

# Spektrum

DER WISSENSCHAFT

SPEKTRUM-  
INTERVIEW

Hans Schöler  
und der Disput  
um Stammzellen

DEUTSCHE AUSGABE DES **SCIENTIFIC  
AMERICAN**

ASTRONOMIE

Neutrino-Teleskope blicken  
ins Zentrum von Sternen

HIRNFORSCHUNG

Warum unser Gehirn  
zwei Seiten hat

KOMMUNIKATION

Drahtlose Spontannetze  
mit Handys

SERIE

# ZEIT

TEIL I

## Zeitvorstellungen im alten Ägypten



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



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

Spektrum  
DER WISSENSCHAFT

07/10

JULI 2010





Reinhard Breuer  
Chefredakteur

## Kann es vernünftig sein, sich betrügen zu lassen?

**Neulich im Taxi in Berlin**, auf dem Weg zurück ins Hotel von einer Veranstaltung der Max-Planck-Gesellschaft: Plötzlich spricht mich der Fahrer über die Schulter an. Er würde mich kennen, sei ich nicht der Chefredakteur von »Spektrum«? Und sei nicht mein Vorgänger Albrecht Kunkel gewesen? Ich bin verblüfft, denn das ist immerhin zwölf Jahre her. Der Fahrer outet sich als »Spektrum«-Abonnent seit 1985: »Ich bin länger dabei als Sie«, sagt er vergnügt. Was ihn im Heft interessiere, will ich jetzt wissen. Astronomie und Kosmologie, antwortet er, zunehmend auch Quantenphysik.

Wie zur Rechtfertigung berichtet er von seinem Erweckungserlebnis während des Schullandheims, als er, endlich weitab seiner lichtverschmutzten Ruhrpottstadt, zum ersten Mal so richtig den Nachthimmel und die Milchstraße gesehen habe – und dabei fast vom Balkon gestürzt sei. Und gefalle ihm an »Spektrum« etwas nicht? »Das Heft ist mir zu bunt«, bekennt er. Früher hätte es da noch Artikel von zehn oder zwölf Seiten Umfang gegeben, »mit viel Text und weniger Bildern«.

Ja, das Erscheinungsbild von »Spektrum« hat sich in den letzten Jahren mehrfach gewandelt. Nicht zuletzt auch, weil heute die Medienlandschaft längst ganz anders aussieht. Eine kleine Andeutung: Wir denken derzeit über eine Weiterentwicklung unserer Heftgestaltung für das kommende Jahr nach. Selbst wenn kein Weg zu den bildarmen Zwölfseitern zurückführt – hoffentlich wird auch mein Taxifahrer an der zukünftigen Anmutung Gefallen finden. Denn gerade für leidenschaftliche Leser wie ihn machen wir »Spektrum«.

**Geht man auf die Webseite der US-amerikanischen Gefängnisse** ([www.bop.gov](http://www.bop.gov)) und sucht nach Bernard Madoff, dann erfährt man, dass der Anlagebetrüger voraussichtlich am 14. November 2139 entlassen wird; darauf hat mich mein Redaktionskollege Christoph Pöppe aufmerksam gemacht. Madoff hatte bis 2008 (echte) zehn Milliarden Dollar in den Sand gesetzt und wurde dafür zu 150 Jahren Gefängnis verurteilt. Offenbar haben die Behörden für den 72-jährigen bereits 20 Jahre Rabatt für mutmaßlich gute Führung abgezogen.

Ohne die Verwerfungen der letzten Finanzkrise hätte Madoff sein Schneeballsystem womöglich noch lange weiterbetreiben können. Denn er agierte wesentlich raffinierter als sein berühmtes Vorbild, Charles Ponzi. Der Italiener hatte in den 1920er Jahren mit einem klassischen Pyramidensystem zahllose Kunden übers Ohr gehauen, war jedoch am Schluss einfach zu ungeschickt geworden. Unser Autor Jean-Paul Delahaye analysiert die Mathematik solcher Systeme.

Zu meiner Verwunderung zeigt er, dass es tatsächlich vernünftig sein kann, sein Geld zeitweise solchen Systemen anzuvertrauen, selbst wenn man »Bescheid weiß«. Der Beweis dafür findet sich bei Madoff selbst: Einige seiner Kunden haben nicht verloren, sondern im Gegenteil große Summen abgeräumt. Beachtet man einige Regeln, könnte die wissentliche Teilnahme an einem Betrugssystem bisweilen demnach sogar »vernünftig« sein (S. 72).

