewohnbare Welt. Archaische Menschen – der *Homo erectus* und die Neandertaler – verschwanden, wohl ohne sich mit ihm zu vermischen oder zumindest genetisch bei ihm merkbare Spuren zu hinterlassen.

Nach den neuen Analysen nahm jede kleine Teilgruppe, die weiterzog, von der Genomvielfalt ihrer Herkunftspopulation jeweils nur einen Teil mit. Schon die ersten Auswanderer repräsentierten genetisch lediglich eine kleine Fraktion der afrikanischen Stammgruppe. Im Lauf der Jahrtausende – und mit der Länge des zurückgelegten Wegs – dünnte dann die genetische Vielfalt in den Linien immer mehr aus. Auch daran lassen sich die Verbreitungsrouten gut verfolgen. So erklärt sich, wieso die indigene Bevölkerung in Amerika eine so deutlich geringere genetische Vielfalt aufweist als die in Afrika: Als letzte Kontinente besiedelte die Menschheit eben Amerika.



Nach der heute vorherrschenden Ansicht entstand der moderne Mensch in Afrika und verbreitete sich erst später über die Welt (oben). Früher glaubten viele Anthropologen, der *Homo sapiens* habe sich auf mehreren Kontinenten aus dem *Homo erectus* entwickelt (unten).

Für die These vom afrikanischen Ursprung der heutigen Menschheit spricht inzwischen so viel, dass nur noch wenige Anthropologen eine abweichende Ansicht vertreten. Bevor die ersten populationsgenetischen Studien erschienen, glaubten viele Forscher noch, dass der *Homo sapiens* im Verlauf von 1,8 Millionen Jahren gleichzeitig auf mehreren Erdteilen aus den jeweils regionalen archaischen Menschen hervorgegangen war. Getrennte moderne Menschenarten seien in Afrika, Europa und Asien nur deswegen nicht entstanden, weil sich die Populationen zuweilen vermischt.

Auch wenn an solchen Thesen nur noch die wenigsten festhalten – folgenreiche Kontakte des *Homo sapiens* mit archaischen Menschen möchten manche Wissenschaftler nicht ausschließen. Dazu gehören Vinayak Eswaran vom Indian Institute of Technology in Kanpur (Indien), Henry C. Harpending und Alan A. Rogers von der University of Utah in Salt Lake City. Sie führten vor ein paar Jahren an vorliegenden genetischen Daten Simulationen durch und überprüften die statistischen Verfahren. Ihres Erachtens spricht manches dafür, dass sich die modernen Gruppen mit archaischen Arten wie *Homo erectus* durchaus ausgiebig vermischt haben könnten. Sogar bis zu 80 Prozent unseres Genoms könnten demnach mit deren Erbgut in Berührung gekommen sein. Wieso sehen Genetiker davon heute aber so wenig? Harpending stellt sich vor, dass die Neuankömmlinge teils vorteilhaftere Gene trugen, die etwa die Geburt erleichterten. Selektionsbedingt seien mit der Zeit die Spuren mancher der archaischen Erbanlagen wieder verschwunden. »Nach außen hin wirkt das dann, als stünde die Population den Überbringern dieser Gene näher als in Wahrheit.«

### Fremde Gene in uns?

Zündstoff für solche Dispute liefern zum einen bestimmte Fossilien vom *Homo sapiens*, die einzelnen Experten zufolge in ein paar Details an ältere Menschenarten erinnern. Zum anderen wollen sich verschiedene genetische Einzelheiten bei heutigen Menschen in das klare Bild von unserer afrikanischen Herkunft nicht recht fügen. Und zwar erscheinen einige der genetischen Varianten als deutlich älter, als sie es sein dürften, wenn wir alle wirklich allein von einer homogenen Gruppe abstammen, die vor höchstens 200 000 Jahren lebte. Hat sich da vielleicht doch Genmaterial einer heute ausgestorbenen archaischen Menschenform eingekreuzt? Nach einer Arbeit von 2006 von Bruce T. Lahn und seinem Team von der University of Chicago weist eine Version des *Microcephalin*-Gens einen Haplotyp auf, den moderne Menschen vor 40 000



FOTO: EL SIDRON RESEARCH TEAM; NEANDERTALER: JAY H. MATTERNES

Bei Ausgrabungen von Neandertalerfossilien in der El-Sidrón-Höhle in Spanien tragen die Forscher eine Reinstraumausrüstung. Sie dürfen das Fundmaterial auf keinen Fall mit ihrer eigenen DNA verunreinigen.



Jahren von Neandertalern übernommen haben könnten. Dieses Gen bestimmt die Hirngröße mit.

Vielleicht erfahren wir schon demnächst mehr. Gespannt warten viele auf die Entzifferung und Analyse des Neandertalergenoms – ein Kooperationsprojekt des Max-Planck-Instituts für evolutionäre Anthropologie in Leipzig unter Svante Pääbo und der Firma 454 Life Sciences in Branford (Connecticut). Eine erste Version, die gut 60 Prozent des Genoms umfasste, haben die Forscher im Februar 2009 schon vorgelegt. Allerdings fanden sie bisher keine Anzeichen für eine Einkreuzung.

Bei der Handhabung von uralter DNA gilt es – was sehr schwer ist und die Forscher schon manches Mal täuschte –, unbedingt jegliche Verunreinigungen mit heutigem menschlichem Erbgut zu vermeiden. Das gelingt nur mit Reinraumverfahren. Heute benutzen Anthropologen möglichst schon beim Bergen solcher Fossilien komplette Schutzanzüge. Pääbos Team markiert die Fragmente vom Neandertalergenom vor der weiteren Bearbeitung inzwischen auch mit speziellen kurzen Erkennungssequenzen.

Nach früheren Schätzungen dürfte das Erbgut vom Neandertaler und das von modernen Menschen zu etwa 99,5 Prozent übereinstimmen. Der DNA-Vergleich mit unserem nächsten Vetter verspricht auch Aufschluss über Besonderheiten in unserer eigenen Evolution, so etwa über die Selektion spezieller Merkmale. »Die Neandertaler bieten einzigartige Möglichkeiten, mehr von unserer eigenen Evolu-

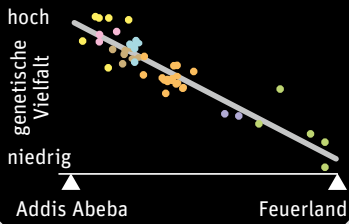
### WAS DAS TELEFONBUCH VERRÄT

Viele Männer in Nordwestengland mit Nachnamen, die dort schon vor 400 Jahren gebräuchlich waren, haben offenbar skandinavische Vorfahren. Dies stellte Mark A. Jobling von der University of Leicester (England) beim Vergleich ihrer Y-Chromosomen fest. Das Erbe der Wikinger scheint sich durchzuprägen.

GENOM-GESCHICHTEN

**Umfassende Vergleiche der Genome** vieler Menschen liefern spannende Erkenntnisse über Verwandtschaft und genetische Vielfalt. Hier zwei global angelegte Arbeiten:

Je weiter die Entfernung von Äthiopien, desto geringer die genetische Vielfalt – hier gemessen an Haplotypen (DNA-Sequenzen mit denselben ausgetauschten Buchstaben).

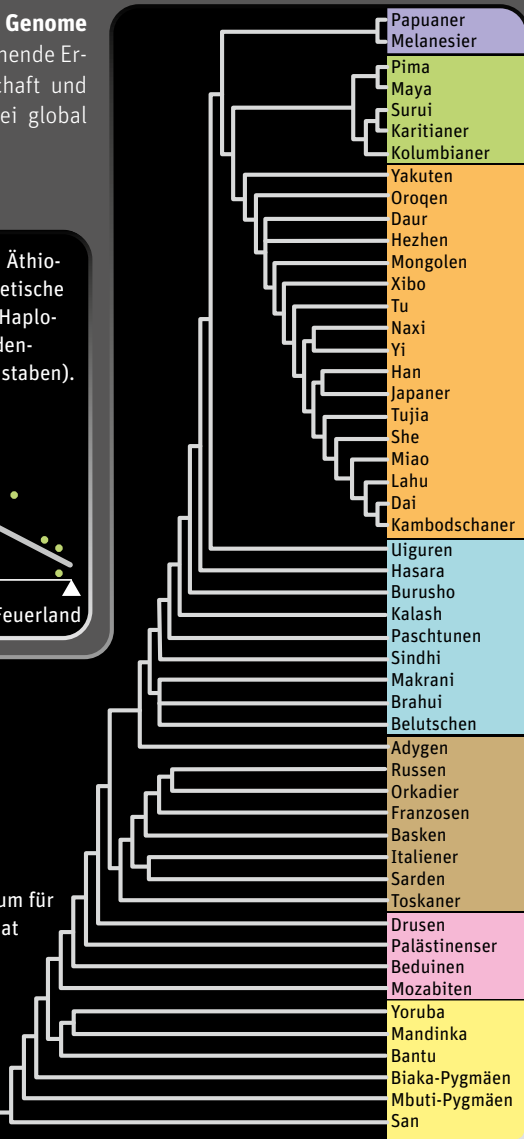


**GEOGRAFISCHE REGION**

- Ozeanien
- Nord- und Südamerika
- Ostasien
- Zentral- und Südasien
- Europa
- Mittlerer Osten
- Afrika

Dieser genetische Stammbaum für heutige Menschengruppen hat afrikanische Wurzeln.

gemeinsamer Vorfahre



Diese Karte stellt häufige Haplotypen in verschiedenen Farben dar. Die Vielfalt ist in Afrika am größten, in Amerika am geringsten. Auch kommen manche der Haplotypen nur in Afrika vor, unser aller Ursprungskontinent.



tion zu erfahren«, kommentiert Pääbo. »Sie sind unsere nächsten Verwandten. Technisch ist das Vorgehen zwar schwierig, doch wir haben zu ihrem Genom Zugang. Bei anderen Menschengruppen der Urzeit wird das kaum möglich sein.« Nach bisherigen Befunden unterscheidet sich das Y-Chromosom des Neandertalers klar von dem des modernen Menschen. »Bei keinem heutigen Menschen sieht es so aus wie beim Neandertaler«, betont Pääbo. Gleiches hatten die Forscher schon früher für das Mitochondriengenom festgestellt. Erst kürzlich gab das Team überdies bekannt, dass die Zahl der Neandertaler nur klein gewesen sein dürfte. Das schließen die Wissenschaftler aus der geringen genetischen Vielfalt der untersuchten Mitochondriengenome mehrerer Individuen aus verschiedenen Regionen des Verbreitungsgebiets.

Doch fand sich im Zellkerngenom bei Neandertalern aus Spanien auch eine Übereinstimmung: Sie besaßen dieselbe Variante des Gens *FOXP2* wie wir. Diese Erbanlage wirkt bei uns an der Ausbildung von Sprachfähigkeit mit. Nun ist die Frage: Trugen die Neandertaler dieses Gen schon immer? Oder hatten sie es durch Paarung mit modernen Menschen erworben? Oder waren nur die Proben verunreinigt?

In der »Nature«-Ausgabe vom Februar 2008 findet sich auch ein Artikel über genetische Anpassungen und andere Mutationen bei den modernen Menschen, nachdem sie Afrika verlassen hatten. Die Forscher dieser Studie hatten von 20 Amerikanern europäischer und 15 afrikanischer Abstammung 40 000 SNPs verglichen. Bei den Personen mit europäischen Vorfahren tauchten mehr ungünstige – potenziell schädliche – Versionen auf. Über spezifische gesundheitliche Auswirkungen wollten die Autoren zwar nicht spekulieren, doch zeigt ihr Befund den Preis einer geringeren genetischen Vielfalt. Carlos D. Bustamante von der Cornell University in Ithaca (New York) spricht von dem »populationsgenetischen Echo« der Besiedlung Europas. Seiner Ansicht nach waren die ersten modernen Menschen in Europa so gering an Zahl und genetisch so wenig vielfältig, dass sich anfangs vorhandene nachteilige Mutationen in der anwachsenden Bevölkerung gut verbreiten konnten. Gleiches mag für neu hinzugekommene Mutationen gegolten haben. Die Zeit bis heute war zu kurz, als dass die ungünstigen Varianten wieder hätten verschwinden können.

Andererseits lassen genomübergreifende Studien zunehmend auch vorteilhafte Neuanpassungen erkennen, die das Leben in den neu besiedelten Gebieten erleichterten, sei es bald nach der Ankunft in Eurasien oder teils

JEN CHRISTIANSEN, NACH: JUN Z. LIE ET AL., WORLDWIDE HUMAN RELATIONSHIPS INFERRED FROM GENOME-WIDE PATTERNS OF VARIATION, SCIENCE, 2008, RD. 319

MARTIN SOAVE, UNIVERSITY OF MICHIGAN

## BITTE EIN WENIG DNA

In den Anfangszeiten der weltweiten DNA-Vergleichsstudien am Menschen peilten die Forscher ein Genominventar für 400 Populationen an, wobei jeweils 25 nicht miteinander verwandte Personen genetisches Material beisteuern sollten. Dieses Projekt scheiterte an der Finanzierung, aber auch am Widerstand indigener Bevölkerungen, die darin Biopiraterie witterten, etwa Ausbeutung durch Medikamentenpatente. 5000 Populationen wäre heute das Wunschziel der Populationsgenetiker.

Mittlerweile existiert in Paris das Human Genome Diversity Panel. Dort lagern immerhin Zellen von über 1000 Menschen aus mehr als 50 Populationen. Diese Sammlung stammt aus diversen Forschungsprojekten.

Das jüngere geografische Projekt visiert 100 000 Genome an. Auch dieses Vorhaben stößt bei indigenen Gruppen auf Vorbehalte, insbesondere in Amerika – trotz klarer Zusicherungen,



NATIONAL GEOGRAPHIC / DAVID EVANS

Im Tschad nimmt Spencer Wells für das geografische Projekt einen Abstrich von der Mundschleimhaut.

dass das Material nicht medizinisch verwendet wird. Ob die Genetiker die Vielfalt der Menschheit jemals voll und in allen Nuancen erfassen können, ist zweifelhaft.

auch viel später, etwa als Landwirtschaft aufkam (siehe SdW Spezial 1/2009, S. 52). Die Forscher nutzen dazu gern den *International HapMap* genannten Katalog von Haplotypen (den das International Haplotype Map Consortium bereitstellt) mit darin enthaltenen 3,9 Millionen SNPs. Es handelt sich um Haplotypen von Menschen in Nigeria, China und Japan sowie von Nordamerikanern mit Vorfahren aus Nordwesteuropa.

### »Rassen gibt es nicht«

Eine der Arbeiten, an der Henry Harpending mitwirkte, zeigte, dass sich unsere Evolution in den letzten 40 000 Jahren offenbar beschleunigte, denn die Rate genetischer Veränderungen stieg. Einer anderen Studie zufolge, die Pardis C. Sabeti vom Broad Institute in Cambridge (Massachusetts) und ihre Kollegen durchführten, greifen Selektionsprozesse auch heutzutage an hunderten Regionen des Genoms an. Solche Neuanpassungen an veränderte Umweltbedingungen reichen von Krankheitsresistenzen bis zu Hautfarbe, Behaarung und Schweißproduktion.

Ein weiteres solches Projekt leitete Lluís Quintana-Murci vom Pasteur-Institut in Paris. Die Forscher fanden für 580 Gene jeweils unterschiedliche Selektionsbedingungen in den im HapMap-Katalog erfassten Populationen. Manche dieser Erbanlagen spielen bei Diabetes, Fettsucht oder Bluthochdruck eine Rolle. Vielleicht hilft dies, die verschiedenen Verteilungsmuster mancher Krankheitsbilder zu erklären. Auch könnten solche Befunde neue Ansätze zur Medikamentenentwicklung bieten.

Forschungen zur Ausbreitungsgeschichte der Menschheit und zu unserer genetischen Vielfalt werfen natürlich schnell die alten Fra-

gen nach Rassen, Ethnien und deren genetischen Grundlagen auf. Was würde es bedeuten, wenn sich eine mit kognitiven Fähigkeiten assoziierte Genvariante fände, die zudem bei Europäern häufiger vorkäme als bei Afrikanern? Vor allem müssten wir begreifen, dass ein einzelnes Gen allein keinesfalls über die Intelligenz bestimmt, und uns vor voreiligen Schlüssen hüten (siehe SdW 7/2009, S. 74).

Aus genetischer Sicht würden Beschreibungen wie »Asiate« oder »Chinesen« von feineren Unterteilungen abgelöst. Zum Beispiel erweisen die Genomstudien, dass die nördlichen und südlichen Han-Chinesen zwei recht unterschiedliche Gruppen darstellen. »Rassen gibt es nicht«, betont Quintana-Murci. »Genetisch existieren nur geografische Gradienten. Deswegen besteht auch keine scharfe Abgrenzung etwa zwischen Europäern und Asiaten. Nirgends zwischen Irland und Japan tritt eine klare genetische Trennlinie auf, hinter der etwas plötzlich ganz anders ist.«

Die Reise der vergleichenden Genomforschung durch unsere Evolutionsgeschichte hat erst begonnen. Das Streben nach großen Datenmengen, noch leistungsfähigeren Computern und besseren Analysemethoden hört nicht auf. Anfang 2008 kündigte ein internationales Konsortium das 1000-Genome-Projekt an: Das Erbgut von 1000 Menschen aus unterschiedlichsten Regionen soll sequenziert und verglichen werden. Erste Ergebnisse sind schon zugänglich. Riesenvorhaben wie dieses, das vielleicht schon in zwei oder drei Jahren abgeschlossen sein wird, bieten so viele zuverlässige Daten, dass die Forscher inzwischen immer realistischere Modelle der menschlichen Evolution entwerfen und testen können. Vielleicht werden wir bald genauer wissen, wer wir sind und woher wir kommen. ◀



Gary Stix arbeitet in der Redaktion von »Scientific American«.

**DeSalle, R., Tattersall, I.:** Human Origins: What Bones and Genomes Tell Us about Ourselves. Texas A&M University Press, 2008.

»Evolution des Menschen II«, Spektrum-Dossier 1/2004.

**Weaver, T. D., Roseman, C. C.:** New Developments in the Genetic Evidence for Modern Human Origins. In: Evolutionary Anthropology 17, S. 69–80, 22. Februar 2008.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/1002940](http://www.spektrum.de/artikel/1002940).

## Das Vermächtnis des KOPERNIKUS

Noch immer wird das kopernikanische Prinzip weithin anerkannt. Doch sein Einfluss hat nachgelassen: So mancher Kosmologe des 21. Jahrhunderts ist mittlerweile bereit, sich von ihm zu verabschieden – mit guten Gründen.

### In Kürze

- ▶ Das kopernikanische Prinzip hat seit Mitte des 20. Jahrhunderts **Karriere in der Wissenschaftsgemeinde** gemacht. Nun aber mehren sich die Zweifel der Kosmologen an seiner Gültigkeit.
- ▶ Während sie seine geometrische Aussage, dass sich die Erde an keinem ausgezeichneten Ort im Kosmos befindet, weiterhin akzeptieren, **bestreiten die Forscher** die Behauptung auch zeitlicher Homogenität.
- ▶ Überdies zeigen wissenschaftshistorische Erkenntnisse, dass Kopernikus' Weltmodell weniger eine kosmische »Abwertung« der Menschheit mit sich brachte, sondern einst **sogar als erhebend empfunden** wurde.

Von Dennis R. Danielson

Im Jahr 2005 wurden im Dom von Frombork die sterblichen Überreste von Nikolaus Kopernikus (1473–1543) exhumiert – jedenfalls ging man davon aus, dass es seine waren. In Frauenburg, wie die polnische Stadt auf Deutsch heißt, hatte der große Astronom das Amt des Domherrn innegehabt und gewissermaßen nebenher ein neues kosmologisches Weltbild entworfen. Doch waren es wirklich seine Gebeine, die die polnischen Archäologen vor sich sahen? Sie wollten es genauer wissen und ließen – ohne ihre Vermutung preiszugeben – den Schädel vom kriminologischen Labor in Warschau untersuchen. Als die computergestützte Rekonstruktion des Gesichts vollendet war, zeigte sie den Kopf eines hageren, etwa 70-jährigen Mannes. So auffallend ähnelte er dem Selbstporträt Kopernikus' in jungen Jahren, dass die Forscher erklärten, es handle sich mit 97-prozentiger Wahrscheinlichkeit tatsächlich um den Astronomen – und DNA-Untersuchungen haben das inzwischen bestätigt.

Doch das Vermächtnis des Kopernikus wird nicht erst seit ein paar Jahren neu geprüft. Er gilt weithin als Begründer und Pa-

tron der modernen Naturwissenschaft – als derjenige, der fast buchstäblich die Kugel ins Rollen brachte: Anfang des 16. Jahrhunderts stellte er die Vermutung auf, dass die Erde nicht den Mittelpunkt des Universums einnehme, sondern zur Klasse der als Planeten bezeichneten Himmelskörper gehöre, welche die Sonne umkreisen. Nun aber mehren sich die Anlässe, nicht nur einen klareren Blick auf seine Gesichtszüge, sondern auch auf sein wissenschaftliches Erbe zu werfen.

Es war um die Mitte des 20. Jahrhunderts, als der britische Astronom Hermann Bondi gemeinsam mit zwei Kollegen von der University of Cambridge die Steady-State-Kosmologie entwickelte. Sie formulierten die Idee eines Universums, das zwar expandiert, aber – dank kontinuierlich neu gebildeter Materie – stets dieselbe Materiedichte aufweist. Damit verbanden die Forscher die Vorstellung, dass die Erde im Universum »keine zentrale oder in irgendeiner Weise bevorzugte Stellung« einnimmt, und Bondi prägte hierfür den Begriff des »kopernikanischen Prinzips«. Mittlerweile gilt die Steady-State-Kosmologie zwar als überholt und hat der Urknalltheorie Platz gemacht. Das kopernikanische Prinzip indessen hat sich seither weit gehend etabliert.



ALAMY / ANDREAS EHRLICH

Auch Stephen Hawking und George Ellis griffen es auf. 1973, gerade jährte sich der Geburtstag des Astronomen zum 500. Mal, argumentierten sie in ihrem Buch »The Large Scale Structure of Space-Time« (»Die großskalige Struktur der Raumzeit«) mit Hilfe des kopernikanischen Prinzips zu Gunsten der Urknalltheorie. Die Geometrie des expandierenden Universums, schreiben sie, sei (auf großen Skalen) so beschaffen, dass es in allen Richtungen gleich erscheine – unabhängig davon, wo sich der Beobachter aufhalte. So fand die kopernikanische Ablehnung des Gedankens, die Erde könne Zentralität für sich in Anspruch nehmen, auch Eingang in das kosmologische Standardmodell.

Doch Hawking und Ellis beschränkten sich nicht auf eine Beschreibung der kosmischen Geometrie. Ihrer Interpretation des kopernikanischen Prinzips haftete, so gestanden sie nämlich offen ein, auch einige Ideologie an (»some admixture of ideology«): »Seit Kopernikus' Zeiten wurden wir immer weiter abgewertet, bis wir heute nichts weiter sind als ein Planet mittlerer Größe, der um einen mittelgroßen Stern am äußeren Rand einer ziemlich durchschnittlichen Galaxie kreist, die selbst wiederum nur Teil einer lokalen Gruppe

von Galaxien ist. In der Tat sind wir so demokratisch geworden, dass wir nie behaupten würden, unsere räumliche Stellung im Universum sei *in irgendeiner Weise* ausgezeichnet« (Hervorhebung des Autors).

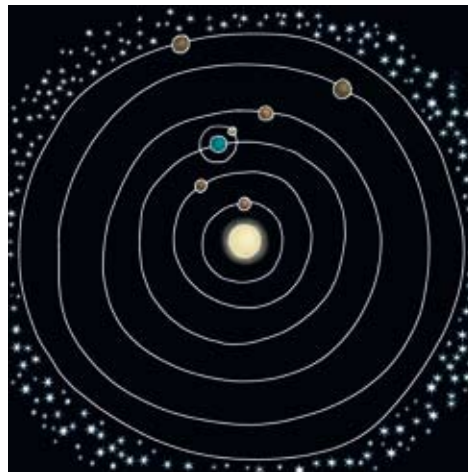
Heute allerdings haben einige Kosmologen am kopernikanischen Prinzip zu zweifeln begonnen. Die Gründe dafür liegen zum einen an unserer besseren Kenntnis seines historischen Kontextes. Zum anderen wächst aber auch die Zahl wissenschaftlicher Einwände.

Derzeit herrscht eine »pessimistische« Auslegung des Prinzips und der kopernikanischen Lehre im Allgemeinen vor. Doch die Forscher erkennen immer klarer, dass Kopernikus und seine Anhänger die »Verdrängung« der Erde aus dem Mittelpunkt des Universums keineswegs als Herabstufung empfanden. Nach Auffassung von Aristoteles, dessen physikalische Vorstellungen bis ins 17. Jahrhundert hinein das wissenschaftliche Weltbild bestimmten, ruhte die Erde allein deshalb bewegungslos im Mittelpunkt des Universums, weil sie von allen Elementen – Erde, Wasser, Luft und Feuer – das Schwerste war. Und das Zentrum des Universums war eben der Ort, wo sich die schweren Dinge sammel-

**Dieses Gemälde von 1873 schuf Jan Matejko anlässlich des 400. Geburtstags von Kopernikus. Es zeigt den Astronomen mit einem heliozentrischen Weltmodell. Rechts im Bild: ein Triquetrum oder Dreistab. Mit diesem Instrument lassen sich die Höhen von Himmelskörpern bestimmen. Im Hintergrund ist der Frauenburger Dom (heute im polnischen Frombork) zu sehen, in dem man 2005 die sterblichen Überreste des großen Forschers fand.**



Im geozentrischen Weltbild drehten sich die Planeten (zu denen auch Sonne und Mond gezählt wurden) um die Erde (links). Den Planetenbahnen waren weitere, kreisförmige Bahnen überlagert, um zu erklären, warum die Planeten zuweilen ihre Bewegungsrichtung zu verändern scheinen. Im heliozentrischen Modell hingegen (rechts) sind für diesen Effekt relative Positionsänderungen von Erde und Planeten verantwortlich.



STEPHANIE FRIESE / AMERICAN SCIENTIST

ten. Dieser Umstand, und nicht der wie auch immer privilegierte Rang der Erde, bescherte uns also letztlich eine zentrale Stellung im Weltall.

Auch die Schriftsteller des Mittelalters und der Renaissance interpretierten diese Position keineswegs als Auszeichnung. In der »Göttlichen Komödie« siedelte Dante den tiefsten Höllengrund im Zentrum der Erde und damit im Mittelpunkt des gesamten Universums an. Im Traktat »Über die Würde des Menschen« (1486) des italienischen Philosophen Giovanni Pico della Mirandola, das oft als humanistisches Manifest gerühmt wird, nahm die Erde die »kotigen und morastigen Teile der unteren Welt« ein. Und der französische Philosoph Michel de Montaigne formulierte noch 1568, ein Vierteljahrhundert nach Kopernikus' Tod, gar, der Mensch sei »an das schlechteste, lebloseste und trägste Theil dieses Ganzen, an das unterste und von dem Himmelsgewölbe am weitesten entlegene Stockwerk ... gebunden und angegelt«.

Auf einem Thron saß die Menschheit also keineswegs, eher schon galt ihre kosmische Position als Ort der Verbannung. Erst Kopernikus sorgte für eine fundamentale Änderung dieser Perspektive. Galileos 1610 erschienenes Buch »Sidereus Nuncius« (»Sternenbote«), das den ersten Bericht über eine astronomische Verwendung des Fernrohrs enthält, zeugt deutlich von der Erregung seines Verfassers angesichts der Erkenntnis, dass die Erde – als Planet – nun nicht länger vom »Reigen der Sterne« ausgeschlossen sei: »Ich werde nämlich beweisen, dass sie sich bewegt und dass sie den Mond an Glanz übertrifft, nicht aber eine Jauche aus Schmutz und Bodensatz der Welt ist.«

Die aristotelisch-ptolemäische Kosmologie hatte noch die Auffassung nahegelegt, die Erde nehme eine im doppelten Wortsinn niedere Position ein. Galileo hingegen erkannte, dass der neuen kopernikanischen Perspektive

in mehrererlei Hinsicht etwas Erhebendes, ja geradezu Anmaßendes anhaftete. Und auch der andere große Kopernikaner des frühen 17. Jahrhunderts, Johannes Kepler (1571–1630), ging von einem Aufstieg in der kosmischen Rangordnung aus. Der Mensch, für den die Erde gleichsam ein Fahrzeug sei, müsse »in diesem Fahrzeug durch die jährliche Bewegung der Erde zum Beobachten herumfahren ... Nach der Sonne aber gibt es keinen edleren und den Menschen tauglicheren Ort als die Erde. Zunächst ist sie der Zahl nach die mittlere aus den wichtigen Weltkugeln ... Über sich hat sie Mars, Jupiter und Saturn, unterhalb ihrer Laufbahn kreisen Venus, Merkur und die in Mitten aller Kreisbahnen ruhende Sonne, der Erreger aller Umläufe.« Erst als wir vom geozentrischen Weltbild Abschied genommen hatten, durften wir also tatsächlich davon ausgehen, eine optimale astronomische Position einzunehmen.

### Unerträglicher Hochmut

Heutzutage ist uns indessen eine andere Interpretation der neuen Stellung der Erde vertrauter. Sie scheint erstmals über ein Jahrhundert nach Kopernikus' Tod in Frankreich aufgetaucht zu sein. Für Cyrano de Bergerac (1619–1655) verband sich der präkopernikanische Geozentrismus – ohne dass der Schriftsteller dafür Belege anführte – mit einem unerträglichen Hochmut der Menschheit: Diese bilde sich ein, die Natur sei nur geschaffen worden, um ihr zu dienen. Großen Einfluss übte vor allem sein Landsmann Bernard le Bovier de Fontenelle (1657–1757) aus, der als wichtiger Wegbereiter der Aufklärung gilt und sich als Schriftsteller unter anderem der Popularisierung wissenschaftlicher Erkenntnisse widmete. In seinen »Entretiens sur la Pluralité des Mondes« (»Dialogen über die Mehrheit der Welten«) beglückwünscht er Kopernikus: Dieser habe die Erde aus dem Mittelpunkt der Welt geworfen und so die Eitelkeit der Menschen gebrochen, die sich selbst auf den beherrschenden Platz des Universums emporgeschwungen hätten.

Dieses gängige Bild, das man sich in der Aufklärung von Kopernikus machte, kleidete schließlich Johann Wolfgang von Goethe im Jahr 1810 in die meisterhaften Worte: »Doch unter allen Entdeckungen und Überzeugungen möchte nichts eine größere Wirkung auf den menschlichen Geist hervorgebracht haben, als die Lehre des Kopernikus«, denn diese habe die Erde gezwungen, »auf das ungeheure Vorrecht Verzicht (zu) tun, der Mittelpunkt des Universums zu sein«.

Auch heute noch vertritt eine Mehrheit von Wissenschaftlern und Lehrenden genau



Kopernikus' Gedanken zum Aufbau des Universums waren schon im frühen 16. Jahrhundert bei einigen Gelehrten in Umlauf. Seine Abhandlung »De Revolutionibus Orbium Coelestium« (»Über die Kreisbewegungen der Weltkörper«) wurde jedoch erst in seinem Todesjahr 1543 veröffentlicht. Gezeigt ist das Titelblatt der Erstausgabe.



diese pessimistische und ideologisch gefärbte Sicht auf Kopernikus. Selbst nachdenkliche Kosmologen wie Paul Davies von der Arizona State University behaupten nach wie vor, im ptolemäischen, geozentrischen Weltbild werde der Mensch unvermeidlich als »Krönung der göttlichen Schöpfung« gesehen – und folglich habe Kopernikus für unseren kosmischen Abstieg gesorgt.

Gleichwohl wird immer deutlicher, dass wir diese Auffassung nicht akzeptieren müssen. Dem Kosmologen Don Page von der University of Alberta zufolge liefert die Geschichte nämlich mehr als genügend Anhaltspunkte dafür, dass »die kopernikanische Revolution den Menschen nicht zwangsläufig von einer herausgehobenen Stellung im Zentrum des Universums verdrängt hat. Vielmehr wurde sie oft so interpretiert, dass sie die Menschheit aus den schmutzigen Niederungen des Universums gehoben und in eine himmlischere Position auf einem Planeten befördert hat.«

Das kopernikanische Prinzip, wie es seit mehr als einem halben Jahrhundert von vielen Forschern verstanden (und nur allzu gern als wissenschaftliches Faktum dargestellt) wird, scheint also einer Neubewertung zu bedürfen. Eine Reihe von Kosmologen und Astronomen, die ich dazu befragte, gaben mir allerdings überraschend vielfältige Antworten.

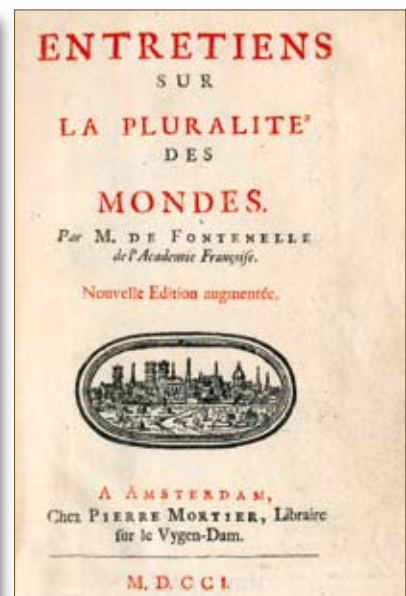
In mindestens einem Punkt scheint aber weit gehende Übereinstimmung zu bestehen. Bondi hatte nicht nur behauptet, dass das Universum für jeden Beobachter, unabhängig von seiner Position im Raum, gleich aussehe, sondern er postulierte darüber hinaus ein »perfektes kosmologisches Prinzip«. Dem zufolge biete das Universum von jedem Ort aus und zu jeder Zeit (*Hervorhebung des Autors*) den gleichen Anblick.

Diese Aussage lehnen heute die meisten Forscher ab, denn gegen die nicht nur räumliche, sondern auch zeitliche Homogenität sprechen immer mehr Merkmale des Standardmodells. Harvey Richer, Astronom an der kanadischen University of British Columbia und Experte in Fragen der Altersbestimmung des Universums, verweist darauf, dass die galaktische Entwicklung erst bestimmte Stufen durchlaufen musste, bevor die Voraussetzungen für die Entstehung von Leben geschaffen waren. So mussten Sterne über lange Zeiträume hinweg erst einmal die erforderliche Menge an schwereren Elementen produzieren. Vor Jahrmilliarden, so Richer, hätten wir schlicht noch gar nicht »hier« sein können.

Die Besonderheit unserer gegenwärtigen kosmischen Epoche offenbart sich auch bei einem Blick in die Zukunft. Virginia Trimble von der University of California in Irvine



Im Jahr 1657 erschien der fantastische Roman »Die Reise zu den Mondstaaten und Sonnenreichen« (Original: »L'Autre Monde ou les États et Empires de la Lune«) von Cyrano de Bergerac. Das oben abgebildete Titelblatt der 1659 erschienenen englischen Übersetzung zeigt den französischen Dramatiker, wie er mit Hilfe von in Flaschen gefülltem und von der Sonne erwärmtem Tau himmelwärts steigt. Der utopische Roman zählt zu den ersten Beispielen für die Auffassung, das heliozentrische Weltbild habe die Erde und den Menschen abgewertet.



In seinem »Sidereus Nuncius« (»Sternenbote«; Bild links) äußerte sich Galilei im Jahr 1610 begeistert darüber, dass die Erde im heliozentrischen Weltbild nicht länger vom »Reigen der Sterne« ausgeschlossen sei. Düstere war hingegen der Standpunkt, den 76 Jahre später Bernard le Bovier de Fontenelle vertrat. Eitelkeit sei es, so heißt es in seinen »Entretiens sur la Pluralité des Mondes« (»Dialogen über die Mehrheit der Welten«; das Bild rechts zeigt eine Ausgabe aus dem Jahr 1701), die Erde als den Mittelpunkt des Universums zu betrachten. Kopernikus habe also zu Recht die geringe Bedeutung der Erde offengelegt.

MET. FOL. GEN. DER PERKINS HISTORICAL LIBRARY, DUKE UNIVERSITY  
 SIDEREVS NVNCIVS: MET. FOL. GEN. DER OCTAVO CORP. UND DER WANSKÖCK LIBRARY  
 ENTRETIENS: UNIVERSITY OF CHICAGO LIBRARY, SPECIAL COLLECTIONS

Der 1660 in Amsterdam veröffentlichte »Atlas Coelestis seu Harmonia Macrocosmia« von Andreas Cellarius enthält eine Fülle reich verzierter Darstellungen zu kosmologischen Theorien. Das Bild zeigt ein Detail des von Frederik Hendrik van den Hove stammenden Titelblatts, das einen 1661 erschienenen Nachdruck ziert: Kopernikus, versunken in die Betrachtung seines Modells des Sonnensystems. Der Himmelsatlas enthält aber auch Darstellungen der von Ptolemäus und Tycho Brahe vorgeschlagenen kosmologischen Modelle. Cellarius' kunstvolle Land- und Sternkarten zählen bis heute zu den Meisterwerken seiner Epoche.



LINDA HALL LIBRARY OF SCIENCE, ENGINEERING & TECHNOLOGY

weist darauf hin, dass vielen Galaxien, darunter der Milchstraße, das Schicksal eines *last gasp* beschieden ist: Eines Tages werden sie ihren »letzten Atemzug« tun. »Die vorhandenen Gasvorräte reichen (nämlich) nicht aus, um die gegenwärtige Sternentstehungsrate noch lange aufrechtzuerhalten.« Zwar habe man in der Vergangenheit behauptet, dass einfallendes primordiales Gas die Vorräte für weitere 10 bis 15 Milliarden Jahre stabil halten werde, und sich bei dieser Überlegung auch gerne vom kopernikanischen Prinzip leiten lassen. Der jetzige Zeitpunkt wäre demzufolge ein völlig durchschnittlicher.

Doch tatsächlich sinke die Sternentstehungsrate stetig, und zwar schon seit der Zeit, als das Universum etwa halb so alt war wie heute. »Wir leben also durchaus in einer besonderen Epoche«, folgert Trimble. Denn die Prozesse, von denen man sich erhoffte, dass sie auf Dauer die Stabilität der Galaxis gewährleisten könnten, »haben ihren Zenit klar hinter sich«.

Falls das »perfekte kosmologische Prinzip« noch einen weiteren Sargnagel benötigen sollte, so lieferten ihn Lawrence M. Krauss von der Arizona State University und Robert J. Scherrer von der Vanderbilt University in Tennessee. Im Fachjournal »General Relativity and Gravitation« veröffentlichten sie 2007 eine ernüchternde Studie über die Bedingungen, die in 100 Milliarden Jahren im Weltall herrschen werden (siehe »Das kosmische Vergessen« von L.M. Krauss und R.J. Scherrer, SdW 5/2008, S. 24). Wenn dann noch Beobachter existieren, so die Verfasser, können sie zwar unsere nach wie vor durch die Schwerkraft zusammengehaltene Galaxis erforschen.

Die übrigen Galaxien wären jedoch infolge der sich beschleunigenden Ausdehnung des Weltalls aus unserem Gesichtsfeld verschwunden und die kosmische Hintergrundstrahlung unmessbar klein geworden. Somit würde nichts mehr von der kosmischen Expansion zeugen, und verschwunden wären auch die stellaren Fossilien, die uns heute Einblick in die Frühgeschichte des Universums gewähren.

### Zurück ins Jahr 1900?

Welche Ironie: Ausgerechnet die fortwährende Expansion – jene Eigenschaft des Universums also, die uns davon überzeugt, dass es kein statisches Gebilde ist – wird sich dann nicht mehr beobachten lassen. Den Bewohnern jenes fern in der Zukunft liegenden Weltalls bleibe gar keine Alternative, so Krauss und Scherrer, als wieder zum Standardmodell aus dem Jahr 1900 zurückzukehren: In einem solchen Modell ist die Galaxis das gesamte Universum. Auch die Illusion zeitlicher Stagnation wäre dann mit aller Macht zurückgekehrt. In Anbetracht der vorliegenden Daten verbietet sich allerdings jede Annahme einer großskaligen zeitlichen Homogenität. Ganz im Gegenteil: Aus chronologischer Sicht haben wir tatsächlich eine eher zentrale Position inne und können unsere Epoche zunehmend als goldenes Zeitalter betrachten. Wie Krauss und Scherrer es formulieren: »Wir leben in einem ganz besonderen Zeitabschnitt der Entwicklung des Universums: in einer Zeit nämlich, in der wir durch Beobachtungen feststellen können, dass wir in einem ganz besonderen Zeitabschnitt der Entwicklung des Universums leben!«



Die Dichteverteilung von drei Millionen Galaxien, dargestellt auf einer flächentreuen Himmelskarte, verdeutlicht das kosmologische Prinzip. Die Helligkeit der Pixel, die je 0,1 Quadratgrad des Himmels abdecken, ist ein Maß für die Galaxienkonzentration innerhalb dieser Fläche. Ihre Farben stehen für schwächer leuchtende Galaxien (rot), solche von mittlerer (grün) und großer Helligkeit (blau). Himmelskörper, die die Darstellung verzerren könnten, sind schwarz wiedergegeben. Obwohl die Galaxienverteilung auch auf dieser Größenskala variiert, stellt sich das Universum als im Großen und Ganzen homogen dar.

Wie sieht es nun aber mit der geometrischen Aussage des kopernikanischen Prinzips aus? Kopernikus' Feststellung, im Universum existiere mehr als ein Zentrum, wurde von Galilei bestätigt, als er mit dem Fernrohr vier den Jupiter umkreisende Himmelskörper entdeckte. Heutige Kosmologen gehen aber noch einen Schritt weiter. Sie behaupten nicht nur, dass es keinen auf irgendeine Weise ausgezeichneten Mittelpunkt gebe, sondern dass überall das Zentrum sei. Wie ist das möglich?

Nobelpreisträger Steven Weinberg von der University of Texas sieht das kopernikanische Prinzip im Einklang mit der Raumzeit-Geometrie der Robertson-Walker-Metrik. Diese beschreibt ein sphärisches Universum in vier Dimensionen. Als Analogon eines solchen Objekts kann eine dreidimensionale Kugel gelten, von der wir uns vorstellen, dass an verschiedenen Punkten auf ihrer Oberfläche Marienkäfer herumkrabbeln. Der »Raum«, der den Käfern zur Verfügung steht, ist die Oberfläche der Kugel. Jeder dieser Käfer könnte nun, da seine räumliche Umgebung in allen Richtungen dieselben geometrischen Eigenschaften aufweist, das heißt isotrop ist, den eigenen Standort für den Mittelpunkt seines Raums halten.

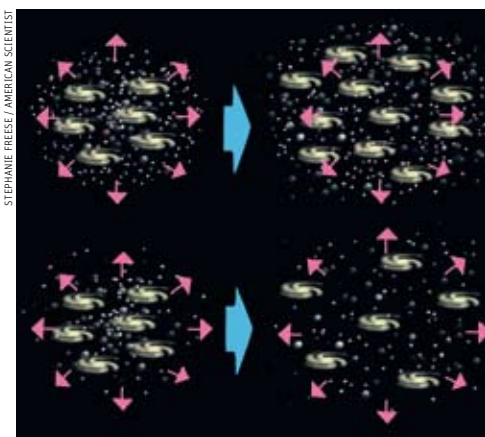
In gewissem Sinn hätte er damit sogar Recht, denn ungeachtet der Richtung, in der er seine Messung vornimmt, ist der Abstand zwischen ihm und dem entferntesten Ort in seinem Universum stets gleich groß. Die Behauptung aber, seine besondere Position bilde den Mittelpunkt des Universums, hielten wir gleichwohl für naiv. Schließlich wissen wir, dass die von anderen Käfern durchgeführten Messungen zu genau denselben Ergebnissen führen würden.

Im Universum des Standardmodells verhält sich tatsächlich jeder Punkt des Raums geometrisch so, als wäre er der Mittelpunkt. Diese Eigenschaft, die manchmal auch als Prinzip der Mittelmäßigkeit bezeichnet wird, ist nicht nur konsistent mit der Aussage des kopernikanischen Prinzips, es gebe keinen irgendwie ausgezeichneten Mittelpunkt – faktisch ist er dessen Kehrseite. Auf der Oberfläche der Kugel scheinen die Beobachtungen jedes einzelnen Marienkäfers darauf hinzuweisen, dass sein Standort zentral ist. Aus einer übergeordneten Perspektive wird jedoch deutlich, dass jeder einzelne Standort eher »mittelmäßig« oder schlicht durchschnittlich ist, ein Umstand, der aus der Isotropie und der Homogenität des »Käfer-Universums« folgt.

Die Behauptung, unser Universum sei räumlich isotrop und homogen, ist als kosmologisches Prinzip bekannt. Jim Peebles aus Princeton, einer der modernen Pioniere der physikalischen Kosmologie, meint, dass es ursprünglich als Zwischending aus philosophischer, Ad-hoc- und Arbeitshypothese eingeführt wurde und so »möglicherweise auch den Einfluss des kopernikanischen Prinzips widerspiegelt«. Inzwischen sprächen jedoch die Beobachtungen für sich, und das kosmologische Prinzip sei eine anerkannte Tatsache. Damit wirft es die wenigsten Probleme auf: Es transportiert eine rein geometrische und wissenschaftliche Aussage.

Im Gegensatz dazu scheinen die anderen beiden Prinzipien unterschiedlichsten wissenschaftlichen Interpretationen Raum zu bieten. Paul Davies etwa antwortete auf die Frage, welche Beziehung er zwischen dem kopernikanischen und dem Mittelmäßigkeitsprinzip

Die Steady-State-Theorie (obere Diagramme) wird heute von den meisten Kosmologen verworfen. Sie beschreibt ein expandierendes Universum, das sowohl räumlich als auch zeitlich homogen und isotrop ist. Das Modell setzt voraus, dass die sich beim Auseinanderstreben der Galaxien ergebenden Lücken durch spontan entstehende Materie gefüllt werden. Das heute weithin anerkannte Standardmodell (untere Diagramme) verwirft die zeitliche Komponente der Steady-State-Theorie, behauptet aber ebenfalls, dass das Universum von jedem beliebigen Punkt im Raum homogen und isotrop erscheint.



## Literaturhinweise:

**Bondi, H.:** *Cosmology*. Cambridge University Press, Cambridge 1952.

**Carr, B. (Hg.):** *Universe or Multiverse?* Cambridge University Press, Cambridge 2007.

**Danielson, D. R.:** *The Great Copernican Cliché*. In: *American Journal of Physics* 69, S. 1029–1035, 2001.

**Danielson, D. R.:** *The Book of the Cosmos: Imagining the Universe from Heraclitus to Hawking*. Perseus Books, Cambridge (MA) 2000.

**Davies, P.:** *Der kosmische Volltreffer*. Campus, Frankfurt am Main 2008.

**Ellis, G. F. R.:** *Issues in the Philosophy of Cosmology*. In: *Philosophy of Physics*. Von Jeremy Butterfield und John Earman (Hg.). S. 1183–1283. Elsevier, Amsterdam 2007.

**Gingerich, O.:** *Gottes Universum*. Berlin University Press, Berlin 2008.

**Jeder der Marienkäfer auf einem vollkommen kugelförmigen Ball hält seinen Standort für das Zentrum der Kugeloberfläche. Diese Oberfläche, der »Raum« der Käfer, ist isotrop; er besitzt eine gleichförmige positive Krümmung. Doch die Käfer haben nur teilweise Recht. Jeder kann zwar für sich beanspruchen, sich im Zentrum des Raums zu befinden; ein einziger Mittelpunkt existiert aber nicht.**

sehe, er verwende beide Begriffe synonym, während Wendy Freedman, Direktorin der Carnegie Observatories im kalifornischen Pasadena, keinerlei Gemeinsamkeiten sieht.

Hinzu kommt, dass beide Prinzipien Laien ebenso wie Forscher auch zu nichtwissenschaftlichen Schlüssen verleiten. Wie erwähnt, wurde Kopernikus' wissenschaftliches Vermächtnis seit etwa der Mitte des 17. Jahrhunderts häufig zur Untermauerung zweifelhafter misanthropischer Auffassungen benutzt. Hinzu kommt die potenzielle Doppeldeutigkeit, wie sie in Formulierungen wie »mittelmäßig«, »nicht besonders« und »nicht ausgezeichnet« mitschwingt. Da verwundert es wenig, dass oftmals ein Schleier amateurhaften Philosophierens über die Anforderungen wissenschaftlicher Strenge fällt, und selbst Lehrbücher wie Edward Harrisons »Cosmology« den menschlichen »Verzicht auf eine kosmische Vorrangstellung« als Folge des Fortschritts der Wissenschaft darstellen.

Beschränken wir das kopernikanische Prinzip und sein geometrisches Pendant, das Prinzip der Mittelmäßigkeit, nun versuchsshalber auf ihre rein wissenschaftlichen Aussagen. Trifft dann nicht dennoch zu, dass der von Kopernikus in Gang gesetzte Erkenntnisprozess die Erde und ihre Bewohner auf eine unbedeutende Größe reduziert hat, verglichen mit der Ausdehnung des Universums? Tatsächlich brachte Kopernikus' Feststellung, die Umlaufbahn der Erde sei im Verhältnis zum Umfang der Sphäre der »Fixsterne« unmessbar klein, mit sich, dass das Volumen des Weltalls um etliche Größenordnungen wuchs – und das lange bevor der Einsatz astronomischer Teleskope die Größe des Weltalls endgültig ins Unvorstellbare steigerte. Kein Wunder

also, wenn ein erfahrener Allround-Astronom wie Jay Pasachoff vom Williams College in Massachusetts nicht glauben kann, »dass der Erde oder der Menschheit im Kosmos irgendeine besondere Bedeutung zukommt«, oder wenn Peebles feststellt, wir seien allenfalls »ein Staubkorn im großen Plan der Natur«.

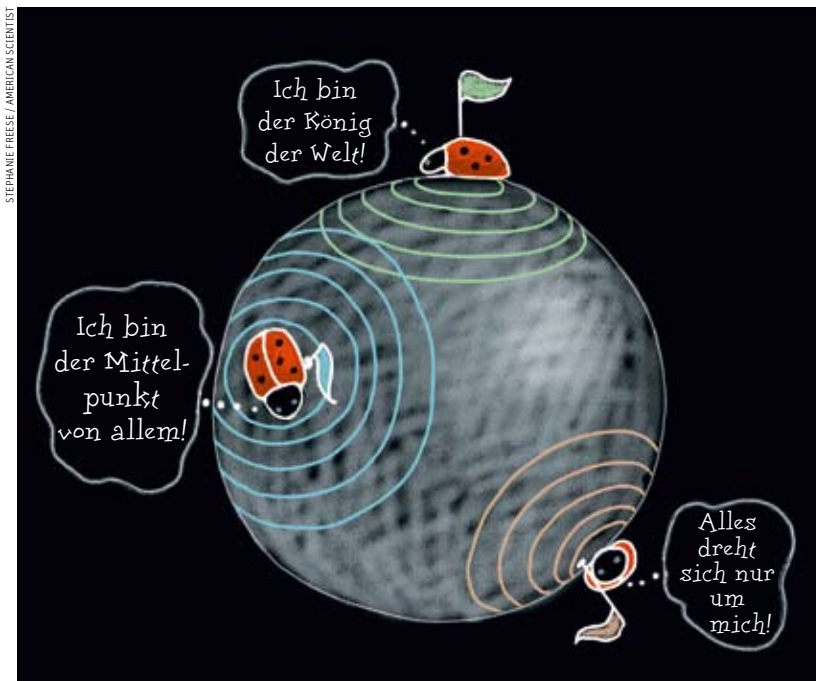
## Absinken in die Bedeutungslosigkeit?

Doch gegen diese pessimistische Auslegung der Kosmologiegeschichte werden Einwände laut. Einen bedeutungsvollen Ort einzunehmen oder etwas Bedeutendes zu leisten, sagt etwa Freedman (und hätte damit wohl auch Kopernikus' Beifall gefunden), seien völlig unterschiedliche Dinge. Auch wenn wir gemessen am kosmischen Maßstab nichts Großartiges darstellen mögen, sei schlicht die Tatsache von größter Bedeutung, »dass eine Spezies überhaupt die Neugier entwickelte, den Weltraum zu erforschen und diese Fragen zu stellen«.

Drei wichtige Entwicklungslinien in der kosmologischen Forschung fördern eine solche Neubewertung der Rolle der Erde und ihrer Bewohner im Kosmos. Und alle drei hängen direkt mit Fragen der Größe beziehungsweise der Masse des Universums zusammen. Die offenkundigste hat schon Harvey Richer angedeutet. Sie besteht in der wachsenden Akzeptanz der Erkenntnis, dass wir nicht hier wären, wenn das Universum nicht genau so groß (und deshalb genau so alt) wäre, wie es tatsächlich ist. Es sei sinnlos, angesichts der Unermesslichkeit des Kosmos über unsere Bedeutungslosigkeit zu lamentieren, wenn unsere Existenz genau diesen Schwindel erregenden Größenunterschied voraussetzt.

Zum Zweiten erkennen wir zunehmend, wie untypisch der Stoff ist, aus dem wir bestehen. Nach jüngeren Schätzungen beläuft sich der Anteil der baryonischen Materie – die Atome, aus denen Galaxien, Sterne und eben auch Menschen bestehen – an der Masse des Universums auf höchstens fünf Prozent (Dunkle Energie und Dunkle Materie stellen dessen Hauptbestandteile). Exoplanetenforscher Jaymie Matthews von der kanadischen University of British Columbia bemerkt dazu: »Noch vor drei Jahrzehnten glaubten wir, aus den elementaren Urbestandteilen des Universums hervorgegangen zu sein – wir waren gewissermaßen das Mehl im kosmischen Rezept. Heute scheinen wir eher irgendeine Zutat oder (wie ich gerne glauben würde) immerhin die Würze zu sein.« Unbedeutend mache uns das indessen nur dann, »wenn wir eine Welt vorziehen, in der es keine Gewürze gibt«.

Das »Größenargument« lässt sich also in beide Richtungen interpretieren. Einerseits fürchten wir, unsere Bedeutung schrumpfe mit



einem wachsenden Universum. Andererseits erscheint unsere Erde, auf der Leben und schließlich auch Bewusstsein entstand, umso außergewöhnlicher, je größer das Universum ist und je lebensfeindlicher es sich andernorts darstellt.

Eine dritte Entwicklung in der Kosmologie dreht sich um die Frage der so genannten Feinabstimmung des beobachtbaren Universums als Ganzem. Die Wahrscheinlichkeit eines Kosmos, in dem (beispielsweise) Sterne entstehen, die wiederum die Voraussetzungen für kohlenstoffbasiertes Leben schaffen, ist sehr gering, denn sie hängt davon ab, welche Werte bestimmte Naturkonstanten besitzen. Sie ist so gering, dass viele Kosmologen von der Existenz eines »Multiversums« ausgehen und vermuten, es könnten zahlreiche, vielleicht unendlich viele »parallele« Universen existieren oder zumindest möglich sein. Dieses Szenario nämlich trägt (unter anderem) dem Wunsch Rechnung, eine ausreichend große Zahl von Universen erhöhte die Chancen dafür, dass auch ein so umwerfend besonderes Exemplar wie das unsere mit darunter ist.