Herzlich Ihr

*Reinhard Breuer*



Zum ersten Mal legen wir dem Monatsheft ein ganzes Sonderheft bei. »Schwerelos« heißt das Magazin, das wir in Kooperation mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt produziert haben. Die Beiträge geben Einblick, welche Forschungsvorhaben Deutschlands größte Organisation für Weltraumforschung außerhalb der Erdatmosphäre verfolgt – mit Raketen, auf der Raumstation oder mit Satelliten.

# INHALT



68

## MENSCH & GEIST

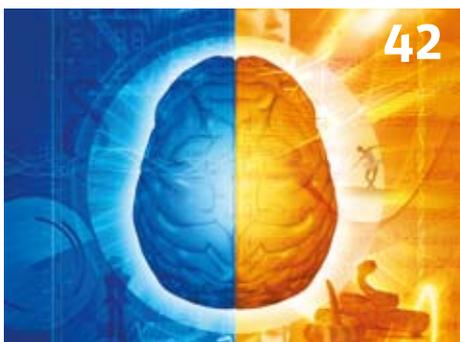
Die Mathematik des Milliardenbetrugs



80

## ERDE & UMWELT

Simulation der künftigen Treibhauswelt im Freiland



42

## MEDIZIN & BIOLOGIE

Uraltes Erbe:

Zweiteilung des Gehirns

## AKTUELL

### 8 Spektrogramm

Bakterien mit synthetischem Erbgut · Mit Komplexität gegen Kuckuckseier · Grundchemikalien aus Biomasse u. a.

### 11 Bild des Monats

Exotischer Ur-Tintenfisch

### 12 Neandertaler-Erbgut entschlüsselt

Beweis für genetische Vermischung von Mensch und Neandertaler

### 14 Künstliche Fotosynthese

Nanotechnische Elektrode produziert mittels Sonnenlicht Wasserstoff

### 16 Atominterferometrie mit verschränkten Teilchen

Sie erlaubt Messungen bisher unerreichter Präzision – etwa für Atomuhren

### 16 Meine Eizelle gehört mir!

EU-Gerichtshof erlaubt Eizellspenden

### 20 Kernfusion in der Schwebel

Neues Konzept für Fusionskraftwerk mit frei schwebendem Magnetring

### 22 Springers Einwürfe

Umsonst ist nur der Tod ...

## ASTRONOMIE & PHYSIK

### 24 ► Blick mit Neutrino-Augen

Neutrinos durchdringen Materie fast ungehindert. Daher lassen sie Forscher bis ins Innere von Sternen blicken – Beginn einer neuen Art der Astronomie

SCHLICHTUNG!

### 32 Die Energie der platzenden Kirsche

Was einer reifen Frucht den Kragen platzen lässt, könnte bald zu unserer Energieversorgung beitragen

## MEDIZIN & BIOLOGIE

### 34 ► Der Stammzellforscher

Hans Schöler, Direktor am Max-Planck-Institut für molekulare Biomedizin, fordert, dass auch Forscher in Deutschland menschliche embryonale Stammzellen entwickeln dürfen

### 42 ► Warum unser Gehirn zwei Seiten hat

Komplexe Aufgaben ungleich auf beide Hemisphären des Gehirns zu verteilen, ist keine biologische Neuerung beim Menschen

### 50 Der vergessene Entdecker der DNA

Vor bald 150 Jahren stieß Friedrich Miescher in Tübingen auf eine Substanz, die er Nuclein taufte – Startschuss für eine wissenschaftliche Umwälzung

Titelmotiv: fotolia / André Klaassen (Pyramiden); Spektrum der Wissenschaft (Composing)

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)

TITEL (SERIE)

## Zeit im alten Ägypten

62

24



ASTRONOMIE & PHYSIK  
Neutrino-Blick ins Innere der Sterne

## MENSCH & GEIST

TITEL

### 62 ► Neheh und Djet – die zwei Gesichter der Zeit

Im alten Ägypten galt Zeit nicht als gerichtete Größe, sondern als ein Phänomen, dem sowohl zyklische Wiederholung als auch ewige Dauer eigen waren

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

### 68 Dreieckskoordinaten

Ein elegantes Verfahren zur Darstellung dreier Größen, deren Summe konstant ist

### 72 Ponzi-Pyramiden

Die Altanleger mit dem Geld der Neuanleger zu bezahlen, ist eigentlich kriminell – doch manchmal ist es »vernünftig«