Und selbst falls wir die Möglichkeit einräumen, dass auch anderswo in unserem Universum Leben existiert, könnte es Don Page zufolge noch immer etwas kosmologisch »Besonderes (darstellen), da es vielleicht nur in einem winzigen Teil des Universums oder Multiversums auftritt«. Schließlich würden ja die meisten Menschen darin übereinstimmen, »dass Größe allein nicht so wichtig ist«, so Page, und auch nicht die Größe des Bruchteils unseres Universums, in dem Leben existiert.

Was bedeutet nun all das für Kopernikus und das kopernikanische Prinzip? Nicht notwendigerweise für beide dasselbe. Kopernikus gelangte zu seinen Erkenntnissen, weil er nach Schönheit im Aufbau der Welt suchte. Er gab sich nicht mit Modellen zufrieden, die eine mögliche Erklärung für die beobachteten Phänomene lieferten, sondern wollte verstehen, wie das Universum *wirklich* funktioniert; er ging davon aus, dass Natur und Mathematik übereinstimmen; und er erkannte, dass der Ort, die Bewegung und die Beteiligung der Beobachter in einem kohärenten Bild des Kosmos berücksichtigt werden müssen.

Hinter vielen Themen auf der gegenwärtigen Tagesordnung der kosmologischen Forschung stehen handfeste kopernikanische Argumente. Diese beeinflussen das Nachdenken über die Stringtheorie, das Konzept des Multiversums und das sich inflationär ausdehnende Weltall, aber auch Gebiete wie die Anisotropie der kosmischen Hintergrundstrahlung, die Effekte der anthropischen Selektion und viele mehr. Insofern ist Kopernikus heute noch in der Forschung lebendig.



Das Titelblatt der 1640 erschienenen Ausgabe von John Wilkins' »A Discourse Concerning a New World and Another Planet« zeigt Galileo und Kepler (rechts), die für das von Kopernikus (links) vorgeschlagene Weltbild eintreten.

Nach wie vor Geltung besitzt das kosmologische Prinzip. Wenn man es von seinem Alter Ego, dem kopernikanischen Prinzip, löste, stünde es allerdings noch besser da. Und auch das Prinzip der Mittelmäßigkeit könnte sich weiter als nutzbringend erweisen, wenn man es auf seine Kernaussage über die kosmologische Geometrie beschränkte. Das kopernikanische Prinzip dagegen steckt tief in der Krise. In seiner strikten ursprünglichen Bedeutung, sagt Don Page, ist es »eine Arbeitshypothese, die gerade fallen gelassen wird«.

Andere würden sein Ende lieber heute als morgen verkünden. Für Max Tegmark vom Massachusetts Institute of Technology »gehört (das kopernikanische Prinzip) schon jetzt in den Papierkorb der Geschichte«. Unter Verweis auf einige der Parameter, anhand derer sich die Besonderheit oder Feinabstimmung unseres Universums belegen lässt, vertritt er die Auffassung, dass das kopernikanische Prinzip bereits »in jenem Teil des Weltalls offenkundig nicht zutrifft, der unserer Beobachtung zugänglich ist. Schließlich leben wir in einer Galaxie und nicht im intergalaktischen leeren Raum, wir leben auf einem ungewöhnlich lebensfreundlichen Planeten, und zwar auf seiner Oberfläche und nicht in seinem weitaus voluminöseren Innen, und so weiter.«

Einen bleibenden Wert besitzt das Prinzip aber selbst für Tegmark. Denn es zeige beispielhaft, »wie sich selbst die klügsten Wissenschaftler irren können«.



**Dennis R. Danielson** ist Ideengeschichtler und leitet den Fachbereich Englisch an der kanadischen University of British Columbia. Sein Interesse gilt der wissenschaftlichen Revolution sowie der Geschichte, Literatur und kulturellen Bedeutung der Astronomie. Im Jahr 2000 nominierte der Internet-Buchhändler Amazon Danielsons »The Book of the Cosmos« für die Auswahlliste der besten Wissenschaftsbücher des Jahres. Seine Biografie »The First Copernican: Georg Joachim Rheticus and the Rise of the Copernican Revolution« erschien 2006. Danielson, der auch Humboldt-Forschungsstipendiat an der Universität Bonn war, veröffentlichte Aufsätze im »American Journal of Physics«, in »Nature« sowie im »Journal for the History of Astronomy«.

© American Scientist

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/1002941](http://www.spektrum.de/artikel/1002941).

# »Sie sind doch IHR GEHIRN – wer sonst?«

Ein Forscherleben für das Gehirn: Der Neurophysiologe Wolf Singer erklärt, wie er sich Grundfragen der Hirnfunktion nähert – und welche Folgen das für unser Weltbild hat.



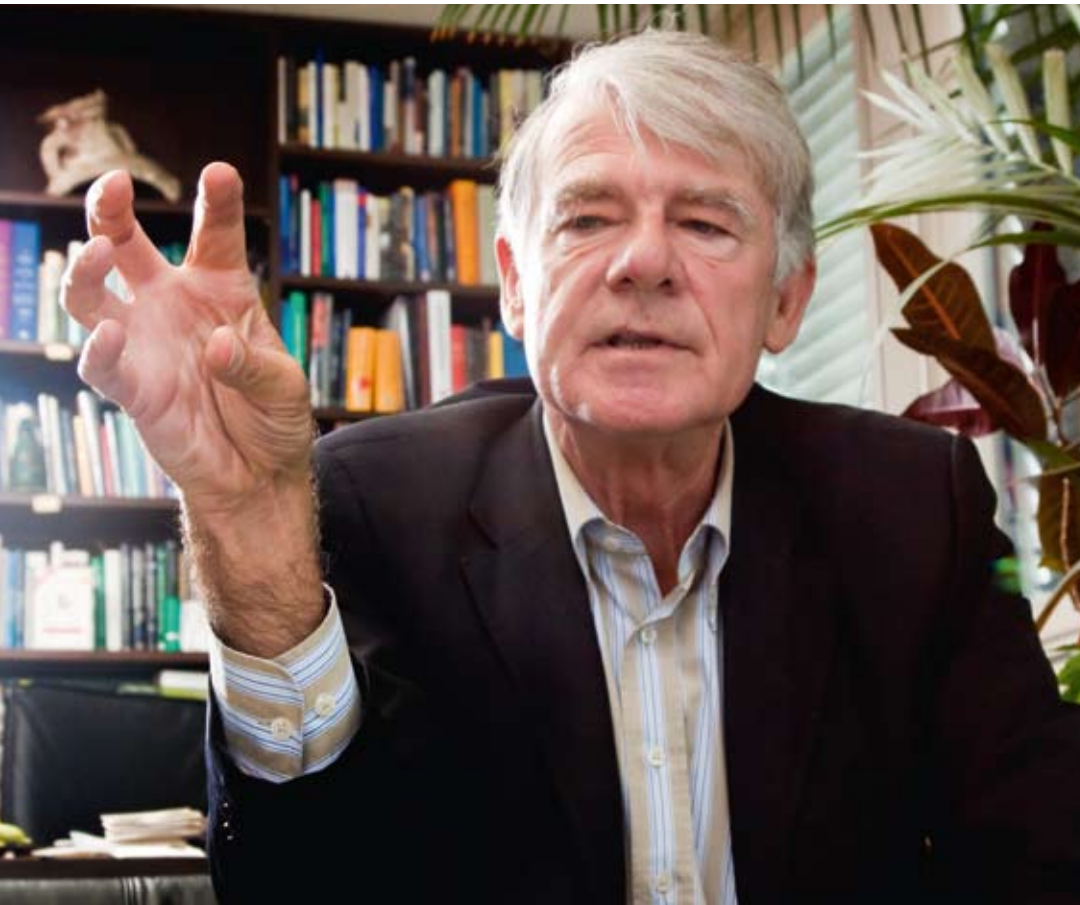
Von Bernhard Epping

**B**ücherwände bis zur Decke, an den freien Wänden Kunst. Im hinteren Bereich des Arbeitszimmers eine Sitzcke, schwarzes Leder, schlicht. Über einer Lehne liegt die tibetische Flagge. Wolf Singer feigt mit der Hand die Polster ab und kokettiert: »Ich hab ganz vergessen, für Sie Staub zu putzen.«

Mitte der 1980er Jahre gelang Singer, von Haus aus Mediziner, ein Durchbruch für die Hirnforschung mit dem Nachweis so genannter Ensembles in der Großhirnrinde: Verbänden aus Hunderten oder Tausenden von Nervenzellen in der Großhirnrinde, die für Millisekunden ihre elektrische Aktivität synchronisieren und damit für Ordnung im Kopf sorgen.

Außer Grundlagenforschung zu betreiben, hat sich Singer in Essays, Reden und Büchern immer wieder an ein breites Publikum gewandt und dabei Querverbindungen zu Philosophie oder Politik gesucht. Im »Spektrum«-Interview berichtet er, wieso er zur Hirnforschung fand – oft ein »ungeheuer frustrierendes Feld« – und wie ihm ein Missgeschick zu seiner Schlüsselentdeckung verhalf. Beim Thema Willensfreiheit betont der Direktor am Max-Planck-Institut für Hirnforschung in Frankfurt am Main, dass wir für unser Handeln verantwortlich bleiben, auch wenn uns das Gehirn die Vorstellung von Autonomie am Ende vielleicht nur vorgaukelt.

Singer selbst bezeichnet sich als »Bastler«, doch am Ende passt eher die Bezeichnung Universalgelehrter. Eine Tour d'Horizon.



ALLE FOTOS DES ARTIKELS: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / IMANFRED ZENTISCH

## ZUR PERSON

Wolf Singer wurde 1943 in München geboren, studierte Medizin an der dortigen Ludwig-Maximilians-Universität und an der Sorbonne in Paris, machte 1968 das Staatsexamen in Medizin und wurde im gleichen Jahr mit einer Arbeit über »Die Funktion der telencephalen Kommissuren für bilaterale Synchronisierung des EEG« zum Dr. med. promoviert, die am Max-Planck-Institut für Psychiatrie in München unter Otto Detlev Creutzfeldt entstand.

Seit 1981 leitet er die Abteilung Neurophysiologie am MPI für Hirnforschung in Frankfurt am Main. Singer, Dr. h. c. mult. und dutzendfach ausgezeichnet, hat mitgeholfen, Frankfurt zu einem Zentrum der Hirn- und Kognitionsforschung auszubauen. So ist er Gründungsmitglied des 2004 entstandenen Frankfurt Institute for Advanced Studies (FIAS) und des 2008 aus der Taufe gehobenen Ernst-Strüngmann-Instituts. Wolf Singer ist verheiratet und hat zwei Töchter.

**Spektrum der Wissenschaft:** Herr Professor Singer ... darf ich mich zu Beginn erkundigen, ob ich mich überhaupt noch auf meine Wahrnehmung verlassen kann? Die Lektüre einiger Ihrer Schriften hat mich verunsichert.

**Prof. Dr. Wolf Singer** (mit bayerischem Zungenschlag): Fangen Sie an! Mögen S' a Wasser?

**Spektrum:** Danke schön, ja. Da sitzen Sie, da sind zwei Fotografen, hier sitze ich, wir sind in Ihrem Arbeitszimmer, draußen gießt es gerade in Strömen – was ich so wahrnehme, ist doch die Realität, oder?

**Singer:** Es ist die von Ihrem Gehirn rekonstruierte Wirklichkeit.

**Spektrum:** Rekonstruiert?

**Singer:** Sicher. Weil Sie mit zweidimensionalen Helligkeitsverteilungen in Ihrer Netzhaut darauf schließen.

**Spektrum:** Wobei ich Sie auch höre.

**Singer:** Genau, aber wenn Sie nur die Lautfolgen empfangen würden, ohne deren Bedeutung zu kennen, würden Sie mich gar nicht verstehen. Mit anderen Worten: Sie bringen bereits ein ungeheures Maß an Vorwissen mit, um sich Ihre Wirklichkeit zu rekonstruieren. Vorwissen, das zum Teil aus der Evolution unserer Spezies, zum Teil aber auch aus Ihrer eige-

nen frühen Kindheit kommt. Beides strukturiert Ihre Wahrnehmung, ohne dass Sie davon etwas mitbekommen. Obendrein haben Sie auch noch später gelerntes, explizites Wissen, von dem Sie direkt wissen, wo Sie es herhaben.

**Spektrum:** Bei so viel individueller Rekonstruktion der Wirklichkeit – teile ich da überhaupt Wahrnehmungen mit anderen?

**Singer:** Was die elementaren Wahrnehmungen anbelangt, die von Objekten, visuellen Szenen ...

**Spektrum:** ... etwa das Glas auf dem Tisch ...

**Singer:** ... das wird von Tier und Mensch sehr ähnlich vollzogen. Das Leben auf der Erde hat sich in Dimensionen von Millimetern bis Metern entwickelt. Nur in ihnen existieren feste Objekte. Unser Gehirn leistet daher Interpretationen, die an diesen Ausschnitt der Wirklichkeit angepasst sind. Die verlieren hingegen in den winzig kleinen Dimensionen der Quantenwelt ihren Sinn. Dort gibt es keine soliden Gegenstände. Und wieder anders in kosmischen Dimensionen, wo unsere Alltagskonstrukte von Raum und Zeit keine Gültigkeit haben. Hätte sich Leben in anderen Dimensionen entwickelt, hätte es auch zu ganz anderen Wahrnehmungsformen gefunden.

**LEXIKON I**

**Aktionspotenzial**

Elektrisches Alles-oder-nichts-Signal in Nervenzellen. Wird durch Summation vieler unterschwelliger einlaufender elektrischer oder chemischer Signale ausgelöst.

**Elektroenzephalogramm, EEG**

Nichtinvasive Messung der Hirnströme mittels Elektroden an der Kopfoberfläche. 1924 vom Neurologen und Psychiater Hans Berger (1873–1941) erstmals beim Menschen aufgezeichnet.

Das EEG erfasst die Summenaktivität vieler Nervenzellen, vor allem in der Großhirnrinde. Unterschieden werden verschiedene Frequenzbereiche alias Rhythmen oder Oszillationen, darunter:

**Alpha-Rhythmus:** mit 8 bis 12 Hertz, bei geschlossenen Augen

**Beta-Rhythmus:** 13 bis 30 Hertz, bei geistiger Aktivität

**Gamma-Rhythmus:** über 30 Hertz, Korrelat für erhöhte Aktivität, etwa Lernprozesse bis hin zum Bewusstwerden von Gedächtnisinhalten



**Spektrum:** Also werden das Glas hier auch eine Katze und jeder andere Mensch erkennen?

**Singer:** Etwas in der Art, ja. Bei uns Menschen kommt allerdings hinzu, dass die Wahrnehmung durch unsere kulturelle Evolution massiv überformt wurde. Erst dadurch, dass Menschen begonnen haben, miteinander zu kommunizieren, ist im Wechselspiel eine geistige Dimension entstanden: Wertesysteme, das Konzept Gott – das ist alles erst in die Welt gekommen, weil Menschen der natürlichen Welt noch eine weitere hinzugefügt haben.

**Spektrum:** Die Zehn Gebote – du sollst nicht töten – sind also eine kulturelle Erfindung?

**Singer:** Ja, zum Beispiel. Alle Kodizes gehören dazu wie Rechtssysteme, Umgangsformen, moralische Bewertungen, Empathie, Mitleid, Schuld. Sie überformen laufend unsere Wahrnehmung. Das führt übrigens auf ein sehr aktuelles Problem.

**Spektrum:** Welches?

**Singer:** Die Wahrnehmung dieser Realitäten ist eben nicht für alle Menschen gleich, weil das entsprechende Vorwissen kulturspezifisch erworben wird. Dass hier ein Glas steht, können Sie noch beweisen. Doch bei Glaubensfragen oder Wertesystemen gibt es keinen Richter, keinen objektiven Maßstab. Und ich bin sicher, dass wir in diesem Kontext dringend einen neuen Toleranzbegriff brauchen.

**Spektrum:** Wieso das denn?

**Singer:** Viele Probleme, die etwa der Terrorismus ausdrückt, sind die Folge eines arroganten Toleranzbegriffs. Hier im Westen konzedieren wir zwar, dass es Menschen in anderen Kulturkreisen mit anderen Anschauungen gibt. Doch wir sagen: Unsere Wahrnehmung ist die zutreffende – solange ihr uns nicht stört, lassen wir euch machen. Und genau das hat eine sehr erniedrigende Konnotation.

**Spektrum:** Aber Toleranz hat doch auch Grenzen. Soll keiner mehr protestieren, wenn andernorts Minderheiten unterdrückt werden – etwa aus »kulturellen Gründen«?

**Singer:** Die Frage der Menschenrechte ist eine andere Ebene. Dafür gibt es Kodizes, die aus einer Argumentation der Reziprozität kommen. Niemand darf einen anderen zwingen, seine Weltanschauung zu ändern. Mit Gewalt schon gar nicht. Dass wir uns als Individuen begreifen, ist ebenfalls dadurch entstanden, dass Menschen sich gegenseitig Handlungen zugeschrieben und dieses intentionale Ich benannt haben. Das ist ein Prozess, der bei jedem neu durchlaufen wird. Kinder lernen ihre Ich-Vorstellung erst in der Abgrenzung von den Bezugspersonen. Dafür braucht es die Spiegelung durch andere.

**Spektrum:** Welche Spiegelung brachte Sie dazu, Hirnforscher zu werden?

**Singer:** Das wusste ich lange gar nicht. Ich habe Medizin studiert, weil es mir als ein Studium generale schien.

**Spektrum:** Dann lassen Sie uns gleich richtig zurückgehen. Sie sind 1943 in München geboren ...

**Singer:** Ja. Aber aufgewachsen bin ich in Soyen, einem Weiler in Oberbayern. Als mein Vater aus dem Krieg zurückkam, hat er sich dort als Landarzt über Wasser gehalten. Daraus wurde meine Heimat. Sozialisiert wurde ich allerdings auf dem Internat.

**Spektrum:** Wieso kamen Sie ins Internat?

**Singer:** In dem Dorf Soyen gab es zwar eine Bahnstation, aber ich hätte zur nächsten höheren Schule furchtbar weit fahren müssen. Also kam ich 1953 auf Schloss Neubauern im Inntal, wo wir neben dem Unterricht weitere Aktivitäten entfalten sollten. Für mich wurde es die Musik, aber ich bin dort auch Schreiner-geselle geworden. Ich war immer Bastler, habe sehr früh Radios gebaut, Funksteuerungen für meine Modellflieger und Ähnliches.

**Spektrum:** Machen Sie noch Musik?

**Singer:** Ich spiele Klarinette, jazze, wenn-gleich dilettantisch. Blues in F halt.

**Spektrum:** Und wie kommt man als Bayer nach Hessen?

**Singer:** Indem man von der Max-Planck-Gesellschaft berufen wird und ein Institut übernimmt. Das war 1981.

**Spektrum:** Wohnen Sie gerne in Frankfurt?

**Singer:** Ja, inzwischen sehr. Ich hätte dreimal nach München zurückkehren können, meine Frau arbeitet dort beim Bayerischen Rundfunk. Aber ich hab's nicht getan. Zum einen spürte ich hier Verantwortung für das Institut. Und dann ist Frankfurt eine sehr lebendige, kosmopolitische Stadt, weniger selbstgefällig als etwa München. Es gibt hier viel Kultur. Vorgestern Abend war ich erst in der Oper.

**Spektrum:** Was gab es denn?

**Singer:** Die Donizetti-Oper »Lucia di Lammermoor«, ganz großartig, vor allem die Wahnsinns-Arie. Ich bin Belkanto-Liebhaber.

**Spektrum:** Und wie kamen Sie zur Hirnforschung?

**Singer:** Ein Schlüsselerlebnis für mich war während des Studiums ein Seminar, das mein späterer Doktorvater, der Neurobiologe Otto Detlev Creutzfeldt (Sohn von Hans-Gerhard Creutzfeldt, dem Mitentdecker der Creutzfeldt-Jakob-Krankheit, *Anm. der Red.*) zusammen mit Paul Matussek, einem Psychiater, gab. Der eine hat die biologische Seite des Gehirns, der andere die Psyche beschrieben, und beide haben nach Verbindungen gesucht. Ich dachte mir, es wäre toll, wenn man zwischen den neuronalen Netzwerken und den geistigen Vorgängen eine Verbindung herstellen könnte.



**Spektrum:** Und – können Sie heute erklären, wie an die 100 Milliarden Nervenzellen unser Bewusstsein kreieren?

**Singer:** Nein. Der Phasenübergang vom Materiellen zum Geistigen, das Leib-Seele-Problem, bleibt nach wie vor eine ganz knifflige philosophische Angelegenheit. Was wir heute besser erklären können, ist ein Teil der Prozesse im Gehirn. So genannte Ensembles synchron schwingender Neurone sind vermutlich die Grundlage von Wahrnehmungsprozessen. So zumindest scheint es mir.

**Spektrum:** Pardon?

**Singer:** Nehmen Sie dieses impressionistische Bild hier (*zeigt auf ein Buch*). Es besteht aus sehr vielen Farbpunkten, doch irgendwie gelingt es Ihrem Gehirn, Punkte in vielen Nervenzellen separat zu erfassen, dann genau jene miteinander zu verbinden, die verbunden gehören, und so das Bild zusammensetzen. Das führt auf die Frage, wie das Gehirn das schafft. Und das nennen wir das Bindungsproblem.

**Spektrum:** Eines Ihrer Bücher trägt den Titel »Der Beobachter im Gehirn«. Der leistet das vermutlich?

**Singer:** Nein, den gibt es nicht. Es gibt keinen Ort im Gehirn, auf den Sie zeigen und von dem Sie behaupten könnten: Hier ist die Wahrnehmung, hier setzt das Gehirn das Bild zusammen.

**Spektrum:** Aber jedes Biologiebuch lehrt, dass die Großhirnrinde Reize nach dem Ort sortiert. Der Kanadier Wilder Penfield konnte doch durch direkte elektrische Reizung einer bestimmten Hirnregion bei Patienten etwa ein Kribbeln im kleinen Finger auslösen. Also hat das Gehirn doch einen Ort, an dem es erkennt: Mein kleiner Finger juckt gerade. An anderer Stelle erkennt es Kanten eines Bilds, wieder woanders die Farbe Gelb und so fort.

**Singer:** Nein. An einer bestimmten Stelle im Homunkulus im somatosensorischen Kortex (*siehe Lexikon III*) kommen zwar Signale von Rezeptoren aus Ihrem Finger an. Doch wer nimmt denn wahr, was dort verarbeitet wird?

**Spektrum:** Weiß ich nicht.

**Singer:** Auf jeden Fall Sie, wenn Sie ein Kribbeln spüren (*lacht*). Nein, was wir heute wissen, ist, dass Wahrnehmungen auf der koordinierten Aktivität vieler miteinander verbundener Hirnrindenareale beruhen.

**Spektrum:** Und woher wissen Sie das?

**Singer:** Als ich 1981 nach Frankfurt kam, gab es schon eine andere Theorie. Der amerikanische Neurobiologe Donald Hebb hatte bereits 1949 formuliert, dass Repräsentationen im Gehirn nicht nur über einzelne Neurone, sondern über große Ensembles von Nerven-

zellen entstehen könnten. Und mein Freund, der Physiker Christoph von der Malsburg, hat die Idee von Ensembles 1981 weiter formuliert. Das lag als Konzept also bereits vor.

**Spektrum:** Und Sie haben sich dann gesagt, jetzt versuchen wir, das auch nachzuweisen?

**Singer:** Nein, überhaupt nicht. Es war ein Zufallstreffer 1986. Wir untersuchten hier am MPI zunächst die Entwicklung des Sehens bei Katzen. Ich saß gerade an einem Experiment und hatte den Eindruck, dass etwas nicht stimmt, dass vielleicht die Drähte gebrochen sind.

**Spektrum:** Welche Drähte?

**Singer:** Wir leiten bei den Tieren mittels implantierter Elektroden die elektrische Aktivität einzelner Neurone aus dem Gehirn ab.

**Spektrum:** Tierversuche? Ein heikles Thema.

**Singer:** Ja, sie sind ein Problem. Aber ich begründe diese Versuche als Mediziner. Ich kenne auch das Leid auf Intensivstationen und die Leidensfähigkeit von Menschen. Beide sind ungleich höher als das Leid von Tieren, weil nur wir ein Konzept von Zeit und Tod haben. Ich bin überzeugt, dass der Ertrag für die Medizin solche Experimente ethisch rechtfertigt. Und ich bedaure sehr, dass wir diesen wichtigen Zweig der Hirnforschung in Deutschland verlieren. Die Universitäten trauen sich ob des öffentlichen Drucks nicht mehr, solche Wissenschaftler zu berufen.

**Spektrum:** Sie saßen also 1986 bei solch einem Experiment ...

**Singer:** Wir haben den visuellen Kortex – also den Teil der Großhirnrinde, der das Sehen ermöglicht – untersucht und Katzen auf einem Bildschirm Muster vorgespielt. Die Katze schaute sich das an. Gleichzeitig wollte ich die Reaktionen einzelner Nervenzellen messen. Doch ich bekam keine Signale. Also habe ich mir gedacht, dreh die Filter raus. Sollten die Drähte wider Erwarten doch noch funktionieren, kannst du wenigstens ein Elektrokortikogramm (*siehe Lexikon II*) ableiten.

**Spektrum:** Welche Filter?

**Singer:** Um die hochfrequenten und sehr schwachen Signale einzelner Neurone besser zu sehen, schneidet man im Versuch alle Signale unterhalb von 1000 Hertz ab. Ich drehe also diese Filter raus und höre vom Monitor her auf einmal einen mir völlig unvertrauten Ton. Etwas, was so klingt wie ein Außenbordmotor, prrrrr. Dann sehe ich auf dem Monitor eine seltsame Wellenbewegung.

**Spektrum:** Und was war das?

**Singer:** Nach einigen Tagen Experimentierens konnten wir beweisen: Dahinter steckte, dass Zellen im visuellen Kortex gleichzeitig, also synchron, feuerten.

**Spektrum:** Was bedeutet »feuern« genau?



»Ich bin überzeugt, dass der Ertrag für die Medizin Tierversuche ethisch rechtfertigt«

## LEXIKON II

### Elektrokortikogramm

Invasive Ableitung von lokalen Hirnströmen mittels direkt in die Hirnoberfläche implantierter Elektroden.

### Großhirnrinde, Cortex cerebri

Evolutionär jüngster Teil des Großhirns bei Wirbeltieren, beim Menschen verantwortlich für höhere kognitive Leistungen. Zwei bis fünf Millimeter dick, ist sie stark gefaltet, um ihre Oberfläche von 1800 Quadratzentimetern quasi unter dem Schädel zu verstauen. Die klassische Einteilung in funktionelle Einheiten, etwa Sprachzentren oder motorische Zentren, gilt heute als grobe Vereinfachung.



### LEXIKON III

#### Homunkulus

Hier Metapher für die Existenz so genannter somatotoper Karten in der Großhirnrinde, die Regionen der Körperoberfläche bestimmten Neuronen zuweisen. Besonders prominent ist der Homunkulus im somatosensorischen (parietalen) Kortex.