FRAG DEN EXPERTEN

### 79 Ist Plexiglas wirklich ein Glas?

»Spektrum der Wissenschaft« fragte den Chemiker und Wissenschaftsjournalisten Klaus Jopp

## ERDE & UMWELT



### 80 Klimawandel im Freilandversuch

Wie wird sich das kommende Treibhausklima auf die Biosphäre auswirken? In Freilandexperimenten messen Forscher die Effekte veränderter Niederschläge, Temperaturen und Kohlendioxidkonzentrationen auf Pflanzen – und finden teils Überraschendes

## WEITERE RUBRIKEN

3 Editorial: Kann es vernünftig sein, sich betrügen zu lassen?

6 Leserbrief/Impressum

58 Im Rückblick

102 Onlineangebote

104 Wissenschaft & Karriere

106 Vorschau

## TECHNIK & COMPUTER

### 86 ► Grenzenlose Kommunikation

Drahtlosnetze ohne feste Infrastruktur können jederzeit und überall für Verbindung sorgen

JUNGE WISSENSCHAFT

### 92 Sinn und Sinnlichkeit

Eine Auswahl der interessantesten Projekte vom diesjährigen Bundeswettbewerb »Jugend forscht«

96 Rezensionen:

Rainer Müller *Klassische Mechanik*

Jürgen Alex *Zur Entstehung des Computers*

Milena Wazeck *Einsteins Gegner*

Thomas Miedaner *FortPFLANZEN*

Christian Hesse *Das kleine Einmaleins des klaren Denkens*

## Gleichgewicht zwischen Moral und Eigennutz

Es grünt nicht grün ...  
Springers Einwürfe, Mai 2010

Die Betrachtung zeigt, wie problematisch es sein kann, ein einzelnes Verhalten als (a)moralisch zu bewerten – und dass als begrenztes moralisches Budget erscheinen kann, was ein im Überlebenssinn fein austariertes Gleichgewicht zwischen Moral und Eigennutz sein mag. Die zitierte Studie eignet sich kaum zum Beweis. Denn was wäre daran moralisch, bei einem offenbar ohnehin asymmetrisch angelegten Test auf einen finanziellen Vorteil zu verzichten, geschweige denn, einen Geldbetrag mit einem Unbekannten zu teilen, von dem man weder weiß, ob er ihn braucht, noch wie er ihn verwendet? Das wäre nur dumm. So legt die Studie viel eher nahe, dass ökologisches Wissen ein Zeichen von Intelligenz, Vorsicht und Voraussicht ist, was sich auch leicht einsehen lässt.

Dr. Gerald Rudolf, Bad Homburg v. d. Höhe

## Sucht und Dopamin

Warum Schlafmittel wie Valium süchtig machen  
Forschung aktuell, Juni 2010

Erstaunlich ist, dass die Autoren mit keinem Wort auf die so genannten Benzodiazepinrezeptoren eingehen, die in fast allen Artikeln über die Wirkung von

Benzodiazepinen zumindest erwähnt, wenn auch nicht in ihrer Wirkungsweise erklärt werden. Selbst wenn ein enger Zusammenhang mit GABA-Rezeptoren besteht oder die Autoren sogar die eigenständige Existenz von Benzodiazepinrezeptoren in Frage stellen, kann man nicht einfach darüber hinweggehen, als ob darüber in der Fachliteratur überhaupt nicht diskutiert würde.

Ein weiterer Kritikpunkt betrifft die offenbar zu Grunde liegende allzu simple Konzeption von Sucht, die allein in der Verstärkerwirkung der psychoaktiven Substanz durch vermehrte Bildung von Dopamin besteht und damit völlig die Rolle des präfrontalen Kortex außer Acht lässt. Dadurch entsteht ein einseitiges, übersimplifiziertes Bild von Sucht, das suggeriert, man könne allein durch Ansätze auf der Synapsebene und durch die Regulierung von Dopamin ihre Entstehung erklären und sie entscheidend beeinflussen.

Zum Schluss äußern die Autoren die Erwartung, dass Pharmaka entwickelt werden könnten, die zwar Angst lösend wirken, aber keine Abhängigkeit erzeugen. Dabei beziehen sie die Abhängigkeit erzeugende Wirkung allein auf die Alpha-1-Untereinheit des GABA<sub>A</sub>-Rezeptors. Welche Bedeutung dem subjektiven Erleben der Substanzwirkung zukommt, wird mit keinem Wort erwähnt. Ob es überhaupt Substanzen geben kann, die psychisch euphorisierend wirken können, ohne eine Abhängigkeit zu erzeugen, ist eine grundsätzliche Frage,

die keineswegs selbstverständlich mit einem Ja beantwortet werden kann, wie es die Autoren nahelegen.

Dr. phil. Dipl.-Psych. Heinrich Küfner,  
Institut für Therapieforchung München

## Antwort des Autors Prof. Dr. Christian Lüscher

Der Begriff Benzodiazepinrezeptor stammt aus der älteren Fachliteratur, als die Identität des Wirkungsziels der Benzodiazepine noch nicht geklärt war. Es stellte sich erst bei späteren Studien heraus, dass es sich dabei um den GABA<sub>A</sub>-Rezeptor handelt, den wir untersucht haben.

Das von uns vorgeschlagene Modell ist zwangsläufig eine Vereinfachung. Wir sind uns bewusst, dass mehrere Hirnregionen bei Sucht eine wichtige Rolle spielen. Die Wirkung der Drogen beginnt jedoch im ventralen Tegmentum, und das dort freigesetzte Dopamin moduliert die Funktion des Nucleus accumbens, des präfrontalen Kortex, des Mandelkerns und vieler weiterer Hirnregionen.

Schließlich spielt das subjektive Erleben einer Substanzwirkung sicher ebenfalls eine Rolle bei der Entstehung von Sucht, ist jedoch nicht Bestandteil unserer Arbeit. In diesem Sinn beschreibt unser Modell, was notwendig ist, um Sucht zu induzieren, sagt jedoch wenig über die hinreichenden Bedingungen. Trotz systematischer Dopaminausschüttung wird nur eine kleine Minderheit der Benzodiazepinkonsumenten süchtig.

## Spektrum DER WISSENSCHAFT

**Chefredakteur:** Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)  
**Stellvertretende Chefredakteure:** Dr. Inge Hoefler (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser  
**Redaktion:** Thilo Körkel (Online Koordinator), 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 Heinzelmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer  
**Redaktionsassistent:** Britta Feuerstein, Petra Mers  
**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 Könniker, 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: Markus Fischer, Claudia Hecker, Andreas Nestke, Andrea Pastor-Zacharias, Michael Springer, Klaus Volkerts.  
**Leser- und Bestellservice:** Helga Emmerich, Sabine Häuser, Ute Park, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.com

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

**Bezugspreise:** Einzelheft € 7,40/sFr. 14,00; im Abonnement € 79,20 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 66,60. Die Preise beinhalten € 7,20 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 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 StW zum Vorzugspreis.

**Anzeigen:** iq media marketing gmbh, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Marianne Dölz; Anzeigenleitung: Katrin Kanzok, Tel. 0211 887-2483, Fax 0211 887 97-2483; verantwortlich für Anzeigen: Ute Wellmann, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2481, Fax 0211 887-2686

**Anzeigenvertretung:** Hamburg: Matthias Meißner, Brandstwierte 1, 6. OG, 20457 Hamburg, Tel. 040 30183-210, Fax 040 30183-283; Düsseldorf: Ursula Haslauer, 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; München: Jörg Bönsch, Nymphenburger Straße 14, 80335 München, Tel. 089 545907-18, Fax 089 545907-24; Kundenbetreuung Branchenteams: Tel. 0211 887-3355, branchenbetreuung@iqm.de

**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. 31 vom 01. 01. 2010.

**Gesamtherstellung:** L. N. Schaffrath Druckmedien GmbH & Co. KG, Marktweg 42-50, 47608 Geldern

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzunehmen: © 2010 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Wir haben uns bemüht, sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechteinhaberschaft geführt werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt. Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor, Leserbriefe zu kürzen.

ISSN 0170-2971

### SCIENTIFIC AMERICAN

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



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



## Faszinierende Vielfalt des Lebens

Der Herr der Fische, Mai 2010

### Quantenphysik auch in der Biologie

Zu dem aufschlussreichen Interview möchte ich ergänzen, dass der Schlusssatz zur biologischen Evolutionsforschung (»man sollte keine Naturgesetze erwarten, wie sie vor allem die Physik liefert«) sich meines Erachtens nur auf die »strengen« Gesetzmäßigkeiten der klassischen Physik beziehen kann. Dagegen lassen Quanten- und Chaosphysik auch in der Biologie Steuerungs- und Optimierungsgesetze statistischer Art zu, wie sie sich schon bei der so genannten Selbstorganisation der anorganischen Materie (zum Beispiel Kristalle und Wolken) beobachten lassen. Man denke auch an die Prozesse der »kosmischen« Evolution!