#### Somatosensorischer Kortex

Regionen in der Großhirnrinde für die Verarbeitung von Tast-, Temperatur- und Schmerzreizen. Dem kanadischen Neurochirurgen Wilder Penfield (1891–1976) gelang es hier erstmals, durch direkte elektrische Reizung eine Zuordnung Punkt für Punkt von der Körperoberfläche zu bestimmten Neuronen zu zeigen.

#### Visueller Kortex

Regionen in der Großhirnrinde für die Verarbeitung von Sehinformation

**Singer:** Nervenzellen senden Aktionspotenziale aus (*Lexikon I*), normalerweise chaotisch vielstimmig. Doch wenn bestimmte Neurone einen bestimmten Reiz gemeinsam verarbeiten, erfolgt das gekoppelt. Das geschieht zum Beispiel bei einem Ensemble, das auf vertikale Kanten eines Objekts besonders anspricht, bei einem anderen Ensemble, das auf horizontale Kanten reagiert, sobald es die Signale von der Netzhaut im Auge empfängt.

**Spektrum:** War es das erste Mal, dass jemand die Ensembles konkret nachgewiesen hat?

**Singer:** Das ging so: Durch die synchrone Schwingung wird ja eine Beziehung zwischen Neuronen hergestellt. Wir haben 1989 vorgeschlagen, dass dies eine Lösung für das erwähnte Bindungsproblem sein könnte. Wir und etliche andere Gruppen konnten seither zeigen, dass sich in der Großhirnrinde tatsächlich unterschiedliche Ensembles von Zellen synchronisieren, wenn sie etwas gemeinsam verarbeiten. Oft geschieht das in einem Rhythmus von 40 Hertz, der so genannten Gamma-Oszillation. Die Synchronisationen dauern nur kurz, maximal einige hundert Millisekunden.

**Spektrum:** Wie muss man sich das vorstellen? Wenn ich ein Fußballspiel anschau, habe ich in meiner Großhirnrinde etwa ein spezielles Neuronensemble für den Fußball?

**Singer:** Sie werden die Neurone, die den Fußball repräsentieren, zu einem kohärenten Ensemble zusammenfassen müssen, sicher.

**Spektrum:** Gilt das für alle meine Sinne?

**Singer:** Ja. Auch bei Erinnerungen, Entscheidungen oder motorischen Programmen. Das Konzept hat sich seitdem enorm erweitert.

**Spektrum:** Angenommen, ich suche in meinem Gedächtnis nach Erinnerungen. Sorge ich da aktiv dafür, dass sich die richtigen Ensembles für die Bilder und Düfte aus der Vergangenheit in meinem Gehirn synchronisieren?

**Singer:** Nein, das organisiert das Gehirn schon selbst. Da gibt es Auslöser – vielleicht ein Bild oder den Duft von Madeleines –, und dann aktivieren sich Netzwerke in einem automatischen Prozess.

**Spektrum:** Mein Denken ist also überwiegend eine autonome Ensembleleistung, von deren Abläufen ich nicht viel merke?

**Singer:** Ja. Manchmal wird Ihnen zwar bewusst, dass Sie gerade nach etwas suchen. Doch oft sucht das Gehirn einfach von selbst.

**Spektrum:** Und meine Vorstellung, dass ich aktive Entscheidungen treffen kann, ist die auch nur eine Illusion?

**Singer:** Eine knifflige Frage. Denn die Signale folgen dabei so schnell aufeinander, dass es fast unmöglich ist, in solchen Systemen zwischen Ursache und Wirkung zu unterscheiden. Ich glaube, diese Frage ist im Moment nicht klärbar.

**Spektrum:** Sie haben sogar Straftätern einmal Schuldfreiheit zugesprochen.

**Singer:** Nein, das war ein Missverständnis und wurde in der Presse mehrfach falsch dargestellt. Die moderne Hirnforschung sagt zwar, ein Mörder hat im Moment des Vollzugs einer Tat nicht anders handeln können. Sonst hätte er ja anders gehandelt. Natürlich bleibt er für die Tat trotzdem verantwortlich.

**Spektrum:** Wie bitte? Sie sagten doch, er war nicht frei in der Ausführung der Tat.

**Singer:** Aber er ist ja der Urheber.

**Spektrum:** Der Täter kann sagen, das war mein Gehirn, das hat die Schuld – nicht ich.

**Singer:** Wer wären Sie denn, wenn man Ihr Gehirn von Ihnen trennte? Sie sind Ihr Gehirn, wer denn sonst. Und ja, natürlich sind Sie auch noch Ihr Körper. Sie bleiben also für Ihre Handlungen voll verantwortlich.

**Spektrum:** Kehrt die Frage nach dem omniosen Beobachter im Gehirn dann nicht auf der nächsten Ebene doch wieder zurück? Wer erkennt denn, dass gerade dieses oder jenes Ensemble synchron schwingt, und wer macht daraus ein Bild oder eine Entscheidung?

**Singer:** Das muss offenbar in der Architektur des Systems bereits fest verankert sein. Ensembles von Hirnzellen sind als komplexes raumzeitliches Muster das nicht weiter reduzierbare Korrelat von Wahrnehmungen und Entscheidungen. Sie müssen sich das so vorstellen: Das System ist ständig aktiv, alle reden die ganze Zeit mit allen. Sie erzeugen laufend unglaublich komplizierte Muster. Und jetzt kommt an einem Ende, über Ohr oder Auge, eine Nachricht herein und breitet sich im ganzen System wie ein Lauffeuer aus. Und verändert dabei überall ein wenig den Zustand. Aber nur manches davon dringt bis ins Bewusstsein.

**Spektrum:** Und wo genau steckt nun unser Bewusstsein?

**Singer:** Es sieht so aus, als gebe es dafür keinen speziellen Ort im Gehirn. Vielmehr benötigt dieser Zustand hier als Voraussetzung einen bestimmten dynamischen Zustand.

**Spektrum:** Welchen denn?

**Singer:** Wir haben dazu Versuche gemacht. Wir lassen Probanden Wörter zuordnen, die wir ihnen auf einem Bildschirm zeigen. Die Teilnehmer müssen dann entscheiden, ob bestimmte Wörter gleich sind oder nicht. Obendrein sorgen wir dafür, dass sie ein Wort mitunter auch nur unbewusst verarbeiten können. Beim Versuch verfolgen wir das EEG.

**Spektrum:** Muss man die Oszillationen nicht mit Elektroden im Gehirn messen?

**Singer:** Nein, wir wissen heute, dass auch die Ströme beim EEG Ausdruck synchroner Aktivität vieler Nervenzellen sind.

**Spektrum:** Und was kam dabei heraus?

**Singer:** Im Fall einer unbewussten Verarbeitung kommt es in lokalen Zentren der Großhirnrinde zu den genannten Gamma-Oszillationen. Wird ein Wort hingegen bewusst registriert, sehen wir im EEG hochsynchronische Oszillationen, die über sehr viele Areale der Großhirnrinde verteilt sind.

**Spektrum:** Salopp gesagt: Wenn der ganze Kopf synchron oszilliert, wird uns gerade etwas bewusst? Das klingt ziemlich abstrakt.

**Singer:** Sicher, aber mehr wissen wir nicht.

**Spektrum:** Werden wir das menschliche Gehirn je verstehen?

**Singer:** Man wird es wohl nie analytisch beschreiben können. Wir sind nicht an nicht-lineare Dynamiken angepasst, wie das Gehirn sie hat. Die sind in unserer Lebenswelt nicht besonders relevant. Daher hat uns die Evolution erst gar nicht dafür ausgerüstet, solche Prozesse intuitiv zu erfassen.

**Spektrum:** Warum hat sie uns dann überhaupt dieses nichtlineare Organ im Kopf vermacht?

**Singer:** Weil sie entdeckt hat, dass man mit nichtlinearen Operationen lineare Probleme wunderbar lösen kann.

**Spektrum:** Zum Beispiel?

**Singer:** Wenn Sie unterschiedliche Kategorien bilden wollen ...

**Spektrum:** ... das hier ist rot und eckig, das ist schwarz und rund ...

**Singer:** ... dann müssen Sie zwischen den Objekten, die zur Kategorie A und zur Kategorie B gehören, quasi eine Trennungslinie einführen. Nun haben Objekte oft sehr viele Merkmale. Um das alles auseinanderzuhalten, ist es geschickt, wenn der Repräsentationsraum für die Verarbeitung hochdimensional ist und Information nichtlinear verarbeitet wird.

**Spektrum:** Kann der Mediziner Singer heute auch Patienten besser helfen?

**Singer:** Wir haben zumindest Ansätze für neue Erklärungen, etwa bei Schizophrenen. Diese Patienten verbinden Dinge, die nicht verbunden gehören, und umgekehrt. Und tatsächlich finden wir, dass sie Gamma-Oszillationen nicht gut erzeugen und synchronisieren können. Die Folge könnte sein, dass das Gehirn um jeden Preis versucht, etwas zu binden, was nicht zusammengehört, und dass es so zu den Halluzinationen kommt. Bis zu einer Therapie ist es aber noch ein weiter Weg.

**Spektrum:** Der Neurologe Karl Deisseroth von der Stanford University hat offenbar gezeigt, dass Mäuse, bei denen in bestimmten Hirnregionen von außen Gamma-Oszillationen angeregt werden, Sinnesreize besser wahrnehmen.

**Singer:** Ja, das war wunderbar. Es hat uns sehr befriedigt, dass Deisseroth eine kausale Evidenz für unsere These erbringen konnte.

**Spektrum:** Bei manchen Patienten mit Parkinson oder Depressionen implantieren Spezialisten bereits Elektroden, um das Leiden zu lindern. Wie schätzen Sie solche Maßnahmen ein? Das lädt ja auch zum Missbrauch ein.

**Singer:** Das ist doch heute noch pure Fiktion. Zudem sind bei all diesen Therapieversuchen operative Eingriffe erforderlich, die der Zustimmung des Patienten bedürfen.

**Spektrum:** Unser Denken, so verstehe ich das jetzt, ist ein Produkt autonomer Hirnströme. Vertreibt die Forschung damit den Menschen auch noch aus seinem Gehirn?

**Singer:** Ich sehe darin keinen Verlust meiner Menschenwürde. Im Gegenteil, ich lerne immer mehr das Staunen. War es nicht sogar mit allen wissenschaftlichen Durchbrüchen so? Also die Erkenntnis, dass wir mit der Erde nicht im Mittelpunkt des Weltalls stehen und dass wir als Lebewesen nur ein Zufallsergebnis der Evolution sind. Das mag kränkend für unseren Narzissmus gewesen sein, aber es schmerzt uns heute nicht mehr. Und von mehr Bescheidenheit können wir nur profitieren.

**Spektrum:** Wie?

**Singer:** Wirtschaftliche und politische Systeme agieren ähnlich komplex und nichtlinear wie das Gehirn. Eine zentralistische Steuerung ist da kaum möglich. Schaffen wir also besser eine hohe Variabilität und lassen wir die gesellschaftlichen Prozesse selbst die beste Lösung finden. Hätten wir von vornherein die Finanzmärkte nach solchen Kriterien organisiert, hätten nicht einige wenige diese riesigen finanziellen Transaktionen machen dürfen, die im letzten Jahr zum großen Crash führten.

**Spektrum:** Was macht denn diese Flagge von Tibet hier? Die hing doch nicht etwa bei Olympia 2008 im MPI aus dem Fenster?

**Singer:** Nein, die hat mir ein Freund von einer Reise mitgebracht.

**Spektrum:** Ich habe gelesen, das Mind & Life Institute, wo Buddhisten und Neurobiologen über die richtige Lebensführung diskutieren, nennt Sie als Mitglied. Sind Sie Buddhist?

**Singer:** Nein, nein. Aber ich sammelte etwas Erfahrung. Ich war vor Jahren an einem stillen Ort im Schwarzwald, um Zen-Meditation zu erproben, und war überrascht, was das mit einem macht.

**Spektrum:** Für Buddhisten ist die Meditation angeblich ein Weg zur Erleuchtung und zum Glück. Was ist für Sie Glück?

**Singer:** Im Gehirn ist das vielleicht ein hochkohärenter Zustand. Am ehesten widerfährt er mir in raren Momenten eines Heureka. Das ist dieser Augenblick in der Forschung, wenn man weiß: Jetzt passt's. Manchmal erlebe ich das auch beim Hören von Musik. ◀



»Glück ist im Gehirn vielleicht ein hochkohärenter Zustand. Ich erlebe es in der Forschung, wenn man weiß: Jetzt passt's«



**Bernhard Epping** ist promovierter Biologe. Er lebt als freier Wissenschaftsjournalist in Tübingen.

Weitere Infos und Literatur über die Seite des Instituts:

[www.mpih-frankfurt.mpg.de/global/Np/Staff/singer\\_d.htm](http://www.mpih-frankfurt.mpg.de/global/Np/Staff/singer_d.htm)

Weblinks zu diesem Thema

finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/1002943](http://www.spektrum.de/artikel/1002943).



## Die Zukunft der Energieversorgung

Unsere Anfang des Jahres gestartete neue Rubrik soll Wege zur Schaffung einer verbesserten, umweltfreundlichen Version des Planeten Erde aufzeigen. Die aktuelle Ausgabe befasst sich in drei Beiträgen mit einem der am schwierigsten zu lösenden Probleme: dem Ersatz der fossilen Energieträger, deren Nutzung das Erdklima massiv bedroht, durch regenerative Quellen für Elektrizität und Kraftstoffe.



### INHALT

#### DESERTEC

#### **Strom aus der Wüste** S. 81

Das 400-Milliarden-Projekt Desertec soll Sonnenenergie aus Sahara und Arabischer Wüste in Strom für Europa umwandeln. Wie sinnvoll ist der Plan? Dazu äußert sich Hans Müller-Steinhagen, Mitbegründer des Projekts, im Interview mit »Spektrum«

#### FOTOVOLTAIK

#### **Die perfekte Solarzelle** S. 84

Neue Fotovoltaikmodule arbeiten effektiver als gängige oder benötigen weniger teures Silizium bei gleichem Wirkungsgrad. Kommt bald die Solarwende?

#### BIOTREIBSTOFFE

#### **Grasolin an der Tankstelle** S. 88

Aus potenziellen Nahrungsmitteln wie Mais, Zuckerrohr oder Palmöl Benzin zu gewinnen ist problematisch. Doch inzwischen lassen sich auch Ernteabfälle, Holz und Gräser in Biokraftstoffe verwandeln

THOMAS KLING, MIT FROL. GER. VON H. MÜLLER-STEINHAGEN



Der Verfahrenstechniker Hans Müller-Steinhagen lehrt Thermodynamik und Wärmetechnik an der Universität Stuttgart und leitet das dortige Institut für Technische Thermodynamik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt. Zu seinen Forschungsschwerpunkten gehört die solarthermische Stromerzeugung.

### STICHWORT: SOLARTHERMIE

**Solarthermische Kraftwerke** konzentrieren Sonnenlicht und verdampfen damit Wasser, um Dampfturbinen anzutreiben, die Strom erzeugen. Um das Licht zu bündeln, gibt es verschiedene Konzepte: Bei Turmkraftwerken konzentrieren tausende Spiegel das Sonnenlicht auf einen Punkt, bei Parabolrinnenkraftwerken werfen Spiegel ihr Licht auf lange Röhren, die von einer Flüssigkeit durchströmt werden. Die Wärme kann nachts in großen Speichern mit flüssigem Salz oder in solchen aus Beton gebunkert werden. Auf diese Weise lässt sich auch der Grund- und Regellastbedarf im Stromnetz decken, was bei Fotovoltaik und Windrädern nicht möglich ist. Solarthermische Kraftwerke der ersten Generation verrichten seit 25 Jahren ihren Dienst, etwa in Kalifornien und neuerdings auch in Spanien. So versorgt allein das Anfang 2009 in Südspanien in Betrieb gegangene Andasol-1-Kraftwerk 200 000 Haushalte mit Strom. Gemäß dem Desertec-Konzept würde solarthermisch erzeugte Energie mittels 20 Hochspannungsgleichstromleitungen nahezu verlustfrei aus Nordafrika nach Europa übertragen.

# STROM aus der Wüste

Bis 2050 sollen 15 Prozent des europäischen Strombedarfs durch Sonnenenergie aus den Wüsten Nordafrikas und des Nahen Ostens gedeckt werden: So lauten die Ziele des nicht unumstrittenen 400-Milliarden-Projekts Desertec – ein Kunstwort aus *desert* (Wüste) und *technology*. Im Interview mit »Spektrum der Wissenschaft« erläutert Hans Müller-Steinhagen, Solarthermie-Experte und einer der Väter des Konzepts, warum Desertec ohne Alternative ist.

## FORTSCHRITT ODER FATA MORGANA?

Die Idee, Ökostrom für Europa in großem Maßstab in der Wüste zu gewinnen, fasziniert. Doch längst werden auch Zweifel bis hin zu offener Ablehnung laut. Worin liegen die Chancen und wo die Gefahren von Desertec? Stimmen Sie ab und **diskutieren Sie mit auf [www.spektrum.de/desertec](http://www.spektrum.de/desertec)**

**Spektrum der Wissenschaft:** In den letzten Wochen gab es ein großes Medienecho um Ihr Projekt Desertec. Warum gerade jetzt, wo doch die Solarthermie seit vielen Jahren entwickelt und längst eingesetzt wird, etwa in Demonstrationskraftwerken in Spanien?

**Prof. Hans Müller-Steinhagen:** Die Münchener Rückversicherung hat kürzlich eine Initiative gestartet, um große Unternehmen in Deutschland zusammenzubringen, darunter die Energiekonzerne E.ON und RWE, aber auch Siemens, die Deutsche Bank sowie die Vertreter einiger Bundesministerien. Momentan umfasst das Desertec-Konsortium zwölf große Konzerne, darunter zwei aus dem Ausland. Bei einem ersten Treffen am 13. Juli wurde vereinbart, bis Herbst eine Geschäftsstelle einzurichten, die in den kommenden drei Jahren rechtliche und politische Rahmenbedingungen erarbeitet, die aktuellen Kosten genauer errechnet und nach möglichen Standorten sucht.

**Spektrum:** Sogar der Solar-Befürworter Hermann Scheer glaubt nicht an die technische Umsetzbarkeit.

**Müller-Steinhagen:** Da ist er offenbar nicht ausreichend mit der Technik solarthermischer

Kraftwerke und den Details des Konzepts vertraut. Wir haben ihn bereits mehrfach zu einem klärenden Gespräch eingeladen, aber bislang leider keine Antwort erhalten. Vielleicht ist seine ablehnende Haltung auch politisch begründet. Anders als Herr Scheer halten wir es für erforderlich, zusätzlich zu einer dezentralen, fluktuierenden Stromerzeugung durch Photovoltaik und Windkraft weiterhin große, zentrale Stromerzeugungsanlagen zu betreiben. Nur so können wir der Industrie jederzeit und planbar ausreichend Strom zur Verfügung stellen.

**Spektrum:** Auch einige große Energiekonzerne sind nicht im Konsortium. Lars Göran Josefsson, Vorstandsvorsitzender von Vattenfall und Klimaschutzbeauftragter der Bundesregierung, hält Desertec ebenfalls für einen Fehler.

**Müller-Steinhagen:** Jeder verfolgt natürlich seine eigenen Interessen und kann seine Meinung frei äußern – Vattenfall muss sich im Augenblick sicherlich bevorzugt um die Zuverlässigkeit seiner derzeitigen Stromerzeugungstechnologien kümmern. Ganz allgemein wurden aus pragmatischen Gründen nicht alle Unternehmen der Branche für die Anfangsphase zur Teilnahme angefragt. Aber ich habe in den letzten Wochen viele Anrufe von Forschungsinstituten, kleinen und großen Unternehmen bekommen, die begeistert sind und unbedingt mitmachen wollen.

Die EU-Kommission und Länder wie Frankreich, Spanien und Algerien unterstützen das Konzept ebenfalls. Schließlich ist es das Ziel, bis 2050 rund 15 Prozent des Strombedarfs in ganz Europa aus der Solarthermie zu decken. Das wird Investitionen von etwa 400 Milliarden Euro erfordern und ist folglich nicht von Deutschland allein zu stemmen. Das sehen auch die betroffenen Bundesministerien so, die hochrangig bei dem ersten Treffen dabei waren und die alle ihre Unterstützung bekundet haben.

**Spektrum:** Sie gelten als einer der Erfinder von Desertec und sind seit Jahren ein glühender Verfechter des Konzepts. Warum brauchen wir Sonnenstrom aus der Wüste, zumal wenn er eine derartige Investition erfordert?

**Müller-Steinhagen:** Alle Kraftwerke, die in den nächsten 40 Jahren gebaut werden müssen, erfordern Investitionen. Nicht auch auf Solarthermie zu setzen, dürfte aber mittelfristig eher teurer werden. Es gibt in Deutschland einfach nicht zu jeder Zeit genügend regenerative Energiequellen, um damit Grundlaststrom bereitzustellen oder Lastspitzen abzudecken. Die Sonne scheint eben nicht nachts, der Wind weht schließlich nicht immer, und preisgünstige Verfahren zur Speicherung großer Strommengen etwa in Batterien oder Was-



SOLAR MILLENIUM AG

Mit 510 000 Quadratmetern Kollektorfläche ist Andasol 1 in der spanischen Provinz Granada, das Anfang 2009 seinen regulären Betrieb aufgenommen hat, das größte solarthermische Kraftwerk in Europa. Parabolspiegel konzentrieren das Sonnenlicht auf Röhren, in denen synthetisches Öl auf 400 Grad erhitzt wird. Über Wärmetauscher erzeugt es entweder Dampf für Generatoren oder gibt seine Energie an einen Salzschnmelze-Speicher ab, aus dem sie nachts zur Stromgewinnung rückgespeist wird. Die beiden Tanks im Bild fassen insgesamt 28 500 Tonnen Salz.

serstoffspeichern sind noch in weiter Ferne. Im Unterschied dazu wird Desertec Grundlast- und Regelstrom liefern können, der kurzfristige Bedarfsschwankungen im Netz ausgleicht. Denn Wärme lässt sich speichern, um sie nachts wie auch bei bewölktem Himmel abzurufen und in Strom umzuwandeln.

**Spektrum:** Wird der Ausbau von Fotovoltaik und Windenergie in Deutschland überflüssig?

**Müller-Steinhagen:** Auf keinen Fall. Wenn etwa 15 Prozent des europäischen Strombedarfs durch Solarthermie aus Wüstengegenden gedeckt werden, bleiben noch 85 Prozent übrig. Insofern ist es weiterhin wichtig, Offshore-Windparks und Fotovoltaik auf Gebäuden auszubauen. Auf keinen Fall sollten wir die Technologien gegeneinander ausspielen.

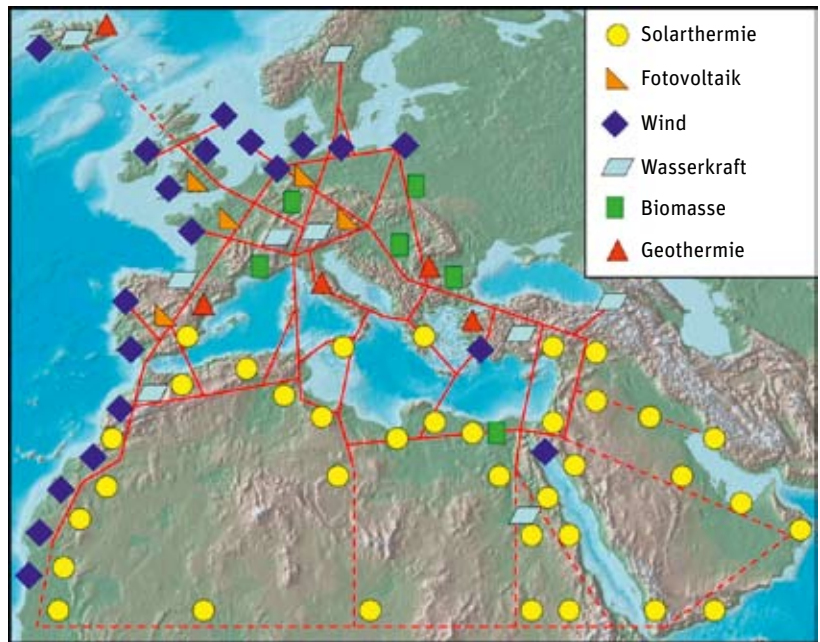
**Spektrum:** Könnte das nicht doch passieren, weil es eine Selektion über die Kosten gibt? Solarzellen erzeugen wohl bald Strom zu den Kosten konventioneller Kraftwerke. Wozu dann noch Desertec?

**Müller-Steinhagen:** Strom aus einem Kohlekraftwerk kostet heute vier bis sechs Cent pro Kilowattstunde. Wir rechnen damit, dass Fotovoltaik in einigen Jahren hier zu Lande die so genannte *grid parity* erreicht, das heißt, dass der damit erzeugte Strom nur noch so viel kostet wie der von den Energiekonzernen an den Kleinverbraucher verkaufte Strom; zurzeit sind das etwa 20 Cent.

Das ist zwar toll für den Hausbesitzer, der damit einen erheblichen Teil seines eigenen Stromverbrauchs selbst deckt und bei Bedarf zusätzlich Strom aus dem Netz bezieht. Andererseits ist es unbedingt notwendig, ein Kostenminimum für eine jederzeit gesicherte, umweltverträgliche Stromversorgung der gesamten Volkswirtschaft zu finden. Und da hat planbarer Strom wie zum Beispiel aus solarthermischen Kraftwerken, der rund um die Uhr zur Verfügung steht, einen höheren Wert, was sich auch in den Tarifen bereits existierender Anlagen in Spanien und den USA niederschlägt. Es muss also darum gehen, Strom aus erneuerbaren heimischen Energiequellen wirtschaftlich sinnvoll einzusetzen und die verbleibende Versorgungslücke möglichst umweltfreundlich zu decken. Und dabei werden solarthermische Kraftwerke einen erheblichen Beitrag leisten.

**Spektrum:** Kritiker halten die Solarthermie für unsicher. Vattenfall-Chef Josefsson fürchtet sogar terroristische Anschläge auf Kraftwerke und Stromleitungen.

**Müller-Steinhagen:** Bis 2050 sollen nach unseren Plänen 20 Leitungen à fünf Gigawatt eingerichtet werden, die Energie auf verschiedenen Routen aus ganz Nordafrika und dem Nahen Osten nach Europa transportieren.



Auch die Kraftwerke werden auf viele Länder verteilt. Durch diese regionale Streuung dürfte das Risiko ziemlich gering sein, jedenfalls nicht größer als beim Transport von Öl in einem Tanker oder von Erdgas in einer Pipeline. Insgesamt wird die Streuung der Energiequellen das Versorgungsrisiko reduzieren.

**Spektrum:** Es gibt Stimmen, die den an Desertec beteiligten Firmen Solarimperialismus vorwerfen. Statt Öl werde nun die Sonne ausgebeutet.

**Müller-Steinhagen:** Das ist absurd, schon allein weil die Sonne unerschöpflich ist und wir ja niemandem etwas wegnehmen. Natürlich sind an Desertec große Unternehmen mit wirtschaftlichen Interessen beteiligt – zum Glück, wie ich finde. Denn so erhält das Projekt zusätzlichen Antrieb, und der ist dringend nötig, wenn wir etwas für den Klimaschutz und die Diversifizierung unserer Energieversorgung tun wollen.

Was die Kritiker verkennen: Am meisten werden die Staaten in Nordafrika profitieren. Deren Energiebedarf wird nach unseren Berechnungen bis 2050 auf das Fünffache steigen und die Voraussetzung für einen höheren Lebensstandard sein. Mit Desertec unterstützen wir das, weil die ersten Kraftwerke ihren Strom in die lokalen Netze speisen werden, wo sie auch Meerwasserentsalzungsanlagen zur Trinkwasserbereitstellung betreiben können.