Paul Kalbhen, Gummersbach

### Veränderter Phänotyp

Herr Professor Meyer sagt über den Versuch mit Midas-Buntbarschen, man könne den Phänotyp der Fische – in diesem Fall die Zahnform – durch äußere Ein-

flüsse in relativ kurzer Zeit verändern. Mich interessiert: Innerhalb welcher Zeitspanne, nach wie vielen Generationen ließ sich eine Veränderung feststellen?

Stellt der Buntbarschversuch nicht eine Erhärtung der in der Wissenschaft als falsch verworfenen Theorie des Lamarckismus dar, wonach sich Evolution durch den Dreischritt »veränderte Umwelt – veränderte Gewohnheit – Vererbung« vollzieht, entgegen der darwinschen Theorie der natürlichen Selektion mit dem Abtasten vieler Versuche der Natur durch zufällige genetische Veränderungen?

Stefan Geier, per E-Mail

### Antwort von Prof. Axel Meyer

Das Phänomen, dass Organismen bei gleicher genetischer Ausstattung sich je nach Umwelt zum Teil drastisch unterscheiden können, nennt man phänotypische Plastizität. Dies passiert während der Ontogenese, also innerhalb der Lebensspanne eines Organismus. Wie sich diese auf die Wahrscheinlichkeit, auszusterben



PETER SCHMIDT

**Evolutionsbiologe Axel Meyer hatte stets ein inniges Verhältnis zu seinen Fischen.**

oder neue Arten zu bilden, auswirkt, ist unter Evolutionsbiologen umstritten. Sicherlich wird aber phänotypische Plastizität dazu führen, dass Arten länger überleben, da sie in verschiedenen Umwelten morphologisch/ökologisch angepasst wären. Diese verschiedenen Morphologien sind aber nicht über Generationen vererblich und stellen daher in keiner Weise Darwins Evolution durch natürliche Auslese in Frage.

## Besser als sein Ruf – der Lithium-Ionen-Akku

Maxienergie, Miniformat  
Wissenschaft im Alltag, Juni 2010

Wie komplex diese Stromspeicher sind, zeigten einige Ungenauigkeiten der verkürzten Darstellung. Zum Beispiel haben nicht alle »nassen« Batterietypen bei teilweisem Laden beziehungsweise Entladen den »Memory-Effekt« – auch NiMH-Zellen sind frei davon. Falsch ist meines Wissens die Formulierung, dem Lithium würden beim Laden Elektronen entzogen. Tatsächlich liegt es an der Kathode bereits positiv geladen vor, Übergangsmetalle wie Mangan geben die Elektronen ab.

Neben der im Artikel erwähnten Materialalterung führen – wie bei allen Batterien – auch unerwünschte Prozesse beim Laden und Entladen zu Kapazitätsverlusten. Beispielsweise kann die Einlagerung von Lithium in das Kristallgitter der Graphitanode Verbindungen aufreißen. Gravierender noch: Das Redoxpotenzial von Sauerstoff liegt nur wenig

über dem des Mangans, ein Teil der Elektronen wird deshalb von Sauerstoffionen abgegeben. Weil nach weiteren Reaktionen Kohlendioxid über das Überdruckventil entweicht, fehlen dem Lithium nun Reaktionspartner, um aufgenommene Elektronen wieder abzugeben – die Kapazität sinkt. Je mehr Elektronen fließen, desto stärker macht sich dieser Effekt bemerkbar. Hohe Stromstärken steigern außerdem die Temperatur und fördern damit die Materialalterung. Das ist der eigentliche Grund für die langen Ladezeiten. Wobei es optimierte Hochstromtypen gibt, die sich in weniger als einer Stunde laden lassen.

Kai Petzke, Physiker und  
Chefredakteur von »teltarif«

## Egoismus vs. Altruismus

Schuld und freier Wille, Juni 2010

Danke für die anregende Diskussion! Warum nicht so: Freiheit wird realisiert, indem ich das Gute erkenne und tue und also auf diese Weise am Reich der Moral

partizipiere. Allein dann nämlich tue ich, was ich aus tiefster Überzeugung tun will. Gut und böse für sinnvolle Kategorien zu halten, ist folglich Voraussetzung für den Begriff der Freiheit, nicht umgekehrt. Moralisch schlechte Taten sind bei diesem Verständnis zugleich auch Ausdruck dafür, dass nicht Freiheit realisiert wird, sondern Abhängigkeit, also Unfreiheit.

Rüdiger Thurm, Bielefeld

### Briefe an die Redaktion ...

... sind willkommen! Schreiben Sie uns auf [www.spektrum.de/leserbriefe](http://www.spektrum.de/leserbriefe) oder direkt beim Artikel: Klicken Sie bei [www.spektrum.de](http://www.spektrum.de) auf das aktuelle Heft oder auf »Magazin«, »Magazinarchiv«, das Heft und dann auf den Artikel.

Oder schreiben Sie mit kompletter Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft

Redaktion Leserbriefe

Postfach 104840

69038 Heidelberg

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

Die vollständigen Leserbriefe finden Sie unter:

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



Erosionsprozesse in neu aufgefalteten Gebirgen – hier am Monte Disgrazia in den Ostalpen – können nicht erklären, warum sich die Erde vor 40 Millionen Jahren abzukühlen begann.

## GEOLOGIE

### Keine Abkühlung durch Gebirge

■ Trotz aller Diskussionen um die globale Erwärmung befindet sich die Erde seit Längerem in einer relativ kühlen Phase ihrer Klimageschichte. So bildete sich vor 34 Millionen Jahren die antarktische Eisdecke, und vor etwa 3 Millionen Jahren gefror auch das Meer am Nordpol.

Einer gängigen Theorie zufolge könnte die letzte große Gebirgsbildungsphase, die im Miozän (vor 23 bis 5 Millionen Jahren) ihren Höhepunkt erreichte und unter anderem die Anden und den Himalaja schuf, die treibende Kraft der Abkühlung gewesen sein, die vor etwa 40 Millionen Jahren einsetzte. Das Auftürmen riesiger Gesteinsmassen sollte demnach für eine Zunahme der Erosion gesorgt haben.

Dadurch würde der Atmosphäre auf zwei Wegen Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) entzogen: Einerseits verbrauchen chemische Pro-

zesse das Treibhausgas bei der Verwitterung, andererseits werden organische Substanzen, die bei der Fotosynthese aus atmosphärischem  $\text{CO}_2$  und Wasser entstanden sind, mit dem Erosionsschutt ins Meer geschwemmt und an dessen Grund abgelagert. So sollte die Atmosphäre an Kohlendioxid verarmen und die Erde sich abkühlen.

Jane K. Willenbring und Friedhelm von Blanckenburg vom GeoForschungsZentrum Potsdam haben bei umfangreichen Untersuchungen jedoch herausgefunden, dass der Eintrag von erodiertem Gestein in die Ozeane trotz der neu aufgefalteten Gebirgsmassive nicht zunahm. Ebenso wenig hat sich, wie Isotopenanalysen ergaben, die Verwitterung intensiviert. Die populärste Erklärung für die Abkühlung seit dem mittleren Eozän scheint damit widerlegt.

*Nature, Bd. 465, S. 211*

## CHEMIE

### Grundchemikalien aus Biomasse

■ Kohlenhydrate wie Zellulose oder Stärke bieten sich als Ersatz für das immer teurer werdende Erdöl an, dessen Nutzung zudem klimaschädliche Kohlendioxidemissionen verursacht. Um auch als Rohstoffbasis für die chemische Industrie zu taugen, müssen sie allerdings einfache Grundchemika-

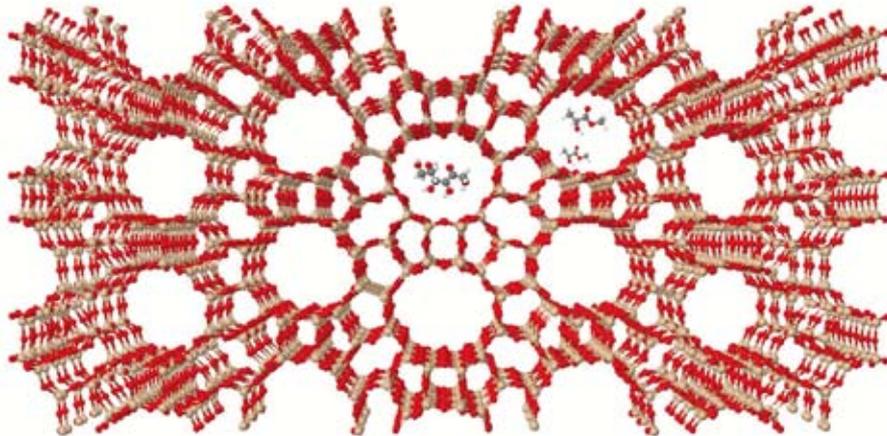
lien liefern. Dazu braucht man bisher jedoch teure Enzyme. Jetzt hat ein Team um Martin Spangsborg Holm von der Technischen Universität Dänemark in Lyngby einen klassischen chemischen Katalysator vorgestellt, der einfache Zucker wie Glukose und Fruktose zu Methyl-