Später werden die heute wirtschaftlich schwachen Länder Nordafrikas ihren eigenen Strom- und Wasserbedarf mit dieser Technik umweltverträglich decken, zusätzlich Strom exportieren und damit nachhaltig ihren Wohlstand steigern. Das ist aus meiner Sicht die beste Entwicklungshilfe. ◀

**Erst im Verbund Europas mit dem Nahen Osten und Nordafrika können regenerative Energiequellen ihr Potenzial ausspielen, glaubt das Desertec-Konsortium.**



Das Interview führte der Wissenschaftsjournalist **Bernd Müller**.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/1002945](http://www.spektrum.de/artikel/1002945).

# Die PERFEKTE ZELLE

Neue Fotovoltaikmodule arbeiten effektiver als gängige oder benötigen weniger teures Silizium bei gleichem Wirkungsgrad. Kommt bald die Solarwende?

Von Sascha Rentzing

**A**uch wenn Rezession und Bankenkrise derzeit unsere Hauptsorgen zu sein scheinen, gibt es mittel- und langfristig größere Probleme: Der Verbrauch von Öl, Gas und Kohle steigt weiter, und damit nimmt auch die Erderwärmung zu. Würden alle fossilen Energieressourcen verbrannt, dürfte der Temperaturanstieg Teile der Erde unbewohnbar machen – so lauten Schätzungen des Klimarats der Vereinten Nationen. Sogar die Internationale Energieagentur, die bislang als enger Verbündeter der Kraftwerksbetreiber galt, fordert daher in ihrem letzten World Energy Outlook (2008) eine »globale Energierevolution«.

Die Solarindustrie will dabei laut Anton Milner, Vorstand des Europäischen Fotovoltaikindustrie-Verbands EPIA, eine Vorreiterrolle einnehmen: Sonnenkraftwerke mit 350 Gigawatt Gesamtleistung sollen bis 2020 jährlich gut 420 Terawattstunden beziehungsweise zwölf Prozent des in Europa benötigten Stroms liefern. Kein bescheidenes Ziel, steuern Solaranlagen doch EU-weit ebenso wie

global betrachtet aktuell nicht einmal ein Prozent zur Stromversorgung bei, und das auch nur, weil Regierungen die teure Technik fördern. Aber spätestens 2015 soll sich, so die Vorstellung der EPIA, Sonnenenergie dank sinkender Erzeugungskosten auch in sonnenärmeren Ländern rechnen. In Deutschland läge diese Latte bei etwa 20 Cent pro Kilowattstunde, aktuell kostet der Solarstrom hier zu Lande noch das Doppelte. Allerdings hält das Erneuerbare-Energien-Gesetz den Preis künstlich hoch, um der Branche durch das lukrative Einspeisen des Ökostroms ins Netz einen Wettbewerbsvorteil zu verschaffen.

Doch vielleicht wird das in absehbarer Zeit nicht mehr erforderlich sein. Denn auf der einen Seite fällt dank steigender Produktionszahlen und effizienterer Herstellungsverfahren der Preis für kristallines Silizium, dem Standardhalbleiter für die Stromgewinnung aus Licht (Kasten S. 87); auf der anderen arbeiten die Zellen immer effektiver, was den Materialeinsatz reduziert. Jeder Prozentpunkt Wirkungsgrad senkt, so eine Faustregel, die Kosten um fünf bis sieben Prozent, da pro Watt Leistung weniger Zell- beziehungsweise Modulfläche benötigt wird. »Derzeit erreichen Siliziumsolarzellen eine Effizienz von durchschnittlich 16,5 Prozent – dieser Wert kann sicher auf deutlich über 20 Prozent wachsen«, bekräftigt Eicke Weber, Leiter des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme (ISE) in Freiburg.

Zu den neuesten Errungenschaften zählt eine Umorganisation der elektrischen Anschlüsse, die so genannte Rückkontaktzelle. Elektronen, die durch das einfallende Licht im Halbleiter generiert werden, müssen Metallkontakte erreichen und von dort abgeleitet werden. Eine mit Phosphor angereicherte und für Elektronen gut leitende »Emitterschicht« hat deshalb die Aufgabe, frei gewordene Ladungsträger zu sammeln und dorthin weiterzureichen. Weil diese unterwegs abgefangen werden können, befinden sich Kontakte und Emitter meist auf der

Lichtaktive dünne Schichten aus halbleitenden Verbindungen an Stelle des Siliziums gehören zu den Hoffnungsträgern der Solarindustrie. In Laseranlagen wie dieser werden die aufgedampften Schichten strukturiert.



OBERLICHEN SOLAR





CONCENTRIX SOLAR

vom Licht beschienenen Zellvorderseite. Die elektrischen Anschlüsse werfen aber Schatten und verringern so die Ausbeute. Einige Unternehmen haben deshalb die Emitterschicht samt Kontakten auf die Rückseite verbannt. Die amerikanische Firma Sunpower erreicht allein dadurch bereits 22 Prozent Wirkungsgrad – das ist Weltrekord für eine in Serie gefertigte Zelle. Die niedersächsische Firma Stiebel Eltron plant ebenfalls die Produktion einer vom Institut für Solarenergieforschung in Hameln (ISFH) entwickelten Rückkontaktzelle mit mehr als 20 Prozent Wirkungsgrad.

### Laser für die Lichtfänger

Für diese Technik ist aber monokristallines Silizium großer Reinheit nötig, denn an Unregelmäßigkeiten in der Kristallstruktur gehen vom Licht erzeugte Ladungsträger verloren. Doch solches Material erfordert einen komplizierten und langwierigen Herstellungsprozess und ist dementsprechend teuer. Problematisch ist bei der Rückseitenkontaktierung auch, dass nun die elektrischen Anschlüsse beider Pole ineinander verschachtelt werden müssen, um Kurzschlüsse zu vermeiden. Deshalb sind weitere Prozess- und Justierschritte erforderlich. Sunpower hat den optimalen Prozess für seine Zellen offensichtlich noch nicht gefunden: Nach Schätzungen lagen die Herstellungskosten im vergangenen Jahr bei

etwa 50 Cent pro Watt Leistung, während die Konkurrenz im Mittel für 32 Cent fertigte.

Stiebel Eltron will kosteneffizienter sein. Das kooperierende ISFH hat nach Angaben von Jan Schmidt, Gruppenleiter Fotovoltaikmaterialien, dafür einen Trick gefunden. Statt die elektrischen Kontakte mittels Pasten aufzudrucken, arbeitet zunächst ein Laser Höhenunterschiede in den Halbleiter, darauf scheiden sich die Leitungsbahnen aus einer Dampfphase ab. Weil dabei kein mechanischer Druck ausgeübt wird, lassen sich dünnere und damit preiswertere Wafer verwenden.

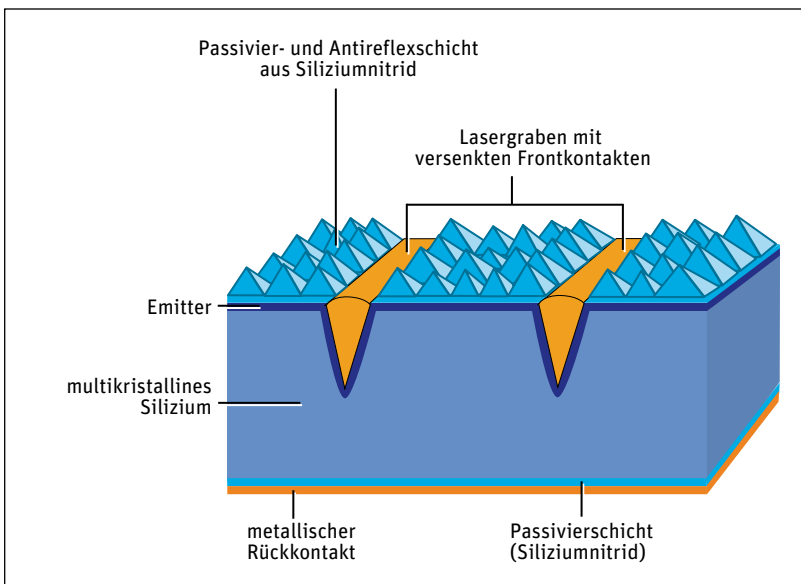
Multikristallines Silizium ist um bis zu 30 Prozent billiger. Deshalb haben das ISFH und das ISE die so genannte EWT-Zelle (*Emitter-Wrap-Through*) entwickelt. Ein Laser bohrt Tausende von Löchern in den Halbleiter, die mit Emittiermaterial gefüllt werden. Weil nun überall die Sammelschicht in den Kristall ragt, müssen die freigesetzten Ladungsträger kürzere Wegstrecken zurücklegen – das kompensiert den Effekt der nicht einheitlichen Kristallstruktur.

Der zusätzliche Prozessschritt erhöht natürlich die Fertigungskosten, die Stromausbeute beträgt aber schon 18 Prozent. Industriepartner Q-Cells aus Thalheim will diesen Aufbau serienreif machen. Zum Vergleich: Q-Cells' multikristalline Zellen mit Standardaufbau kommen zurzeit auf 14,1 Prozent Wirkungsgrad.

**Konzentratorzellen fokussieren Licht mit wenige Zentimeter großen Linsen nahezu 500-fach verstärkt auf leistungsstarke Solarzellen. So genannte Tracker (unten) führen die Module mechanisch der Sonne nach.**

CONCENTRIX SOLAR





**Drei Tricks, um die Effizienz der Lichtumwandlung zu steigern, vereint diese Zelle: Pyramidale Strukturen der Oberfläche verringern Reflexionen, Kontakte auf der Rückseite Abschnürungen. Damit die Ladungsträger rasch zum Emitter wandern können, wurde die gut leitende Emitterschicht über lasergebohrte Gräben in den Kristall eingelassen.**

Doch nicht nur durch Verbannung der Kontakte auf die Rückseite lassen sich höhere Ausbeuten erreichen. Der japanische Konzern Sanyo kombiniert kristallines Silizium mit Dünnschichttechnik: Er bringt auf beiden Seiten eines hochreinen, nur 0,2 Millimeter dicken monokristallinen Wafers amorphes Silizium auf. Auf der Front dient es als Emitter, auf der Rückseite als Passivierschicht: Sie wirkt für Elektronen als Barriere, während deren Gegenstücke, die positiven Defektelektroden, ungehindert zu den Elektroden abfließen und somit nicht mehr rekombinieren können. Mit dieser Materialkombination erreicht Sanyo in der Serienproduktion 20 Prozent, im Labor sogar 22 Prozent Wirkungsgrad mit 0,085 Millimeter dicken Wafers, was Kostensenkungen erwarten lässt.

Eine weitere Methode, Solartechnik preiswerter zu machen, bietet der Ersatz des Siliziumkristalls durch 100-mal dünnere fotoaktive Schichten aus Kadmium-Tellurid (CdTe) oder CIS (die Abkürzung steht für halbleitende Verbindungen aus Kupfer, Indium und Gallium sowie Selen oder Schwefel). Statt Siliziumblöcke zu züchten, in Scheiben zu sägen und

diese in vielen Schritten zu Zellen zu verarbeiten, dampfen die Produzenten von Dünnschichtmodulen die Lichtfänger zwei Nanometer dick auf Glas oder Folie auf. Marktführer ist die amerikanische Firma First Solar, deren CdTe-Module in der Fertigung nach eigenen Angaben 93 US-Cent, also rund 68 Cent pro Watt Leistung kosten (Stand: Juli 2009). Damit liegt das Unternehmen weit unter den heute durchschnittlichen Produktionskosten für Solarmodule von rund zwei Euro pro Watt Leistung.

Die einfachere Fertigung erkaufen sich die Hersteller mit einem sehr viel geringeren Wirkungsgrad von durchschnittlich nur 10,8 Prozent. Um die gleiche Strommenge zu erzeugen wie kristalline Module, benötigen sie daher größere Flächen. Deren teurere Installation kompensiert die geringeren Produktionskosten teilweise. Durch bessere Absorberschichten will First Solar den Wirkungsgrad seiner Module aber bis 2012 auf zwölf Prozent erhöhen, gleichzeitig die Fertigung optimieren und so den Modulpreis auf 50 Cent pro Watt Leistung senken. Die Aussicht auf derart preiswerte Solartechnik verleitet Wissenschaftler zu kühnen Visionen: Laut dem Solar Grand Plan, einer strategischen Zukunftsstudie amerikanischer Forscher zur Deckung des Strombedarfs der USA aus Sonnenkraftwerken, sollen 2050 CdTe-Module mit 3000 Gigawatt Leistung vier Fünftel des in den Vereinigten Staaten benötigten Stroms liefern (Spektrum der Wissenschaft 3/2008, S. 60).

Einen Mittelweg bieten Module, die als fotoaktive Schicht amorphes Silizium nutzen. Oerlikon Solar, ein Schweizer Hersteller von Produktionsmaschinen für diese Technik, verspricht, dass die in seinen Anlagen fabrizierten Zellen bis 2010 in den meisten Regionen der Welt Solarstrom zu den gleichen Kosten wie von konventionellem Netzstrom liefern werden. Dafür sollen die Fertigungskosten auf 44 Cent pro Watt halbiert werden. Der preiswerten Herstellung steht allerdings auch hier ein niedriger Wirkungsgrad der Module von

## DIE KONKURRENTEN AUF EINEN BLICK

	kristallines Si	multikristallines Si	CdTe	CIS	mikro-Si/amorphes Si
von der Industrie erreichte Effizienz (in Prozent)	19,6	18,5	11,1	12	9
erreichbare Effizienz (in Prozent)	> 20	< 20	18	18	15
Herstellungskosten (in €/Wh)	2	1,5 – 2	0,68	2	1
erwartete Herstellungskosten (€/Wh)	< 0,5	< 0,5	< 0,3	< 0,3	< 0,3

nur sieben Prozent gegenüber. Amorphes Silizium scheidet sich, wie der Name schon sagt, in einer ungeordneten Struktur ab. Zahlreiche aufgebrochene Siliziumverbindungen fangen Elektronen ab. Mit Hilfe einer zusätzlich aufgedampften Schicht aus mikrokristallinem Silizium hat Oerlikon den Wirkungsgrad auf 9,3 Prozent verbessert. Mikrokristallines Silizium besteht aus vielen kleinen Siliziumkristallen, die Licht vor allem im infraroten Bereich absorbieren. Da die amorphe Schicht den sichtbaren Teil des Spektrums nutzt, beutet das Tandem Sonnenenergie insgesamt besser aus.

Das größte Potenzial aller Dünnschichttechniken wird jedoch CIS-Modulen zugesprochen: Das National Renewable Energy Laboratory der USA erreichte damit einen Wirkungsgrad von 20,3 Prozent – keine andere Dünnschichttechnik kann da bislang mithalten. Allerdings sind industriell gefertigte Paneele noch weit von diesem Wert entfernt, und bei den Produktionskosten hat sich die Technik noch nicht von der konventionellen Konkurrenz abgesetzt: 30 Cent pro Watt Leistung gelten als erreichbar, derzeit liegen die Kosten aber noch bei rund zwei Euro. Stärker automatisierte Prozesse und eine größere Produktionsmenge sollen die Kosten deutlich senken. So erforscht das Stuttgarter Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (ZSW) wirtschaftlichere Verfahren zur Halbleiterabscheidung, dem teuersten Herstellungsschritt.

### Viel versprechende Fokussierung

Vor allem in südlichen Ländern mit ihrer viel direkteren Sonneneinstrahlung könnten so genannte Konzentratorsysteme den beschriebenen Techniken Marktanteile streitig machen. Darin fokussieren in die Module integrierte Spiegel oder Linsen das Licht auf die eigentlichen Zellen. Dank dieses Tricks genügen sehr kleine Abmessungen, das spart Halbleitermaterial – meist kommen Elemente der dritten und fünften Gruppe des Periodensystems wie Gallium, Indium, Phosphor und Arsen zum Einsatz –, und das wiederum senkt die Kosten. Die effizientesten Stapelzellen erreichen mehr als 40 Prozent Wirkungsgrad, Verluste bei der Verschaltung zu einem Modul senken die Effizienz auf 25 bis 30 Prozent. Doch selbst damit arbeitet solch ein Konzentrador immer noch effizienter als andere derzeit gängige Solarmodule.

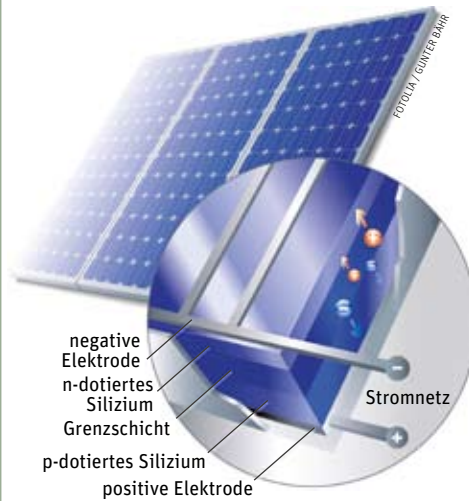
Allerdings ist die Produktion schwierig, denn Linsen und Zellen müssen auf wenige Millimeter genau zueinander ausgerichtet sein. Präzision ist später auch beim Kraftwerksbetrieb gefragt. Die Linsen bündeln das Licht nur bei senkrechtem Lichteinfall und werden

## DIE LICHTWANDLER

**Die Energiegewinnung mit Solarzellen** beruht auf dem photovoltaischen Effekt, den so genannte Halbleiter bei Lichteinfall zeigen: Weil in diesen Kristallen Elektronen vorkommen, die nur schwach in den Atomen des Halbleiters gebunden sind, genügt die eingestrahlte Energie, um sie zu lösen und als elektrischen Strom verfügbar zu machen. Durch den Einbau von Fremdatomen in einem Gitter (fachlich: Dotierung) wird dies noch unterstützt.

Meist dient einkristallines Silizium, zu etwa 0,2 Millimeter dicken »Wafeln« geschnitten, als Ausgangsmaterial. Die freigesetzten Elektronen gelangen über

eine mit Phosphor dotierte, negativ leitende Schicht, den so genannten Emitter, zur Oberfläche; an der mit Bor dotierten Unterseite entsteht eine positive Ladungszone. Über ein feines Netz von Kontakten auf der Front (Minuspol) und einen großflächigen Kontakt auf der Rückseite (Pluspol) wird der Strom abgeführt.



**Jedes Fotovoltaikmodul besteht aus einem Raster von Zellen.**

deshalb auf »Trackern« montiert, die sie der Sonne nachführen. Die deutsche Firma Concentrix Solar, die aus dem ISE hervorgegangen ist und weltweit als einzige solche Anlagen bereits serienmäßig fertigt, hat in Spanien schon 100 Systeme mit 600 Kilowatt Gesamtleistung ans Netz gebracht. Die Freiburger rechnen allerdings mit starker Konkurrenz. Weltweit arbeitet über ein Dutzend Unternehmen an Licht bündelnden Systemen, manche, wie die kanadische Firma Morgan Solar, nutzen dazu preiswertes Acryl.

Im Rennen um den Platz an der Sonne liegen damit viele verschiedene Solartechniken in aussichtsreicher Position. Welche am ehesten mit fossilen Energien konkurrieren und Strom für fünf bis zehn Cent pro Watt herstellen kann, ist derzeit nicht absehbar, denn alle weisen noch hohes Kostensenkungspotenzial auf. Dünnschichttechniken verbilligen die Fertigung, Siliziummodule und Konzentrator-Kraftwerke versprechen Preisvorteile durch steigende Wirkungsgrade. Hält die Branche das Wachstums- und Innovations-tempo der vergangenen Jahre, wird Solarstrom schon 2015 in vielen Regionen der Erde zu gleichen Preisen wie konventionell erzeugter Netzstrom angeboten werden können und einige Jahre später konkurrenzlos günstig erzeugt werden können. ◀



**Sascha Rentzing** studierte Publizistik an der Universität Münster. Er arbeitet als Technikjournalist in Dortmund.

**Sellmann, T.:** Photovoltaik: Strom ohne Ende. Solarpraxis, Berlin 2009.

**Witzel, W., Seifried, D.:** Das Solarbuch: Fakten und Strategien für den Klimaschutz. Ökobuch, Staufen, 3. Auflage 2007.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/999557](http://www.spektrum.de/artikel/999557).

# GRASOLIN

## an der Zapfsäule

Aus potenziellen Nahrungsmitteln wie Mais, Zuckerrohr oder Palmöl Benzin zu gewinnen ist problematisch. Doch inzwischen lassen sich auch Ernteabfälle, Holz und Gräser in Biokraftstoffe verwandeln.

### In Kürze

- **Biokraftstoffe der zweiten Generation** aus nicht essbaren Pflanzenteilen bilden kurzfristig die umweltfreundlichste und technologisch aussichtsreichste **Alternative zu Mineralöl**.
- Ausgangsmaterial für dieses »Grasolin« werden überwiegend **Ernteabfälle** wie Maisstängel, unkrautartig wachsende Energiepflanzen und Restholz sein.
- Vorsichtigen Schätzungen zufolge könnte die gewinnbare **zellulosehaltige Biomasse** weltweit mehr als genug Kraftstoff liefern, um den globalen Bedarf komplett zu decken.

Von George W. Huber und Bruce E. Dale

**D**ie letzten Jahre haben immer deutlicher gezeigt, dass der Westen seine Abhängigkeit vom Erdöl verringern muss. Sie schränkt den politischen Handlungsspielraum ein, belastet durch unkalkulierbare Preissprünge die Wirtschaft und schadet wegen der Emission von Treibhausgasen dem Klima. Doch unsere Gesellschaft ist weiterhin auf hohe Mobilität angewiesen. Neuartige Kraftstoffe sind also gefragt. Dieselöle auf Zellulosebasis, hergestellt aus nicht essbaren Pflanzenteilen, bieten die ökologisch attraktivste Alternative zum Petroleum. Außerdem ist ihre Produktion kurzfristig technisch realisierbar.

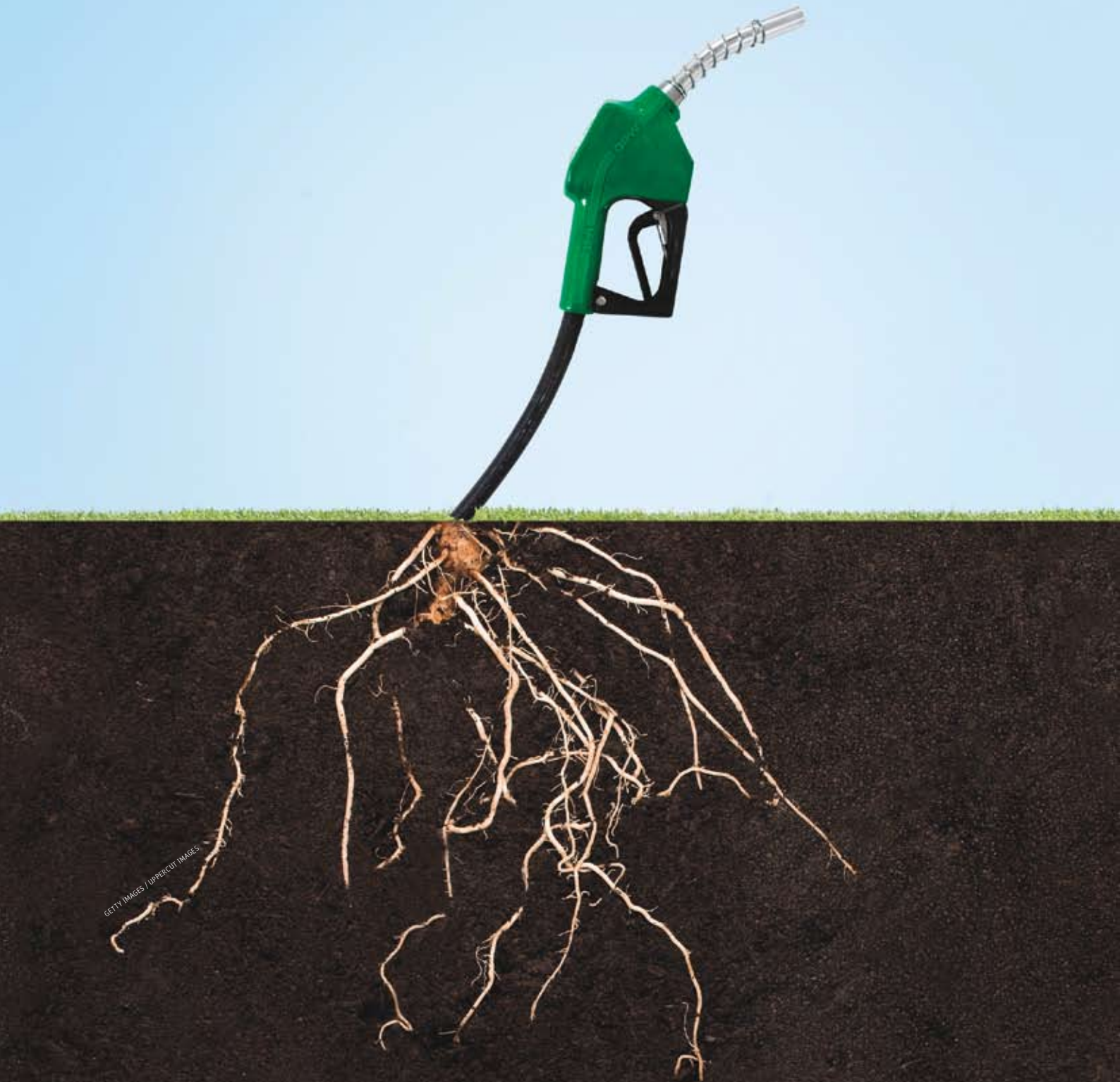
Biokraftstoffe lassen sich aus jeder Art von Pflanzengewebe herstellen. Bisher dienen essbare landwirtschaftliche Produkte als Ausgangsmaterial, in den USA hauptsächlich Mais und Sojabohnen, in Brasilien Zuckerrohr, in Südostasien Palmöl und in Europa Raps. Die Technologie zu ihrer Verwandlung in Treibstoff ist ausgereift; allein in den USA produzieren 180 Raffinerien Ethanol aus Mais.

Doch diese Biokraftstoffe der ersten Generation bieten keine langfristig überzeugende Lösung. So reicht das Ackerland nicht aus, um mehr als ein Zehntel des Treibstoffbedarfs der entwickelten Welt zu erzeugen. Auch verteuert die gestiegene Nachfrage das Tierfutter, was auf

den Preis mancher Lebensmittel durchschlägt. Zwar ist der Effekt geringer, als die jüngste Hysterie in den Medien glauben machte. Doch Anbau, Düngung, Ernte und Verarbeitung etwa von Mais sind mit Energieverbrauch verbunden. Stellt man die entsprechenden Kohlendioxidemissionen in Rechnung, dann sieht die Umweltbilanz keineswegs mehr so günstig aus, wie man sich das wünschen würde.

Biokraftstoffe der zweiten Generation aus Zellulose, die man mit einem Wortspiel Grasolin nennen könnte, vermeiden diese Nachteile. Er lässt sich aus Dutzenden, wenn nicht Hunderten von Quellen erzeugen: angefangen bei Holzresten wie Sägemehl über Ernteabfälle wie Maishalme oder Weizenstroh bis hin zu Energiepflanzen, also raschwüchsigen Gräsern oder Hölzern, die speziell zur Umwandlung in Kraftstoffe angebaut werden (siehe Kasten auf S. 92). Mit 10 bis 40 Dollar (7 bis 28 Euro) pro Fass (159 Liter) Biodiesel ist das ein billiger Rohstoff, der überall anfällt und die Erzeugung von Lebensmitteln nicht tangiert. So gedeihen die meisten Energiepflanzen auch auf schlechten Böden, die sich als Ackerland sonst kaum eignen. Einige wie durch häufiges Schneiden gestrüppartig gehaltene Weiden dekontaminieren zudem mit Abwässern oder Schwermetallen verschmutzte Böden.

Jährlich erzeugen Pflanzen rund eine Billion Tonnen Zellulose. Riesige Mengen davon stehen also für die nachhaltige Produktion



GETTY IMAGES / UPPERCUT IMAGES

## Aus zellulosehaltiger Biomasse lässt sich jede Art von Kraftstoff herstellen

von Kraftstoffen zur Verfügung. Laut einer Studie der US-Ministerien für Landwirtschaft und Energie lassen sich allein in den Vereinigten Staaten 1,3 Milliarden Tonnen getrocknete, aus Zellulose bestehende Biomasse jährlich gewinnen, ohne die Erzeugung von Nahrungsmitteln, Tierfutter oder agrarischen Exportgütern zu schmälern. Daraus ließen sich fast 400 Milliarden Liter Kraftstoff gewinnen – etwa die Hälfte des derzeitigen Verbrauchs von Benzin und Diesel in den USA. Nach ähnlichen Schätzungen entspricht die gewinnbare zellulosehaltige Biomasse weltweit 34 bis 160 Milliarden Fass Mineralöl pro Jahr, was den momentanen Jahresverbrauch von 30 Milliarden Fass deutlich übersteigt. Aus dem Pflanzenmaterial lässt sich jede Art von Kraftstoff herstellen: Ethanol, Benzin, Diesel und Kerosin.

Maiskörner zu vergären ist zwar immer noch bedeutend leichter als die Verarbeitung harter, zellulosehaltiger Stängel, doch wurden letzthin große Fortschritte erzielt. Mit quantenchemischen Rechenmodellen können For-

scher heute am Computer Katalysatoren entwerfen, die Reaktionen gezielt beschleunigen. Ein wichtiger Gesichtspunkt dabei ist, dass sich die im Labor entwickelten Umwandlungsprozesse für das rasche Hochskalieren in den Raffinerie-Maßstab eignen. Obwohl das Forschungsgebiet noch jung ist, laufen schon etliche Demonstrationsanlagen, und die ersten kommerziellen Raffinerien sollen 2011 in Betrieb gehen. Das Zeitalter des Grasolins scheint also nicht mehr fern.

### Das energetische Schloss

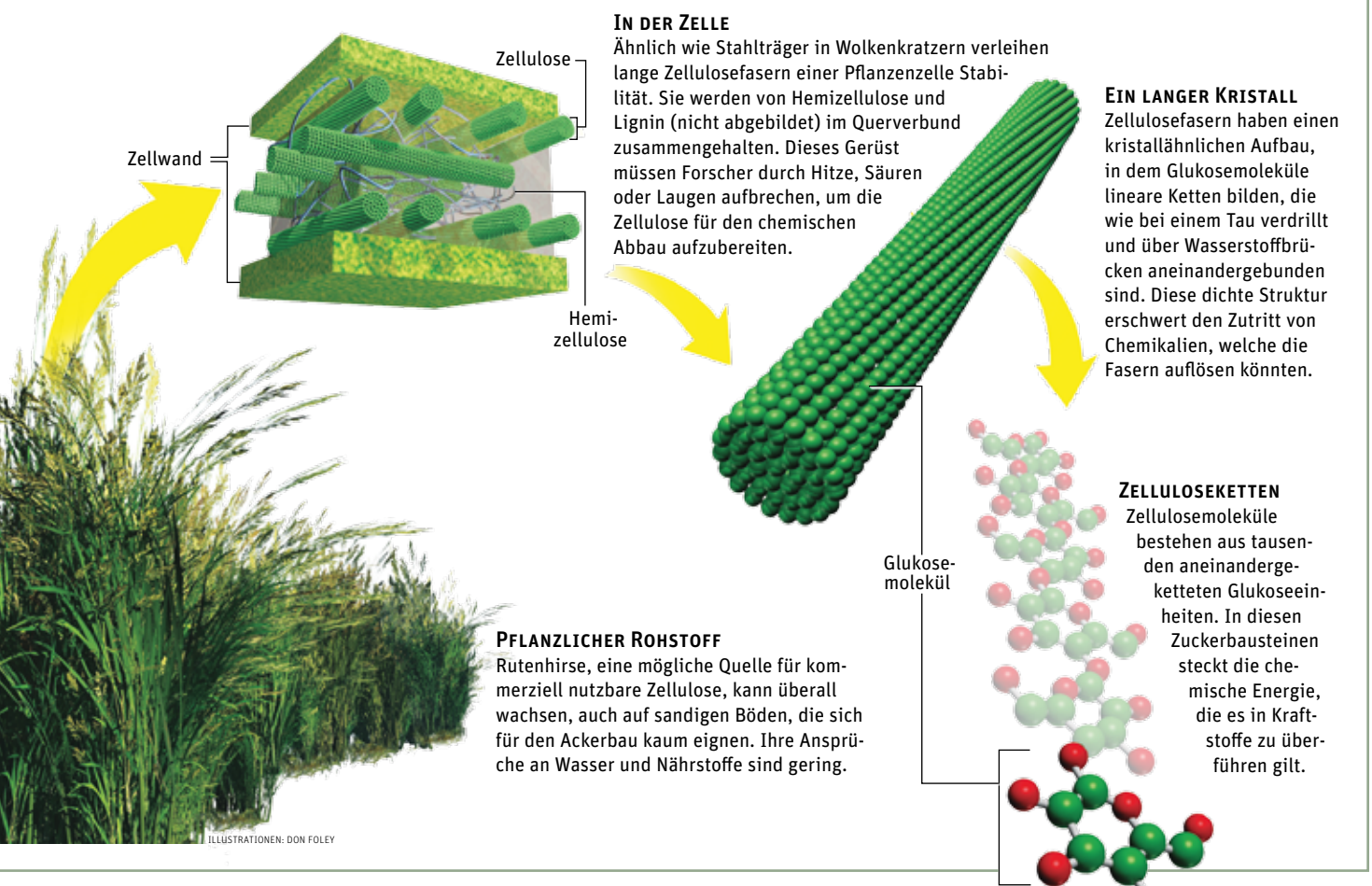
Die Natur benutzt Zellulose, um einer Pflanze Festigkeit zu verleihen. Die Einzelmoleküle werden dabei zu einem starren Gerüst verschränkt, das senkrecht aufragende Strukturen stützt und dem biologischen Abbau Widerstand leistet (Kasten unten). Um die enthaltene Energie freizusetzen, gilt es, zunächst dieses molekulare Geflecht zu entwirren.

Zellulose lässt sich also nicht direkt in Kraftstoffe umwandeln, sondern muss vorher

## DER AUFBAU DES ZELULOSEGERÜSTES

**In der Natur ermöglicht Zellulose** das senkrechte Wachstum der Pflanzen. Sie bildet starre und chemisch schwer abbaubare

Strukturen. Das gibt Halmen, Stängeln und Stämmen Festigkeit, behindert jedoch ihre Umwandlung in Biokraftstoff.



in kleinere Moleküle aufgespalten werden. Das kann bei verschiedenen Temperaturen geschehen. Bei 50 bis 200 Grad Celsius bilden sich diverse Zuckersorten, die sich ähnlich wie Mais oder Zuckerpflanzen zu Ethanol oder anderen Kraftstoffen vergären lassen. Der Abbau bei 400 bis 600 Grad Celsius liefert ein Bio-Öl, das zu Benzin oder Diesel raffiniert werden kann. Bei Temperaturen über 700 Grad Celsius fällt ein Gasmisch an, aus dem sich Flüssigkraftstoffe herstellen lassen.

Bisher ist unklar, welche Methode die in den Pflanzen steckende Energie am vollständigsten und kostengünstigsten nutzt. Möglicherweise kommt es auf die Biomassequelle an. Die Zersetzung bei großer Hitze könnte für Holz am geeignetsten sein, die bei niedrigeren Temperaturen dagegen für Gräser.

Die Hochtemperatur-Vergasung von Pflanzenmaterial ist der technisch ausgereifteste Weg zur Herstellung von Biokraftstoff. Sie eignet sich für alle organischen Substanzen und liefert ein Gemisch aus Kohlenmonoxid

und Wasserstoff, das als Wasser- oder Synthesegas bezeichnet wird. Es lässt sich je nach Bedarf in Diesel, Benzin oder Ethanol umwandeln. Das geschieht gewöhnlich durch Fischer-Tropsch-Synthese (FTS), ein Verfahren, das deutsche Wissenschaftler in den 1920er Jahren entwickelt haben. Im Dritten Reich diente es während des Kriegs zur Herstellung von Flüssigkraftstoffen aus heimischer Kohle. Die meisten großen Mineralölgesellschaften sind technisch im Stande, bei explodierenden Ölpreisen auf die Wassergas-Konversion auszuweichen.

### Hochtemperatur-Vergasung

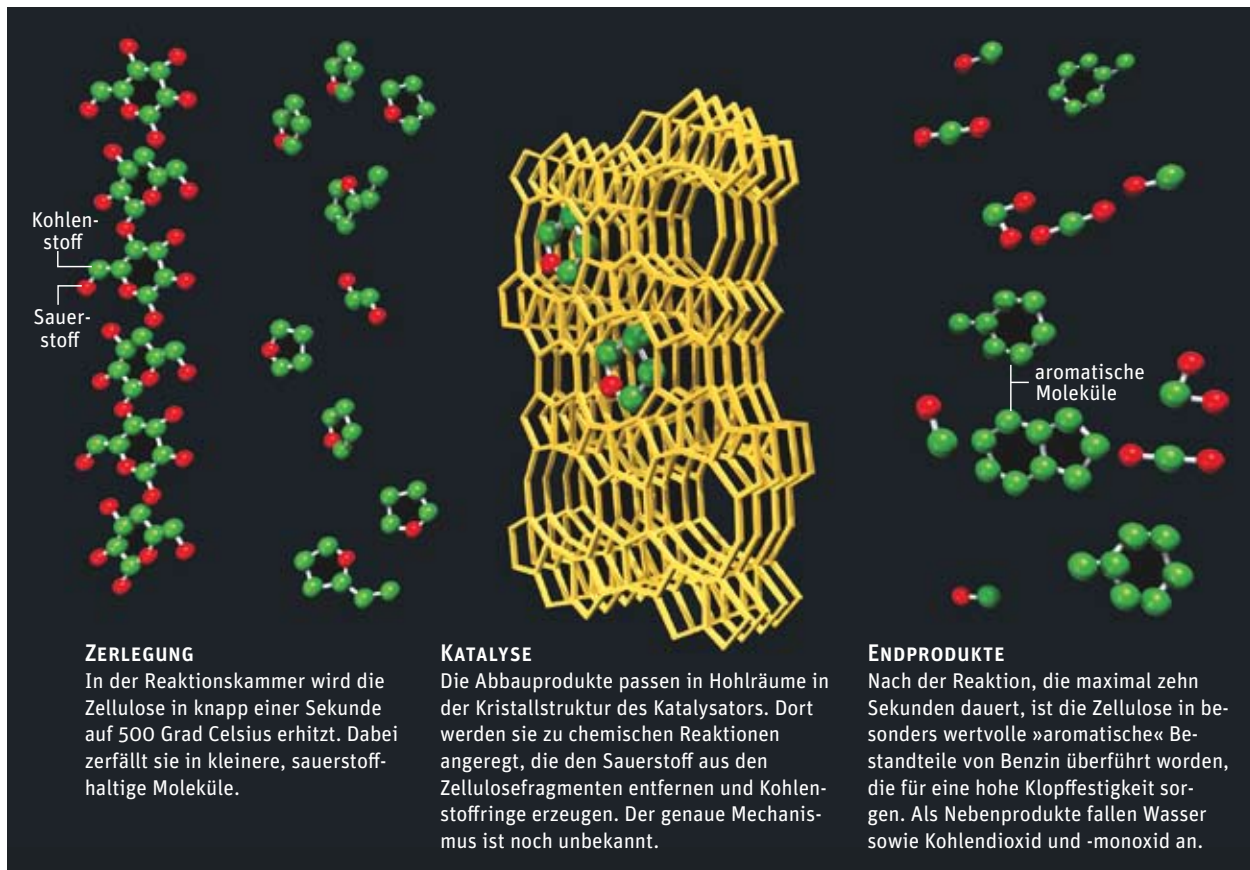
Im ersten Schritt wird das Ausgangsmaterial dabei in einem Reaktor auf über 700 Grad Celsius erhitzt. Durch wechselweise Zufuhr von Sauerstoff und Wasserdampf entsteht dann im Fall von Biomasse ein Gemisch aus Kohlenmonoxid, Wasserstoff und teerartigen Substanzen, die es zunächst abzutrennen gilt. Das Gas wird schließlich auf einen Druck von zwei bis sieben Megapascal (20 bis 70 Atmo-

Zur Verwandlung in Kraftstoff muss **Zellulose** zunächst in kleine Moleküle zerlegt werden

## VON DER ZELLULOSE ZUM TREIBSTOFF IN ZEHN SEKUNDEN

**Benzin besteht aus Kohlenstoff- und Wasserstoffatomen** (nicht dargestellt), während Zellulose zusätzlich Sauerstoff enthält. Diesen muss man also entfernen, um Biokraftstoff (»Grasolin«)

aus den Stützstrukturen von Pflanzen zu erzeugen. Bei der hier gezeigten katalytischen Schnellpyrolyse geschieht das sehr effizient und schnell in einem Schritt.



## ZELLOSEHALTIGE ROHSTOFFE

**Zellulosehaltiges Material** zur Umwandlung in Biokraftstoffe kann aus vielen Quellen stammen. Hier sind die drei bedeutendsten aufgeführt.



GETTY IMAGES / AURORA / PETER ESSICK

### FORSTPRODUKTE

Beim Einschlag von Bäumen sowie bei der Verarbeitung der Stämme in Sägewerken und in der Möbel- oder Papierindustrie fallen bisher nicht verwertete Holzreste an. Auch das regelmäßige Auslichten von Wäldern durch Entfernen von Niederwuchs liefert zellulosehaltiges Pflanzenmaterial.



GETTY IMAGES / FIRST LIGHT / VAST PHOTOGRAPHY

### ERNTENABFÄLLE

Nicht essbare Stängel, Halme, Strünke und Blätter machen etwa die Hälfte der Erntemenge aus. Einige dieser Abfälle müssen zur Regeneration des Bodens auf dem Acker verbleiben, doch die meisten verrotten derzeit ungenutzt.

### ENERGIEPFLANZEN

Sie wachsen schnell und stellen geringe Ansprüche an Bodenqualität, Düngung und Bewässerung. Beispiele sind Rutenhirse (Bild), Sudangras, Chinaschilf und eine auf hohen Biomasseanteil gezüchtete Zuckerrohrsorte (*energycane*). Manche Energiepflanzen wie etwa durch häufiges Schneiden gestrüppartig gehaltene Weiden gedeihen auch auf Böden, die mit Abwasser oder Schwermetallen verseucht sind, und entgiften sie dabei sogar.



GETTY IMAGES / WALLY EBENHART

**Termiten sind natürliche Biokraftstoff-Fabriken. Mikroben in ihrem Darm bauen Zellulose zu Zucker ab. Bio-Ingenieure versuchen, diesen Vorgang auf industrieller Ebene nachzuahmen.**

sphären) verdichtet und über einen Spezialkatalysator geleitet: einen Festkörper, der die Gasmoleküle an seiner Oberfläche anlagert und sie dazu bringt, bestimmte chemische Reaktionen einzugehen. Solche Katalysatoren wurden von der Petrochemie hauptsächlich dafür entwickelt, Erdgas in flüssige Treibstoffe

umzuwandeln. Doch funktionieren sie genauso gut mit Wassergas aus Kohle oder Biomasse.

Ein großer Nachteil dieser Technologie ist der hohe Preis der Reaktoren. Eine FTS-Anlage, die im Jahr 2006 in Qatar für die Umwandlung von Erdgas in 34000 Fass Flüssigtreibstoff gebaut wurde, kostete 1,6 Milliarden Dollar. Wäre ein Konverter für Biomasse genauso teuer, müsste er 5000 Tonnen davon täglich über 15 bis 30 Jahre verarbeiten, um sich zu amortisieren. So viel Pflanzenmaterial an einen Ort zu schaffen, würde bedeutende logistische und wirtschaftliche Probleme aufwerfen. Hauptforschungsziel ist deshalb, die Kapitalkosten der Wassergas-Technologie zu senken.

### Billiges Bio-Öl

Für Äonen waren Zooplankton und Algen aus dem Kambrium im Erdinnern hohem Druck und großer Hitze ausgesetzt. So verwandelten sich ihre Ablagerungen in die heutigen Mineralölfelder. In ähnlicher Weise lässt sich auch in sehr viel kürzerer Zeit zellulosehaltiges Pflanzenmaterial in ein Bio-Rohöl überführen. Dazu erhitzt man es in einer Raffinerie unter Ausschluss von Sauerstoff auf 300 bis 600 Grad Celsius. Bei einer solchen Pyrolyse zersetzt sich die Zellulose in gasförmige Produkte, einen holzkohleartigen Feststoff und das Bio-Öl. Dieses ist mit etwa einem halben



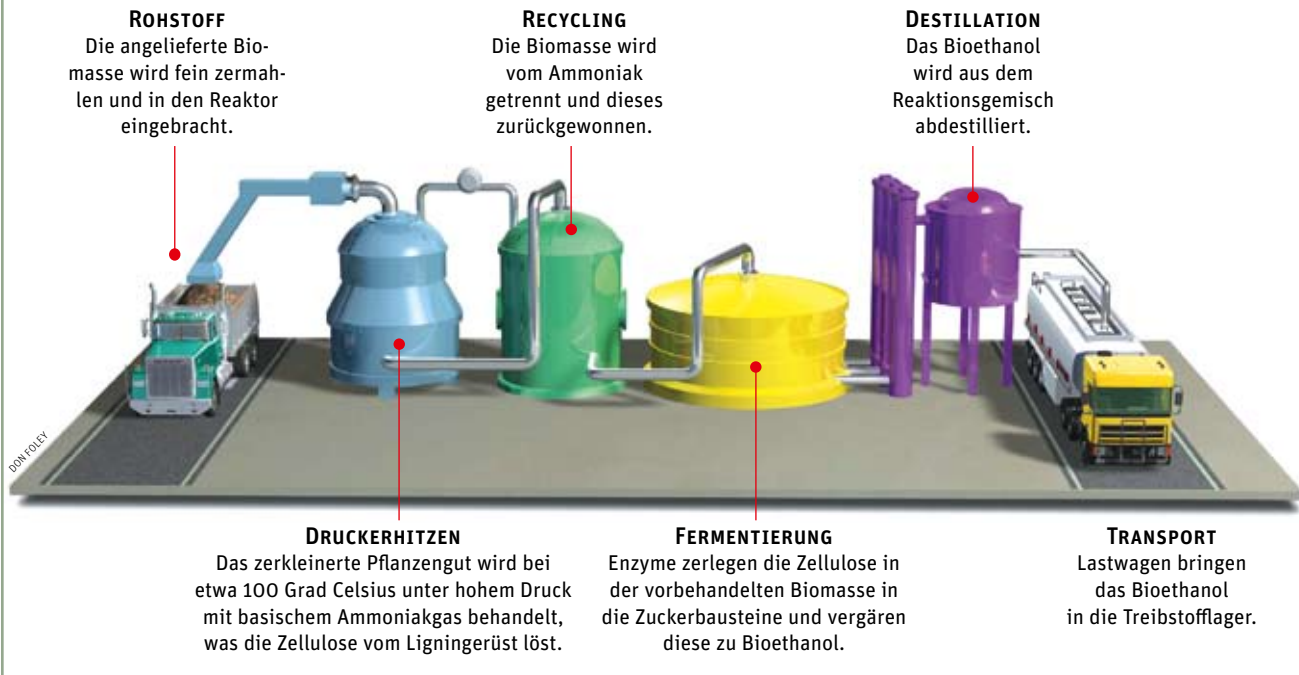
PHOTO RESEARCHERS / EYE OF SCIENCE



## ETHANOLGEWINNUNG AUS ZELLULOSE MIT AMMONIAK

**Es gibt viele Möglichkeiten zur Vorbehandlung** von Pflanzenfasern, um die enthaltene Zellulose aufzuschließen. Meist werden Säuren und hohe Temperaturen eingesetzt. Eine einmalige

Kombination aus niedrigem Energiebedarf, geringen Kosten und hohem Wirkungsgrad bietet das AFEX-Verfahren (*ammonia fiber expansion*), das mit Ammoniak arbeitet.



Dollar pro Gallone (knapp 0,1 Euro pro Liter) Benzinäquivalent (die Kosten für die Rohbiomasse nicht gerechnet) der billigste flüssige Biokraftstoff.

Das Verfahren eignet sich auch für relativ kleine Betriebe nahe den Erntebereichen, was die Transportkosten für das Pflanzenmaterial senkt. Allerdings ist das so erzeugte Bio-Rohöl sehr teuer, nicht mit Treibstoff auf Petroleumbasis mischbar und nur halb so energiereich wie Benzin. Es verbrennt zwar in einem Dieselmotor, ruiniert ihn aber binnen Kurzem.

Raffinerien könnten das Bio-Rohöl jedoch in nützlichen Treibstoff verwandeln, und viele Unternehmen suchen nach Möglichkeiten, ihre Anlagen für diesen Zweck einzusetzen. Einige erzeugen schon eine andere Art von »grünem« Dieseltreibstoff, was nahelegt, dass Raffinerien durchaus Bio-Rohöl auf Zellulosebasis verarbeiten könnten. Diese Firmen beschicken ihre Reaktoren mit einem Gemisch aus Pflanzenöl, Tierfetten und Petroleum. So hat Conoco-Phillips in Borger (Texas) kürzlich in einer Demonstrationsanlage aus Rinderfett von einem nahe gelegenen Schlachthaus der Firma Tyson Foods 45 000 Liter Biodiesel am Tag produziert. Im April dieses Jahres fuhr auch das Unternehmen High Plains Bioenergy in Guymon (Oklahoma) eine Bioraffinerie an, die sich neben einem Schweineverarbei-

tungsbetrieb befindet und Schweinefett zusammen mit Pflanzenöl zu Kraftstoff verarbeitet. Die Anlage soll mehr als 100 Millionen Liter Biodiesel im Jahr produzieren.

Forscher suchen zudem nach Wegen, den Zweistufenprozess – die Umwandlung der festen Biomasse in Öl und dessen anschließende Raffination zu Treibstoff – in einem einzigen Reaktor durchzuführen. Einer von uns (Huber) verfolgt mit seiner Gruppe den Ansatz der katalytischen Schnell-Pyrolyse (Kasten auf S. 91). Dabei wird die Biomasse nach dem Eintritt in den Reaktor binnen einer Sekunde auf 500 Grad Celsius erhitzt. Das lässt die langen Glukoseketten in kleinere Moleküle zerbrechen, die von ihrer Form und Größe her perfekt in die Hohlräume des Katalysators passen – ähnlich wie Eier in einen Eierkarton. Dort verwandeln sie sich über eine Serie von Reaktionen in Benzin – und zwar speziell in dessen hochwertige »aromatische« Komponenten, welche die Oktanzahl erhöhen, so dass sich das Luft-Benzin-Gemisch im Zylinder höher verdichten lässt, ohne vorzeitig zu zünden, was den Wirkungsgrad steigert. Der gesamte Vorgang dauert nur zehn Sekunden. Die neu gegründete Firma Anellotech arbeitet daran, das Verfahren vom Labor auf eine Großanlage zu übertragen. Bis 2014 soll der erste kommerzielle Reaktor in Betrieb sein.

**Bio-Öl ist mit einem Preis von 0,1 Euro pro Liter der billigste flüssige Biokraftstoff**

NEIN, ES IST KEINE SO GUTE IDEE,  
AUS DEINEM GEMÜSE GLEICH  
BIODIESEL ZU MACHEN!



Die meisten öffentlichen und privaten Mittel sind bisher in den

Aufschluss der Zellulose bei Temperaturen unter 200 Grad Celsius geflossen. Dabei werden die Zuckermoleküle aus ihrem Verband gelöst und zu Ethanol oder anderen Biokraftstoffen vergoren. Man kann sich Dutzende verschiedener Wege vorstellen, um die gegen Verdauung resistente Zellulose sowie die Hemizellulose, welche die Zellulosefasern zusammen mit Lignin zu verschränkten Gerüststrukturen verschnürt, in ihre Zuckerbausteine aufzuspalten. So haben Forscher die Biomasse zu einem feinen Brei zermahlen, mit Gammastrahlen behandelt, hoch erhitztem Dampf ausgesetzt, mit konzentrierten Säuren oder Laugen übergossen oder in Lösungsmitteln eingeweicht. Sie haben sogar Mikroben durch Genmanipulation die Fähigkeit verliehen, Zellulose zu fressen und abzubauen.

### Kochen mit Ammoniak

Leider taugen viele Methoden, die im Labor gut funktionieren, nicht für kommerzielle Verfahren. Geeignet sind sie nur dann, wenn sie leicht fermentierbare Zucker in hoher Ausbeute und Konzentration liefern und keine allzu teuren Investitionen erfordern. Ferner sollten sie ohne giftige Substanzen auskommen und möglichst wenig Energie verbrauchen. Schließlich müsste das erzeugte Grasolin preislich mit konventionellem Benzin konkurrieren können.

Am aussichtsreichsten scheint die Behandlung der Biomasse mit starken Säuren oder Laugen bei relativ hohen Temperaturen. Einer von uns (Dale) hat in seinem Labor ein Verfahren namens *ammonia fiber expansion* (AFEX) entwickelt (Kasten S. 93). Dabei lässt man basisches Ammoniakgas bei 100 Grad Celsius unter hohem Druck mehrere Minuten bis eine Stunde lang auf die zellulosehaltige Biomasse einwirken und dann über ein Ventil schlagartig entweichen. Nach dieser Vorbehandlung wandeln Enzyme wie Zellulase und Xylase das Pflanzenmaterial zu mehr als 90 Prozent in Zucker um. Zu der hohen Ausbeute trägt bei, dass die Methode den Abbau der Glukosemoleküle vermeidet, der bei sauren Reaktionsbedingungen oder sehr großer Hitze auftritt.

Wie eine kürzlich durchgeführte Wirtschaftlichkeitsanalyse ergab, sollte AFEX auch sehr preiswert sein. Wenn die Tonne Biomasse einschließlich Transport zur Fabrik 50 Dollar (35 Euro) kostet und ein weiterentwickelter Fermentationsprozess namens *consolidated bioprocessing*, der die Vergärung des Zuckers einschließt, zum Einsatz kommt, lässt sich da-

mit Bioethanol mit dem Energiegehalt einer Gallone (3,785 Liter) Benzin für etwa einen Dollar erzeugen. An der Zapfsäule sollte es höchstens zwei Dollar kosten (was 0,38 Euro pro Liter entspricht). Damit wäre es selbst in den USA billiger als Benzin, für das man dort derzeit rund 2,6 Dollar pro Gallone (0,5 Euro pro Liter) zahlen muss.

### Der Preis des Wandels

Natürlich werden letztlich die Kosten darüber entscheiden, wie schnell sich Biokraftstoff aus Zellulose durchsetzt. Sein Hauptkonkurrent bleibt das Erdöl. Dessen Raffination profitiert von einem Jahrhundert zielgerichteter Forschungen. Außerdem haben sich die Anlagen längst amortisiert. Raffinerien für Biokraftstoff benötigen dagegen Investitionen von hunderten Millionen Dollar, die über die Jahre in den Treibstoffpreis eingehen müssen.