milchsäure umsetzt. Diese Verbindung würde sich als universelles Ausgangsmaterial für viele verschiedene Produkte und Anwendungen eignen. Aus Milchsäure gewinnt man heute schon in großem Maßstab bioabbaubare Kunststoffe.

Der Katalysator trägt die Bezeichnung Sn-Beta und wirkt als starke Säure. Es handelt sich um einen so genannten Zeolithen: ein mikroporöses Mineral, dessen Grundstruktur ein Gitter aus Aluminium, Silizium und Sauerstoff ist. Etliche günstige Eigenschaften lassen seine Weiterentwicklung aussichtsreich erscheinen. So ist der Katalysator nach Angaben der Forscher stabil und bleibt über viele Reaktionszyklen unvermindert aktiv. Zudem erzeugt er sehr selektiv das gewünschte Produkt, liefert daneben in kleineren Mengen aber auch andere interessante Verbindungen. Mit dem neuen chemischen Weg zur Methylmilchsäure sollte Biomasse, so hoffen die Forscher, als Rohmaterial für die chemische Industrie langfristig auch wirtschaftlich mit dem Erdöl konkurrieren können.

*Science, Bd. 328, S. 602*

MARTIN SPANGSBERG HOLM, TU DÄNEMARK / SCIENCE/AAAS



In den Hohlräumen des Zeolithen Sn-Beta werden einfache Zucker zu Methylmilchsäure umgesetzt, die sich als Ausgangsstoff für viele chemische Produkte eignet.



PARASITISMUS

## Mit Komplexität gegen Kuckuckseier

Nach dem Schlüpfen haben die Küken der Rahmbrustprinie (rechts) gegen die deutlich größeren des Kuckuckswebers (links) kaum eine Chance.

CLAIRE SPOTTISWOODE, UNIVERSITY OF CAMBRIDGE

■ Weltweit existieren unter den Vögeln sieben Arten von Brutparasiten; hier zu Lande ist der Kuckuck wohl die bekannteste. Doch während die Vertreter in Europa und Nordamerika evolutionär noch relativ jung sind, liefern sich in den Tropen der Kuckucksweber (*Anomalospiza imberbis*) und die Rahmbrustprinie (*Prinia subflava*) aus der Familie der Grasmücken möglicherweise schon seit 20 Millionen Jahren ein evolutionäres Wettrüsten in Sachen Täuschung und Entlarvung. Claire N. Spottiswoode und Martin Stevens von der University of Cambridge haben nun erforscht, wie sich die Prinien vor den Parasiten zu schützen suchen.

Bei ihrem Experiment legten die Forscher über 100 fremde Eier in Nester der Grasmücken und beobachteten, welche abgelehnt

wurden. Zur Analyse von Farbgebung und Zeichnung verwendeten sie einen Computer und fütterten ihn mit spektroskopischen Daten, um das Sehvermögen der Vögel zu imitieren. Da diese ultraviolette Licht und ein breiteres Farbspektrum wahrnehmen können, erschließen sich ihnen Unterscheidungsmerkmale, die für Menschen unsichtbar bleiben.

Wie sich zeigte, sind die Prinien erstaunlich gut im Erkennen fremder Eier. Sie registrieren schon geringe Abweichungen in Färbung und Musterung. Allerdings ignorieren sie erstaunlicherweise ein offensichtliches Merkmal: »Kritzellinien« auf ihren Eiern, die bei den Imitaten fehlen.