Auf der anderen Seite hat Grasolin mehrere Vorteile gegenüber Kraftstoffen aus Erdöl oder verwandten Quellen wie Ölsanden und verflüssigter Kohle. Zunächst sind die Ausgangsstoffe viel billiger, was niedrige Betriebskosten nach dem Bau der Anlagen verspricht. Außerdem wird Grasolin im eigenen Land produziert und führt damit nicht zu politischen Abhängigkeiten. Schließlich ist es weit aus umweltfreundlicher als irgendeine Alternative auf der Basis fossiler Energieträger.

Neue Untersuchungsmethoden und computergestützte Simulationsverfahren erlauben es, die Raffinerieverfahren für Biokraftstoff in einem Tempo zu verbessern, von dem Petrochemiker noch vor einem Jahrzehnt nur träumen konnten. Wir gewinnen immer schneller immer mehr Erkenntnisse über die Eigenschaften des pflanzlichen Rohmaterials und über die optimale Art, es zu Treibstoff zu verarbeiten. In den USA fördert die neue Regierung die Entwicklung inzwischen mit staatlichen Mitteln. Nach einem von Präsident Barack Obama jüngst unterzeichneten Gesetz fließen 800 Millionen Dollar in das *Biomass Program* des US-Energieministeriums, das die Forschung und Entwicklung von Biotreibstoffen sowie kommerzielle Bioraffinerie-Projekte unterstützt. Außerdem sind sechs Millionen Dollar an Bürgschaften für alle neuen Anlagen vorgesehen, mit deren Bau bis Oktober 2011 begonnen wurde.

In den kommenden fünf bis 15 Jahren dürfte die Technologie zur Verflüssigung von Biomasse den Schritt vom Labor zur großtechnischen Anlage schaffen. Zugleich sollte die Zahl der Fahrzeuge, die Kraftstoff aus Zellulose nutzen, dramatisch steigen. Dieser Wandel wird die Welt verändern, und er ist längst überfällig. ◀



**George W. Huber** (links) ist Professor für Verfahrenstechnik an der University of Massachusetts in Amherst. Er hat das Unternehmen Anellotech gegründet und berät gelegentlich verschiedene Öl- und Biokraftstoffunternehmen.

**Bruce E. Dale** ist Professor für Verfahrenstechnik an der Michigan State University in East Lansing und einer der Direktoren des Great Lake Bioenergy Research Center ([greatlakesbioenergy.org](http://greatlakesbioenergy.org)). Auch er betätigt sich ab und an als Berater für Biokraftstoffunternehmen.

**Brändle, M. et al.:** Biokraftstoffe der Zukunft: Strategien für eine nachhaltige Mobilität. Friedrich-Ebert-Stiftung, Bonn 2006.

**Romanko, R.:** Biokraftstoffe als Ersatz fossiler Energieträger: eine umwelt- und ressourcenökonomische Analyse. Grin, München 2009.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/1002944](http://www.spektrum.de/artikel/1002944).



## INDUKTIONSHERD

# Kalte Platte, heißer Topf

Ein wenig einfache Grundlagenphysik erfreut Hobbyköche und spart Energie.

Von Bernhard Gerl

Kochen ist nicht nur Kult, Kochen ist auch Kultur. Denn als der Mensch begann, seine Nahrung zu erhitzen, konnte er sich neue Lebensmittel erschließen. In den westlichen Ländern vermittelt das Kochen auf offenem Feuer nostalgische Gefühle, und auch der daran erinnernde Flammenring eines Gasherds findet sich eher in den Küchen der Profis. Berufsköche verzichten ungern auf die Option, die Temperatur des Garguts sehr schnell durch die Gaszufuhr zu regulieren. In Privatküchen steht meist ein Elektroherd. Glühwendeln sorgen hier für die Hitze, also stromdurchflossene Spulen, an deren hohem ohmschem Widerstand ein Großteil der elektrischen Energie in Wärme umgewandelt wird. Darüber liegt eine stählerne Platte, die sich aufheizt und ihre Hitze dann durch Wärmeleitung auf einen Topf überträgt, oder ein Ceranfeld, das Wärme schlecht leitet (in seiner Umgebung bleibt es entsprechend kalt), dafür aber die Infrarotstrahlung der Wendel passieren lässt.

Das Cerankochfeld arbeitet bereits direkter und damit sparsamer als die stählerne Herdplatte. Dennoch geht auch dort Energie auf dem Weg zum Gargut verloren. Eine mögliche Lösung: elektromagnetische Induktion. Sie macht es möglich, die elektrische Energie bis zum Topf zu übermitteln und erst dort, im direkten Kontakt zur Nahrung, in Wärme umzuwandeln.

Der Physiker Michael Faraday (1791–1867) fand heraus, dass in einer aus einem metallenen Leiter geformten Schleife eine Spannung entsteht, wenn ein sich änderndes Magnetfeld die Schleife durchdringt. Auf diesem Effekt beruhen Elektromotoren, Transformatoren, Generatoren und neuerdings auch Induktionsherde. Denn die induzierte Spannung erzeugt Strom und dieser wiederum, je nach ohmschem Widerstand, Wärme.

Eine Spule unterhalb des aus Glaskeramik bestehenden Kochfelds generiert das Magnetfeld, das elektronisch gesteuert 50 000- bis 100 000-mal pro Sekunde die Richtung ändert. Den Part der Leiterschleife übernimmt der speziell dafür konstruierte Boden eines Topfs. Darin entsteht eine Wechsellspannung, und diese wiederum setzt Wirbelströme in Gang. Dazu muss der Boden aber aus ferromagnetischem (der Name leitet sich von *ferrum* her, lateinisch für Eisen) Material bestehen: In einem Magnetfeld richten sich des-

sen »Elementarmagnete« aus, was das äußere Feld konzentriert und verstärkt sowie die Streuverluste reduziert. Zudem erfordert eine Neuausrichtung der Elementarmagnete im Eisen ebenfalls Energie, weshalb auch durch das Ummagnetisieren Wärme im Topfboden entsteht.

Geeignete Werkstoffe sind Eisen und Gusseisen; hochlegierte Edelmetalle hingegen eignen sich auf Grund eines hohen Chromanteils nicht – ohne spezielle Beschichtung sind diese Stähle nicht magnetisierbar. Inzwischen werden zwar Induktionsherde entwickelt, die mit noch höherer Frequenz arbeiten, um auch in anderen Materialien Wirbelströme induzieren zu können (selbst in Keramik); solche Technik ist aber noch Jahre von der Marktreife entfernt.

Induktionsherde haben viele Vorteile. Köche schätzen an ihnen, dass die Hitzezufuhr sehr schnell reguliert werden kann, weil es keine dazwischengeschaltete thermisch träge Kochplatte gibt. Sie sind zudem Energie sparend, weil Zwischenstufen der Energieübertragung entfallen. Gegenüber einem herkömmlichen Glaskeramikherd ergeben sich Einsparungen von 50 Prozent beim schnellen Anbraten und von immer noch fünf Prozent, wenn ein Gericht über eine längere Zeit gekocht werden muss. Ein weiterer Vorteil: Das Kochfeld eines Induktionsherds erwärmt sich nur indirekt durch den heißen Topf, deshalb kann man sich nicht so leicht verletzen, und es brennt auch nichts auf der Herdplatte an. Hinzu kommt ein Sicherheitsaspekt: Bei den meisten Herden schaltet ein Sensor das Kochfeld ab, wenn kein oder ein ungeeigneter Topf darauf steht oder wenn ein Topf zu heiß wird, weil er vergessen wurde.

Da nur das ferromagnetische Material des Topfs erwärmt wird, sind unterschiedliche Größen möglich. Das Magnetfeld wirkt am besten bei Durchmesser von 12 bis 30 Zentimetern, darüber hinaus wird nur der innere Bereich erwärmt. Einige Hersteller bieten inzwischen Herde an, bei denen viele kleine Spulen unter der gesamten Glaskeramikfläche verteilt sind und Sensoren feststellen, wo die Töpfe stehen, und dann die jeweils entsprechenden Elemente aktivieren.

BERNHARD GERL ist freier Wissenschaftsjournalist in Mainz.

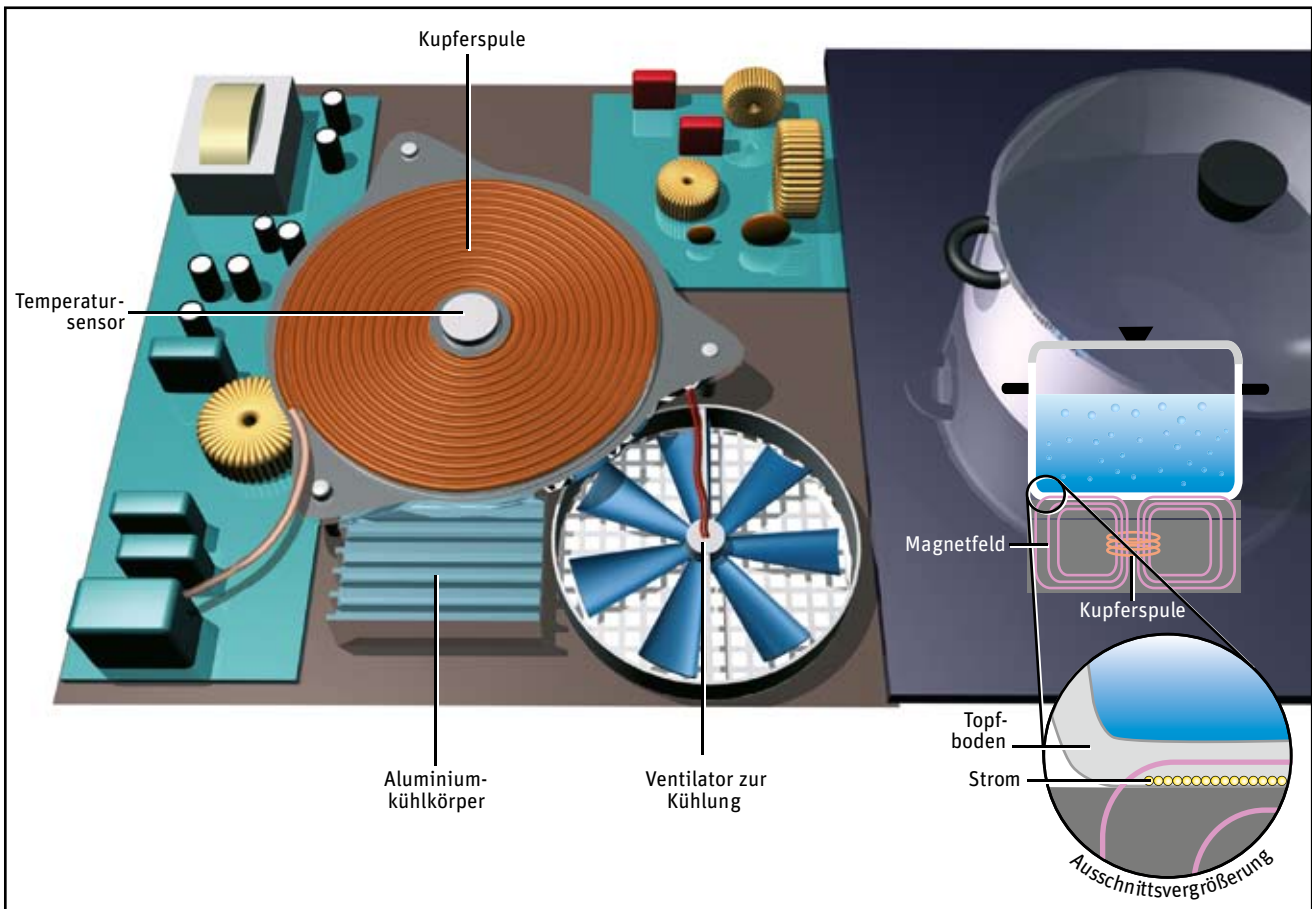
## WUSSTEN SIE SCHON?

► **Eine Alternative zum Induktionsherd** sind spezielle Halogenlampen unter dem Ceranfeld, die einen Großteil ihrer Energie im Infrarotbereich ausstrahlen. Auch damit ist es möglich, die Hitzezufuhr sehr schnell zu ändern. Weil die Lampen aber bereits nach relativ kurzer Zeit durchbrennen, hat sich diese Technik nicht durchgesetzt.

► **Das Bundesamt für Strahlenschutz** vertritt die Ansicht, dass die elektromagnetischen Felder, die Induktionsherde aussenden, gesundheitlich unbedenklich sind, sofern kein ungeeigneter, beschädigter oder zu kleiner Topf benutzt wird. Nur dann können die Flusssichten dem von der Internationalen Kommission zum Schutz vor nichtionisierender Strahlung (ICNIRP) angegebenen Grenzwert – für den verwendeten Frequenzbereich sind

das 6,25 Mikrottesla – nahe kommen oder ihn sogar übersteigen. Außerdem rät das Bundesamt Trägern von Herzschrittmachern und Schwangeren zur Vorsicht: Schrittmacher könnten gestört werden, und eine Risikoabschätzung für das Ungeborene ist derzeit noch nicht möglich.

► **Induktion wird auch zur Verkehrssteuerung genutzt:** Eine Induktionsspule sorgt dafür, dass eine Ampel nur dann auf Grün schaltet, wenn ein Fahrzeug wartet. Durch die quer über die Fahrbahn verlegte Leiterschleife fließt Wechselstrom, und es entsteht ein magnetisches Wechselfeld, das eine ausreichende Menge an Metall – ob Auto oder Fahrrad – verändert. Die dadurch beeinflusste Schleifenfrequenz wird von Sensoren gemessen und an die Ampelelektronik weitergeleitet.



Die Elektronik des Kochfelds erzeugt eine Wechselspannung von 25 bis 50 Kilohertz. Die stromdurchflossene Spule generiert dann ein hochfrequentes elektromagnetisches Wechselfeld. Dieses induziert in einer dünnen Schicht des eisernen Topfbodens Wirbel-

ströme, die wiederum den Topf und damit das Gargut aufheizen. Zudem erzeugt das ständige Ummagnetisieren der Elementarmagnete des Materials Wärme. Sensoren sorgen dafür, dass die Spule abgeschaltet wird, sobald der Topf nicht mehr auf der Platte steht.



CARSTEN MILBRET, MIT FRODL. GEN. DER INTERNATIONAL SUPERCOMPUTING CONFERENCE (ISC) / PROMETEUS GMBH

## » Je besser die Idee, desto geringer der Kapitalbedarf«

In der Computerindustrie genügen 10 bis 20 Millionen Dollar, um eine gute Idee zu realisieren. Andreas von Bechtolsheim hat das in seiner bisherigen Karriere mehrfach praktiziert: mit der Workstation und der Firma SUN 1982, Granite Systems 1995, Kaelia 2001 und Arista Networks 2008.

**Andreas von Bechtolsheim**, geboren 1955 und aufgewachsen auf einem Bauernhof in der Nähe des Ammersees, studierte an der Technischen Universität München und der Carnegie Mellon University in Pittsburgh. Neben seinem außergewöhnlichen Erfolg als innovativer Unternehmer wirkte er auch als Investor; insbesondere zählt er zu den Finanziers der Firma Google.



JUGEND FORSCHT

1974 als Bundessieger Physik bei »Jugend forscht«



SUN MICROSYSTEMS

1982 (im roten Pullover) bei der Vorstellung der Workstation von SUN

**Spektrum der Wissenschaft:** Wie gerät ein Mensch, der für die Wissenschaft gemacht schien, auf solche Abwege, dass er geschäftlich so außergewöhnlich erfolgreich wurde? Was ist da schiefgegangen?

**Andreas von Bechtolsheim:** Ich sehe keinen grundsätzlichen Konflikt zwischen Wissenschaft und geschäftlichem Erfolg – zumindest dort, wo ich arbeite, im Silicon Valley. Allerdings war ich schon immer weniger der akademischen Wissenschaft zugeneigt als vielmehr der praktischen Anwendung.

**Spektrum:** Aber Sie haben doch als Physiker angefangen?

**von Bechtolsheim:** Nicht wirklich. Ich habe 1974 den Bundeswettbewerb »Jugend forscht« in Physik mit einer Arbeit über genaue Strömungsmessung durch Ultraschall gewonnen. Aber besonders interessiert hat mich immer der Computer, und da wieder weniger die theoretische Informatik als vielmehr die praktische Seite.

Bei den Computern geht es ganz anders zu als in einer traditionellen Industrie wie der Chemie. Um eine neue Idee zu realisieren, brauchen Sie nur 10 bis 20 Millionen Dollar. Man könnte fast sagen, je besser die Idee, desto geringer der Kapitalbedarf. Das glanzvollste Bei-

spiel ist die Firma Google, die mit insgesamt nur 30 Millionen Dollar finanziert wurde und jetzt mit der Idee *computing as a service* viel Geld verdient.

**Spektrum:** Ich kenne Google eigentlich nur als Suchmaschine ...

**von Bechtolsheim:** Da gibt es außerdem jetzt schon Google Maps, Google Apps, Google Talk und das Videoportal YouTube, und die Palette erweitert sich dauernd. *Computing as a service* heißt: Auf dem Computer des Nutzers läuft als einziges Programm der Webbrowser; die wesentliche Arbeit machen die Server des Anbieters. Das Angebot ist größtenteils werbefinanziert – bekannt von gedruckten Zeitungen der Frühzeit, aber völlig neu für den IT-Markt.

Inzwischen hat Google durch seine schiere Größe einen enormen Kostenvorteil. Billige Hardware, eine große Anzahl von Geräten mit identischer Hard- und Software und dem gemeinsamen Betriebssystem Linux, redundante Auslegung, nur eine Person Betriebspersonal pro 10 000 Server, minimale Gebäudeausstattung – alles zusammen ergibt, dass Google pro Server nur ein Fünftel bis ein Zehntel der Kosten eines Standard-Datenzentrums hat. Sogar für den Strom zahlt Google nur ein Achtel

Auffällig sind an diesen Netzwerk-Switches der Baureihe 7100 von Arista Networks nur die vielen Anschlüsse für Datenkabel auf der Rückseite. Entscheidend ist, dass diese »Telefonzentralen« Nachrichten zwischen den angeschlossenen Rechnern mit einem Durchsatz von zehn Gigabit pro Sekunde und Computer vermitteln und so mit deren rasant angewachsener Arbeitsgeschwindigkeit Schritt halten.



der üblichen Preise, indem es seine Datenzentren in Oregon oder Nordnorwegen neben das Wasserkraftwerk stellt, wo die Kilowattstunde für drei Dollarcent zu haben ist. Es ist eben viel billiger, Bits über weite Strecken zu transportieren als den Strom.

**Spektrum:** Was ist Ihr persönlicher Beitrag zu Google?

**von Bechtolsheim:** Mein Freund David Cheriton, Professor in Stanford, hatte mich 1998 mit den Gründern Sergey Brin und Larry Page zusammengebracht. Deren Idee, Suchergebnisse nach Relevanz zu sortieren, wobei »Relevanz« aus der Verknüpfungsstruktur der Webseiten untereinander errechnet wird (SdW 7/2002, S. 106), hat mich von Anfang an überzeugt.

Und das Geschäftsmodell, die Anzeigen abhängig vom Suchwort in die Liste der Suchergebnisse einzuspielen, war eine der besten Ideen, die es je gab.

**Spektrum:** In Ihrer neuesten Firma Arista beschäftigen Sie sich hauptsächlich mit Hardwarebauteilen, mit *switches*. Was hat Sie dazu motiviert?

**von Bechtolsheim:** Im Wesentlichen Google, zusammen mit anderen Firmen, die jetzt Großanlagen bauen für das, was man heute *cloud computing* nennt. An-

dere Bezeichnungen sind *grid computing*, *computing clusters* oder *computing farms* (SdW 3/2002, S. 88, und 7/2003, S. 66). Diese großen Serverfarmen haben keinen besonders großen Datenaustausch mit dem externen Kunden, aber die Server untereinander sehr. Das Endergebnis der Arbeit, zum Beispiel die Liste der Suchergebnisse, ist nicht besonders lang, aber um es zu berechnen, müssen ungeheure Datenmengen fließen.

Der Bedarf an Bandbreite steigt proportional zur Größe der Farm. Bei 10000 Servern, die sich mit einem Gigabit pro Sekunde verständigen wollen, muss das verbindende Netzwerk zehn Terabit pro Sekunde transportieren. Damit bekommen *switches* (eigentlich »Schalter«), welche die Datenströme lenken, eine zentrale Bedeutung.

**Spektrum:** Bauen Sie die Chips für Ihre Geräte selbst?

**von Bechtolsheim:** Nein. Bei der heute am Markt verfügbaren Qualität lohnt sich eine Eigenentwicklung nicht. Vor allem bei den aktuellen Strukturgrößen von 45 oder gar 42 Nanometern wären die Kosten nur bei extrem großen Stückzahlen einzuspielen.

Wir entwickeln die Software. An jedem *switch* sitzt ein vollwertiger Com-

puter. Auf dem läuft unser Betriebssystem EOS, und jede einzelne Tätigkeit eines *switches* ist durch ein eigenes Programm, einen »Prozess«, realisiert. Die Prozesse arbeiten weitgehend unabhängig voneinander, und wenn einer wegen eines Softwarefehlers ausfällt, arbeiten die anderen weiter. Das macht die Stabilität unseres Systems aus. Man kann sogar während des laufenden Betriebs neue Versionen der Software aufspielen.

**Spektrum:** Wie viele Rechner bedient ein Switch?

**von Bechtolsheim:** Unsere Kunden bauen 20 bis 40 Rechner in ein Gestell (*rack*) ein. Der zugehörige *switch* hat 48 Ein-/Ausgänge (*ports*), davon sind 40 mit den Rechnern verbunden und die anderen mit einer Art Telefonzentrale, dem *core switch*. Unser neuester *core switch* hat 384 *ports*, das reicht also für  $40 \cdot 384 = 15\,360$  Rechner insgesamt.

Viele Webserver sind heute mit Verbindungsleistung unterversorgt. Die *switches* von Arista liefern die zehnfache Leistung zu ungefähr demselben Preis wie bisherige *switches*, was dem Kunden enorme Kostenvorteile bringt. ◀

Das Interview führte **Christoph Pöppe**, Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

BOTANIK

## Blümchensex

Edvard Koinberg hat die Beobachtungen Carl von Linnés vom Leben der Blütenpflanzen in prachtvolle Bilder umgesetzt.

Carl von Linné (1707–1778) hinterließ der Nachwelt ein Herbarium mit fast 20 000 Pflanzen. So weit wird es der schwedische Fotograf Edvard Koinberg wohl nicht bringen; schließlich hat er erst vor zehn Jahren angefangen und ist schon 45 Jahre alt. Aber er eifert seinem Vorbild nach Kräften nach, mit einem Mittel, das er meisterlich beherrscht, das Linné aber noch nicht zur Verfügung hatte: der Fotografie. Ein Produkt seines groß angelegten Projekts ist das vorliegende Buch.

Zwei Essays von Henning Mankell und Tore Frängsmyr führen in das Leben des großen Systematikers ein. In seinem »Calendarium florum« hatte Linné die Pflanzen nach ihrer Blütezeit geordnet und nach der Anzahl und Anordnung ihrer Sexualorgane charakterisiert. Was Botaniker im Gegensatz zum Laien wissen: Linné war der Erste, der Staubgefäße und Stempel der Pflanzen

mit den Geschlechtsorganen der Tiere verglich und damit seine pruden Mitmenschen schockierte: »Auch die Blumen genießen die Wonnen der Liebe.« Etwas konkreter schreibt Linné im »Systema naturae« über die »vierte Klasse«, »dass sich in der Kammer vier Männer, zwei große und zwei kleine, zusammen mit der Braut befinden«.

Koinberg folgt in seinem Buch der von Linné praktizierten Einteilung des Jahres in zwölf sehr unterschiedlich lange Stadien im Leben einer Pflanze. Wie man an den Kompositionen von Tulpenblüten verschiedenen Alters erkennt, hat er sich auch von niederländischen Malern des 17. und 18. Jahrhunderts inspirieren lassen.

Manche Mohnblüten sind so schön, dass man bereit wäre, sie sich hundertfach in Form einer Tapete an die Wand zu kleben. Erst in der Fotografie offenbaren Klettenblüten ihren ästhetischen Reiz, den man nicht



zu schätzen weiß, wenn einem die Dinger in den Klamotten hängen. Auch die keimende Zwiebel, die man in der eigenen Küche verärgert in den Biomüll wirft, ist eigentlich sehr ansehnlich! Überhaupt muss man sich bei so manchem Prachtbild vergegenwärtigen, wie klein das Original eigentlich ist.

Kein Text, keine Seitennummerierung stört das ästhetische Erlebnis. Wer wissen will, wie die abgebildete Pflanze heißt, muss sie hinten im Kurzverzeichnis mit Kleinbildern wiederfinden.

Schauen Sie sich die Bilder am besten bei reichlicher Beleuchtung an. Der großflächige, gelegentlich unmotiviert schwarze Hintergrund gibt der Sache einen edlen Anstrich, neigt aber dazu, die Pracht der Farben zu erdrücken.

Alice Krüßmann

Die Rezensentin ist Bildredakteurin bei »Spektrum der Wissenschaft«.

Edvard Koinberg

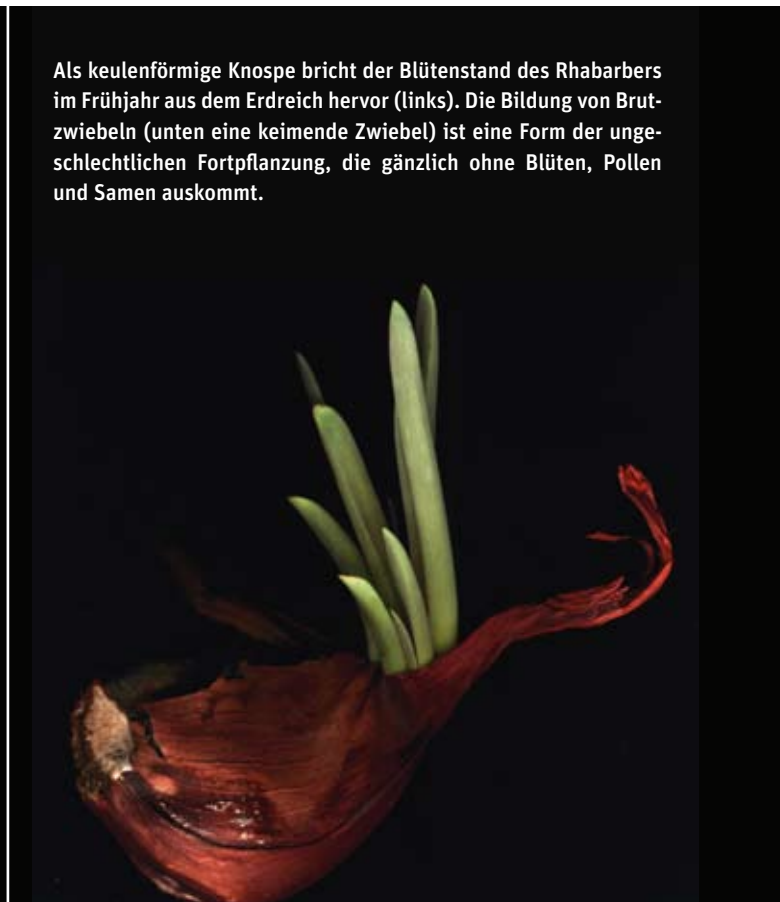
### Herbarium Amoris

Das Liebesleben der Pflanzen

Aus dem Schwedischen von Wolfgang Butt und Nils Köster. Taschen, Köln 2009. 280 Seiten, € 29,99



Als keulenförmige Knospe bricht der Blütenstand des Rhabarbers im Frühjahr aus dem Erdreich hervor (links). Die Bildung von Brutzwiebeln (unten eine keimende Zwiebel) ist eine Form der ungeschlechtlichen Fortpflanzung, die gänzlich ohne Blüten, Pollen und Samen auskommt.





# Das menschliche Bewusstsein – ein Hybrid aus Evolution und Kultur

Merlin Donald setzt den vorherrschenden reduktionistischen Theorien eine etwas andere Vorstellung vom Bewusstsein entgegen.

Aus der Fülle von Literatur zum Themenkomplex Denken, Bewusstsein und Gehirn hebt sich das Buch des kanadischen Kognitionsforschers und emeritierten Psychologieprofessors Merlin Donald durch zweierlei heraus: seinen besonderen Bewusstseinsbegriff und seine evolutionäre Perspektive.

Für Donald ist das menschliche Bewusstsein Kennzeichen einer »Hybridintelligenz«, in der die individuelle, interne Gehirntätigkeit und die kollektive, externe Kultur auf Engste verschränkt sind. Eine ausgereifte, umfassende Theorie des Bewusstseins liege zwar noch in weiter Ferne; betrachte man jedoch die vorliegenden wissenschaftlichen Erkenntnisse aus der Vogelperspektive, so würden immerhin die Eckpunkte einer solchen Theorie erkennbar.

Sehr kritisch setzt sich Donald zunächst mit den Thesen der von ihm so genannten »Hardliner« auseinander, allen voran deren Galionsfigur Daniel Dennett (Spektrum der Wissenschaft 4/1995, S. 118). Die Vertreter dieser durchaus heterogenen Gruppe eint, dass sie dem Bewusstsein seine Komplexität absprechen und/oder es in eine einfache operationale Definition zwingen wollen. Viele halten Bewusstsein für ein Epiphänomen, ein bedeutungsloses Nebenprodukt neuronaler Aktivität, für bloßes Gewahrwerden von Sinneswahrnehmungen, äußerst beschränkt in seiner Kapazität und irrelevant für die große Mehrheit der mentalen Prozesse, die unbewusst ablaufen.

Dem hält Donald entgegen, dass das Bewusstseinsmodell und sogar Menschenbild der Hardliner nicht der Realität entspricht, sondern nur deshalb so atomistisch und reduktionistisch ist, weil die zugehörigen Laborstudien so sind – und nicht anders sein können. Solche experimentellen Befunde können daher nur für die unteren Bewusstseinsstufen wie Wahrnehmung und Kurzzeitgedächtnis gelten. In der realen Welt stellt sich das Bewusstsein dagegen keineswegs als eine serielle Folge kurzer »Tunnelblicke« dar; vielmehr bildet es ein ungeheuer vielschichtiges Geflecht kognitiver und metakognitiver Prozesse auf der »mittleren Zeitebene«: Die Bewusstseinstätigkeit

wird über Stunden als kohärentes Ganzes erlebt.

Dass viele der beteiligten Prozesse automatisiert sind, ist kein Ausdruck eines Unbewussten; die Automatisierung ist vielmehr ein »Abkömmling« des Bewusstseins. Die Notwendigkeit einer »überzeugenden Phänomenologie des auf der mittleren Zeitebene operierenden Bewusstseins« untermauert Donald unter anderem mit klinischen Fällen von Bewusstseinsstörungen (und erinnert damit ein wenig an Oliver Sacks), aber auch anhand literarischer Darstellungen von Bewusstseinsprozessen. Dass ein gestandener Experimentalpsychologe gerade aus der Kritik am reduktionistischen experimentellen Paradigma zu einem so pragmatischen, auf die Lebenswelt rückbezogenen Ansatz gelangt, verleiht dem Buch eine sympathische Konkretheit.

Donalds Thesen zur Evolution des menschlichen Bewusstseins sind ebenfalls etwas unkonventionell. Nicht eine Entwicklung der Gehirngröße oder -anatomie sei es, die das menschliche vom tierischen Bewusstsein unterscheidet; vielmehr seien es die für die Steuerung, Überwachung und Metakognition zuständigen Exekutivfunktionen des Gehirns. Diese befähigten den Menschen, sich in einer langen Folge von Anpassungsschritten immer neue »kognitive Dämonen«, automatisierte kulturelle Algorithmen, zusammenzubauen, deren komplexester und fortgeschrittenster die Sprache ist.

## Enkulturation als Evolutionsfaktor

Nach Donald bildet dieses – nicht in autonome Teilsysteme zerlegbare – Exekutivsystem die materielle Grundlage des Bewusstseins und bestimmt dessen Eigenschaften. Die Evolution hat den Menschen zu einem Spezialisten für »verfeinerte exekutive Steuerung« gemacht, die ihn zum »Ausbruch aus dem Nervensystem«, mithin zur Erzeugung von Kultur befähigt.

Kultur wirkt als externer, kollektiver Gedächtnisspeicher, und wir sind so eng in sie eingebunden, dass diese »Enkulturation« einen zentralen Faktor in der menschlichen Evolution darstellt. An Studien mit »enkul-

turierten« Menschenaffen einerseits und der frühkindlichen Entwicklung andererseits arbeitet Donald die Verzahnung und Wechselwirkung zwischen Kultur und Geist heraus. Er tut dies unter der von Jean Piaget begründeten und heute von Forschern wie Michael Tomasello vertretenen konstruktivistischen Perspektive, wonach sich die mentalen Strukturen und Prozesse nicht auf Grund eines angeborenen Programms entfalten, sondern auf Grund bestimmter bewusstseinsgesteuerter Erfahrungssequenzen. Das Bewusstsein gewichtet die einströmenden Daten und konstruiert daraus die Welt und zugleich sich selbst. Die Enkulturation verläuft von außen nach innen, auch wenn die bewusst erlernten Bestandteile der Kultur durch Automatisierung ins Unbewusste absinken.

Das durch die Enkulturation geschaffene (und durch die Schrift haltbar gemachte) »externe Gedächtnisfeld« befreit das Gehirn aus seinen biologischen Begrenzungen und wirkt darüber hinaus auf die Strukturen der bewussten Geistestätigkeit zurück. »Das Bewusstsein des Menschen ist zum einen ein spezifisches Anpassungsmerkmal, das uns befähigt, die Turbulenzen der Kultur zu meistern, und zum anderen auch der hauptsächlichste Kanal, über den die Kultur ihren prägenden Einfluss auf uns ausübt.«

Donald hat ein Opus magnum geschrieben. Er breitet eine Fülle von Material aus zahlreichen Forschungsgebieten vor dem Leser aus: Neurowissenschaften, vergleichende Verhaltensforschung, experimentelle und klinische Psychologie, Entwicklungspsychologie, Anthropologie, Linguistik, Sozialwissenschaften, Philosophiegeschichte. Er tut dies anschaulich, stringent und mit guter Leserführung, in wort- und bildmächtiger Sprache, ohne zu simplifizieren. Man folgt dem Autor gerne durch schwierige Zusammenhänge, hinein in anregende Debatten und zu offenen Fragen. Er entfaltet ein theoretisches Netzwerk, das genauso komplex ist wie sein Gegenstand, und der Leser verheddert sich nirgends darin.

Das amerikanische Original erschien 2001, so dass trotz Aktualisierung kein nach 2000 veröffentlichtes Material mehr



in den Text einging. Folgenreiche Entdeckungen wie die der Spiegelneurone, von denen man gerne gesehen hätte, wie Donald sie in sein Modell integriert, finden nur in Fußnoten Erwähnung. Doch das tut dem Buch nicht grundsätzlich Abbruch. Auch nicht, dass der Bezug etwa auf die Philosophie gelegentlich nur schmückendes Beiwerk ist oder nicht über Namedropping hinausgeht.

Störend sind Nachlässigkeiten des Lektorats wie falsch geschriebene Namen und die verschobene Kapitelaufzählung im sehr nützlichen Prolog, die den Leser etwas in die Irre führt. Und ausgerechnet im Kapitel

über Sprache liest man konsequent »Worte«, wo »Wörter« gemeint sind.

Dennoch: ein Buch, das man mit Gewinn und Genuss lesen kann.

*Gabriele Herbst*

Die Rezensentin hat Psychologie und Philosophie studiert und ist Sachbuchübersetzerin in Mannheim.

Merlin Donald

### Triumph des Bewusstseins

Die Evolution des menschlichen Geistes

Aus dem Amerikanischen von Christoph Trunk  
Klett-Cotta, Stuttgart 2008.  
348 Seiten, € 24,90



ENERGIE

## Geballter Kraftakt

Die wissenschaftliche Expertise der Max-Planck-Gesellschaft zum brennenden Energiethema wartet mit überraschenden Lösungsvorschlägen auf.

»Die Wissenschaft« in Gestalt der großen Max-Planck-Gesellschaft (MPG) äußert sich zu einem wahrhaft großen Thema, nämlich der Zukunft der globalen Energieversorgung – und bleibt dabei wohlthuend bodenständig. Obwohl die MPG in erster Linie, und das äußerst erfolgreich, außeruniversitäre Grundlagenforschung betreibt, liest sich der vorliegende Sammelband ganz und gar nicht abgehoben, auch wenn manche Literaturliste genau das auf den ersten Blick befürchten lässt.

Die Menschheit wächst nicht nur, sie legt auch, vor allem in China und Indien, rasant an Wirtschaftskraft und damit an Energiebedarf zu. Die Aufgabe, diesen zu decken, ohne durch übermäßigen Eintrag von CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre das Weltklima aus dem Gleichgewicht zu bringen, ist aus heutiger Perspektive schlicht unlösbar (siehe auch Spektrum der Wissenschaft Spezial 1/2007 »Lässt sich der Klimawandel stoppen?«). Demgegenüber bieten die Beiträge dieses Sammelbands Lösungen für einzelne Teilaspekte an, und zwar so überzeugend, dass am Ende doch ein gewisser Optimismus aufkommt.

Ein solcher Teilaspekt ist die Speicherung von Energie im Auto. Die Sonne strahlt mehr Energie auf die Erde ein, als die Menschheit in den kühnsten Prognosen benötigt; das Problem besteht darin, eine Portion davon so zu konzentrieren, dass ein Auto sie mitschleppen kann. Das gelingt

bisher nur in Form des klimaschädlichen Kraftstoffs im Tank; es funktioniert (noch) nicht mit molekularem Wasserstoff (H<sub>2</sub>); es gerät in den Bereich des wirtschaftlich Machbaren mit modernen Batterien für Elektroautos – wenn die teuren Stromspeicher noch den Nebenjob als Puffer für das Gesamtnetz übernehmen (Spektrum der Wissenschaft 4/2009, S. 96).

Den größten Teil der Zeit ist ein Auto ohnehin nicht in Bewegung; da könnte seine Batterie mithelfen, die Differenz zwischen dem stark schwankenden Stromangebot aus Wind- und Sonnenenergie einerseits und der ebenfalls schwankenden Nachfrage andererseits auszugleichen. Ferdi Schüth, Direktor am MPI für Kohlenforschung, argumentiert, dass 50 Millionen Elektrofahrzeuge mit je 100 Kilowattstunden Kapazität den (nicht nur elektrischen!) Primärenergiebedarf der Bundesrepublik für einen halben Tag speichern könnten. Das würde allerdings aufwändige Infrastrukturen und Regelungen erfordern, die ihrerseits zu Änderungen im Energiekonsum führen.

Einen merkwürdigen Fremdkörper liefert Carl Christian von Weizsäcker, emeritierter Leiter des energiewirtschaftlichen Instituts der Universität zu Köln und Mitglied unzähliger hochrangiger Beratungsgremien. Sollte er Recht haben, dann gäbe es das Energieproblem gar nicht und das Klimaproblem nur ein bisschen, und sämtliche Bemühungen seiner Koautoren würden sich

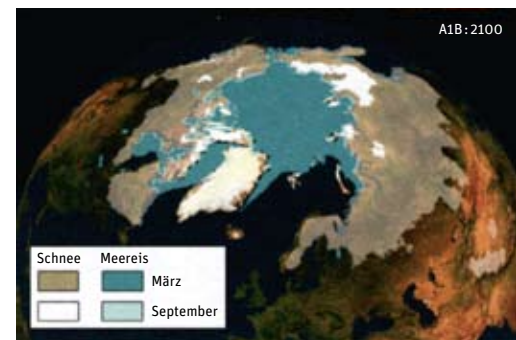
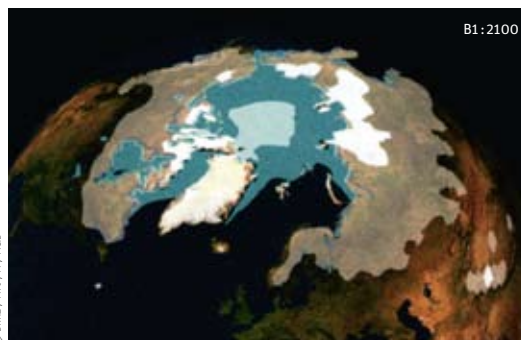
schlicht erübrigen. Fossile Energieträger seien nicht wirklich knapp, sondern höchstens mühsam zu fördern; entsprechend hätten wir noch gigantisch viel Zeit, um unseren Energieverbrauch auf alternative Quellen umzustellen und uns mit dem Klimaproblem zu arrangieren. Sicher, die enormen Investitionen für die Erschließung minderwertiger Ölvorkommen würden kurzfristig Marktverwerfungen erzeugen und langfristig höhere Preise verursachen. Aber der funktionierende globale Kapitalmarkt werde die Verfügbarkeit von Energie schon richten. Nun ja, dieses unerschütterliche Vertrauen in die Marktkräfte hat von Weizsäcker vor der gegenwärtigen weltweiten Finanzkrise zu Papier gebracht.

Die Entwicklungsländer könnten ihren Energiebedarf ohnehin nur mit Hilfe von Kohle, Öl und Gas decken; also sei »völlig klar, dass das Weltklimaproblem nur gelöst werden kann«, wenn »CO<sub>2</sub>-Abscheidung und Sequestrierung« (Einlagerung in tiefere Erdschichten) gelingen. »Noch so viele Windräder, Solaranlagen und Kernkraftwerke können ›Clean Coal‹ nicht ersetzen.« Ganz im Gegenteil: Die Förderung erneuerbarer Energien erhöhe ebenso wie der Bau zusätzlicher Kernkraftwerke nur das Angebot, verbillige in der Tendenz den Preis und rege damit einen höheren Energieverbrauch an.

Fast die Hälfte des Gesamtumfangs nehmen die Beiträge zur biogenen Energieerzeugung ein. Dabei sind die Ergebnisse zur Kraftstofferzeugung aus Pflanzen so enttäuschend, wie man sie aus den Medien kennt: Energiepflanzenanbau konkurriert mit der Nutzung der Pflanzen als Nahrungs- und Futtermittel, und der Wirkungsgrad ist schlecht. Biokraftstoffe enthalten lediglich ein Tausendstel der Energie des Sonnenlichts, das auf das Ackerland gefallen ist.

Interessanter ist da schon die Nutzung des Methans. Bei der Photosynthese fällt von Natur aus so viel CH<sub>4</sub> an, dass seine Verbrennung zehn Prozent des Weltenergiebedarfs decken würde, ganz zu schweigen von den Methanhydratlagern am Grund der Weltmeere und im Permafrostboden, die in ihrem Energiegehalt wahrscheinlich allen anderen fossilen Energieträgern zusammen gleichkommen. Aber abgesehen vom Biogas aus dem Kuhstall sind die natürlichen Methanquellen praktisch nicht nutzbar.

Es gibt allerdings Bakterien, die aus Wasserstoffgas und CO<sub>2</sub> Methan synthetisieren können, das im Gegensatz zu Wasserstoff leicht zu speichern und zu transportieren ist. Gewiss benötigt man noch effizient



entere Bakterienstämme. Friedrich Widdel, Direktor am MPI für Marine Mikrobiologie in Bremen, diskutiert darüber hinaus Wasserstoff, Ethanol und Methanol sowie Öle und andere Stoffe als Produkte bakterieller Aktivität. Mikrobielle Brennstoffzellen könnten mit Glukose oder Essigsäure »gefüttert« werden. Vielleicht werden einmal Abwässer auf diese Art Elektrizität erzeugen? Widdel weist in Summe diesen Anwendungen aber eher eine lokale Bedeutung zu, global würden sie nicht zu einer Entlastung der Energiebilanz beitragen.

Hans-Joachim Queisser präsentiert den derzeitigen Forschungsstand zum Thema Solarzellen, nicht ohne auf die wesentlichen Beiträge seines Stuttgarter Instituts für Festkörperphysik bei der Erforschung, Verbesserung und Verbilligung der Sonnenbatterien hinzuweisen. Bis die Technik mit den traditionellen Energieträgern konkurrenzfähig sei, müssten allerdings die Materialkosten verringert und die Effektivität erhöht werden. Bei den organischen Licht emittie-

renden Dioden (OLEDs), die der Konsument bereits in Displays für Mobiltelefone und PCs kennt, den flexiblen organischen Feldeffekttransistoren (OFETs), die beispielsweise als schnelle Schalter und für den Energiesparmodus elektronischer Geräte eingesetzt werden, oder den »mobilen, aufrollbaren und großflächigen« wie auch »transparenten und berührungsempfindlichen« Bildschirmen begeben sich die sonst so überaus der fundamentalen Wissenschaft verschriebenen MPG-Forscher sogar ins Reich der anwendbaren Innovation.

Der letzte Beitrag des Bandes über die Kernfusion als Energiequelle der Zukunft kommt nicht superwissenschaftlich daher, sondern gibt sich anwendungsnah. Zudem liest er sich leicht und ist ansprechend illustriert. Alexander M. Bradshaw erläutert hier die Prinzipien der Technologie sowie das Experiment ITER, das im südfranzösischen Cadarache geplant ist. Er hält es für möglich, dass es ab 2035 eine erste Stromproduktion und 2050 sogar schon ein erstes

**Die Eisbedeckung des Nordpolarmeers im März und September heute (links) und im Jahr 2100 in zwei verschiedenen Szenarien des IPCC (Mitte und rechts)**

kommerzielles Fusionskraftwerk gibt. Falls sich die Technologie bis zum Jahr 2100 etabliert, so sei mit Kosten von sieben bis zehn Eurocent für eine Kilowattstunde zu rechnen. Das ist zum Schluss des Bandes doch ein recht optimistischer Ausblick!

*Reinhard Löser*

Der Rezensent ist promovierter Physiker und habilitierter Volkswirt; er arbeitet als freier Journalist in Ebenhausen bei München.

Peter Gruss, Ferdi Schüth (Hg.)

**Die Zukunft der Energie**

Die Antwort der Wissenschaft

Ein Report der Max-Planck-Gesellschaft

C.H.Beck, München 2008.

333 Seiten, € 16,90



**MATHEMATIK**

**Vergnüglicher Tanz durch die Zahlenwelt**

Felix Paturi zeigt uns eine überraschende Verbindung zwischen mehrdimensionalen Würfeln und magischen Quadraten.

Der durchschnittliche Zeitgenosse hält Mathematik für eine sehr exotische, gesellschaftlich irrelevante Beschäftigung weniger, begabter Menschen und sich selbst zu derlei Tun für hoffnungslos unfähig. Die erste Meinung ist völlig falsch und die zweite in den meisten Fällen. Da gibt es reichlich Vorurteile abzubauen.

Hier setzt der Wissenschaftspublizist Felix R. Paturi mit seinem neuen Buch an: Es soll beim Leser die Faszination und Entde-

ckerfreude für die Zahlenwelt neu entfachen und sein Erstaunen erregen.

Gleich zu Beginn, im Kapitel »Kakteen, Kunst und DNA«, zeigt Paturi verblüffende Zusammenhänge auf. Er selbst fand als Jugendlicher heraus, dass das Verhältnis zwischen der Anzahl rechts- und linkslaufender Linien auf Kakteen gerade dem Goldenen Schnitt entspricht. Diese irrationale Zahl tritt in erstaunlich vielen Zusammenhängen auf: Man findet sie in der Geometrie von

Blüten, in der Kunst bei den Kompositionsprinzipien von Rembrandt und Leonardo da Vinci und – besonders erstaunlich – im Verhältnis bestimmter Abstände in der Helix der menschlichen DNA. Handelt es sich um ein tieferes Geheimnis der Natur?

Das kann uns auch Paturi nicht verraten. Stattdessen zeigt er uns im nächsten Kapitel, wie man einen fünfdimensionalen Würfel zeichnen kann – das Kantenmodell eines solchen in der Projektion in die Ebene, um genau zu sein. Es folgt eine verblüffende Querverbindung zu den magischen Quadraten: Indem man die Ecken eines so gezeichneten mehrdimensionalen Würfels auf eine von Paturi dargelegte Weise systematisch mit Zahlen versieht, erhält man magische Würfel Flächen, das heißt, vier Eckpunkte eines beliebigen Quadrats aufsummiert ergeben stets dieselbe Zahl. Wer sich an Würfeln mit derlei Eigenschaften



weiter austoben möchte, findet dazu im Kapitel »Planetensiegel und magische Würfel« reichlich Gelegenheit.

Auch im Folgekapitel »Wundersame Würfelwelten« wird man schnell anfangen zu grübeln: Zwei Würfel tragen auf ihren Flächen die Zahlen 2, 11, 16, 22, 25, 35 beziehungsweise 4, 13, 18, 20, 23, 33. Wirft man sie gleichzeitig, so gewinnt der eine wie der andere genau mit Wahrscheinlichkeit  $1/2$ . Aber verglichen mit einem dritten Würfel, zum Beispiel 3, 17, 17, 17, 26, 31, ist der eine auf die Dauer schwächer, der andere stärker.

Wie kann das sein? Jürgen ist genau so groß wie Stephan, Peter ist größer als Stephan, aber kleiner als Jürgen? Bei Körperlängen können derlei Wundersamkeiten nicht vorkommen. Die Relation »größer als« auf der Menge der Menschen – allgemeiner: auf der Menge der reellen Zahlen – ist transitiv. Warum und wie es zueinander nicht-transitive Würfel gibt, zeigt uns Paturi ausführlich und gut verständlich mit Tabellen, in denen aufgelistet ist, bei welchen Kombinationen ein Würfel den anderen schlägt.

An manchen Stellen fordert der Autor seine Leser sogar auf, die falschen Schluss-

folgerungen aufzudecken, mit denen er Aussagen wie  $2=6$  beweist. Das klingt sehr anstrengend; aber Paturi lockert den Text mit vielen, auch nichtmathematischen Anekdoten auf. So erfährt man nebenbei, in wie vielen, vor allem religiösen Kontexten die Drei als Symbol der Vereinigung gilt, was die Rituale der Hopi-Indianer mit der Topologie gemein haben oder wie man schnell einige publikumswirksame Tricks mit so genannten Fadenspielen erlernt.

Indem Paturi als Icherzähler den Leser auf kreative Weise durch diese verschiedensten Tüfteleien führt, schafft er eine geistige Nähe und gibt ihm ab und an sogar die Gelegenheit, selbst etwas zu entdecken. Damit verschafft er dem Buch das Potenzial, eine angeblich trockene Materie faszinierend zu vermitteln.

Doch diese Chance wird an einigen Stellen verspielt: Paturis Schreibstil mit seiner oft sehr einfachen Ausdrucksweise ist gewöhnungsbedürftig. Die ständige Hervorhebung der eigenen Person und ihrer Errungenschaften kann einem sensiblen Leser auf die Nerven gehen. Magische Quadrate nehmen einen auffallend großen Teil des Buchs ein; wehe dem, der dafür nicht genügend Interesse aufbringt. Das Kapitel mit den falschen Beweisen entpuppt sich als monoton; es genügt, beim ersten falschen Beweis den Fehler zu finden, denn sie sind alle nach demselben Muster gebaut.

Die äußere Erscheinung ist wenig ansprechend: Das grobe Papier, die Textgestal-

## Eine scheinbar unmögliche Figur, aus echtem Holz gezimmert

tung, die ein wenig wie ein privates Word-Dokument aussieht, und die ausschließlich schwarz-weißen Abbildungen versprühen keinen besonderen Charme.

Nach Paturi ist Mathematik eine Art Sprache, die inhaltliche Aussagen als »wahr« oder »falsch« bezeichnet. Dies ist insofern richtig, als beim Herangehen an ein mathematisches Problem bestimmte Grundannahmen (Axiome) und Schlussregeln bereits als gültig vorausgesetzt werden. Eine mathematische Aussage steht entweder im Einklang oder im Widerspruch zu diesen. Da in der Mathematik alles so einfach und so systematisch wie möglich formuliert wird, tritt dieser Einklang oder Widerspruch offensichtlicher zu Tage als bei Aussagen im normalen Leben.

Aber von dieser so hochgepriesenen logischen Strenge praktiziert Paturi in seinem Buch herzlich wenig; stattdessen tänzelt er häufig ausschließlich spielerisch durch die Zahlenwelt. Wir lernen, von einem Phänomen zum anderen Brücken zu schlagen und darüber zu staunen. Doch in welchen mathematischen Kontext sich solche Brücken einbetten lassen, erfährt man weniger. So hätte es sich im Kapitel über Fadenspiele und Knoten angeboten, Konzepte aus der Topologie etwas formalisierter darzustellen.

Insgesamt aber erfüllt das Buch der »Leckerbissen« seinen Anspruch: Wir werden angehalten, zu hinterfragen, und geraten auf verschiedenen Wegen, vorbei an Paradoxa, Mathematikerwitzen, Zitaten und Naturzusammenhängen, in die Welt von Zahlen. Zudem ist dieser Weg – entgegen dem Untertitel – jedem Interessierten gut zugänglich. Damit trägt das Buch dazu bei, einige Vorurteile abzubauen. Wem es allerdings um die weiterreichenden, bedeutenden Vorteile der Mathematik geht, wer sich in der hierfür notwendigen Systematik und Formalität üben möchte, dem wird diese Lektüre nicht ausreichen.

*Roland Pilous*

Der Rezensent studiert Mathematik und Philosophie an der Freien Universität Berlin. Dort beschäftigt er sich vornehmlich mit den Grundlagen der topologischen Räume.

Felix R. Paturi

**Mathematische Leckerbissen**

Das Buch für Querdenker

Patmos, Düsseldorf 2008. 271 Seiten, € 22,90

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

## Exoplaneten

Astronomen finden sie auch dort, wo sie nie mit ihnen gerechnet hätten. Die fremden Welten umkreisen Braune und Weiße Zwerge – und selbst Neutronensterne



PHIL SAUNDERS, SPACE CHANNEL LTD.

### WEITERE THEMEN IM OKTOBER

#### Primat in Nadelstreifen

Warum Anleger spekulieren, bis die Blase platzt, erklären Verhaltensökonomien mit Entscheidungsstrategien aus der Frühzeit des Menschen

#### Ursache der Migräne

Verschuldet letztlich eine Fehlfunktion von Kontrollzentren im Hirnstamm den pochenden Kopfschmerz und die Migräne-Aura?

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)

JEAN-FRANÇOIS PODEVIN



#### Neues Molekül des Lebens?

Ein Zwitter aus Eiweiß und Erbsubstanz könnte die Basis einer neuen Wirkstoffklasse bilden – und zugleich die Grundlage von künstlichen Lebewesen



#### Hunger bedroht Zivilisation

Nahrungsknappeheit durch Erd erwärmung, Wassermangel und Bodenerosion droht immer mehr Länder ins Chaos zu stürzen und gefährdet so die globale Stabilität



GETTY IMAGES / PERANDERS PETERSSON