PNAS, Bd. 107, S. 8672

GENETIK

## Pilzen färbt Läuse bunt

■ Karotinoide geben vielen Obst- und Gemüsesorten ihre Farbe und sind für den Menschen unverzichtbar: Auch als Provitamin A bezeichnet, erhalten sie beispielsweise unser Sehvermögen, stärken das Immunsystem und schützen vor Zellschäden. Wir müssen sie mit der Nahrung aufnehmen, und das Gleiche schien bisher für alle anderen Tiere zu gelten. Doch nun entdeckten Nancy A. Moran und Tyler Jarvik von der University of Arizona in Tucson, dass Erbsenläuse (*Acyrthosiphon pisum*) ihre Karotinoide selbst produzieren können: Im jüngst entzifferten Erbgut der Insekten fanden sich die dafür nötigen Gene.

Deren Herkunft erwies sich als höchst ungewöhnlich: Sie stammen, wie der

Vergleich verschiedener DNA-Sequenzen ergab, höchstwahrscheinlich von einem Pilz. Dass Mikroorganismen durch »horizontalen Gentransfer« Erbinformationen untereinander austauschen, ist bekannt. Eine Übertragung zwischen so verschiedenartigen Organismengruppen wie Pilz und Insekt galt bisher jedoch als nahezu ausgeschlossen. Die Wissenschaftler nehmen an, dass die Gene schon seit Jahrmillionen dem Erbgut der Läuse angehören und dass der Pilz, der sie einst spendete, in einer engen Beziehung zu den Insekten stand – entweder als ihr Schädling oder als Scharotzer an ihren Futterpflanzen.

Auch die Ursache der bislang rätselhaften Farbunterschiede zwischen einzelnen Tieren kam bei der Untersuchung ans Licht. Grüne Erbsenläuse produzieren nur gelb-orange Karotinoide, rote dagegen zusätzlich zwei rote Pigmente.

Science, Bd. 328, S. 624



CHARLES HEDGECOCK, R.B.F. FÜR DIE UNIVERSITY OF ARIZONA

Rote Erbsenläuse enthalten zwei Pigmente, deren Produktion bei den grünen – vielleicht aus Tarnungsgründen – unterdrückt ist.



XING LIDA AND SONG QIUN

Diese künstlerische Darstellung von *Similicaudipteryx* zeigt das sehr unterschiedliche Gefieder von Jungtieren und ausgewachsenen Exemplaren.

## PALÄONTOLOGIE

# Dinosaurier in der Mauser

■ Bei etlichen Vogelarten unterscheiden sich Jungtiere und Erwachsene deutlich voneinander, weil sich ihr Federkleid während des Heranwachsens stark ändert. Dies könnte auch schon bei gefiederten Sauriern in der frühen Kreidezeit der Fall gewesen sein, wie nun Paläontologen um Xing Xu von der chinesischen Akademie der Wissenschaften in Peking vermuten. Sie verglichen das fossile Gefieder zweier Vertreter der Gattung *Similicaudipteryx* aus dem heutigen China, die in verschiedenen Entwicklungsstadien gestorben waren.

Das ältere Tier hat neben zehn primären zwölf sekundäre Schwungfedern, die beim jüngeren Saurier fehlen. Seine Schwanzfedern verfügen wie diejenigen moderner Vögel bereits über einen Kiel und Federäste. Beim Jungtier weisen sie dagegen eine bandartige Struktur auf, die für eine frühe Phase der Federevolution typisch ist und heute nicht mehr vorkommt.

Die einzelnen Federtypen scheinen sich beim Heranwachsen unterschiedlich schnell entwickelt zu haben: Während die Schwungfedern beim Jungtier deutlich kürzer sind als die Schwanzfedern, erscheinen sie bei dem älteren Saurier fast genauso lang. Demnach hatten sie für erwachsene Tiere, so Xu und Kollegen, wohl eine größere Bedeutung – auch wenn unklar bleibt, worin diese bestand; denn *Similicaudipteryx* konnte vermutlich nicht fliegen.

Insgesamt schließen die Forscher aus ihrer Untersuchung, dass die Federn der Saurier vielfältiger waren als die der heutigen Vögel.

*Nature*, Bd. 464, S. 1338

## TOXINE

# Algengift kann Demenz auslösen

■ Die Amyotrophe Lateralsklerose (ALS) ist eine fortschreitende neurologische Erkrankung unbekannter Ursache, bei der das motorische Nervensystem allmählich zerstört wird. An einer Variante namens ALS/PDC, die zusätzlich zur Demenz führt, litten um 1950 ungewöhnlich viele Bewohner der Insel Guam im Westpazifik. Als wahrscheinlichste Ursache gilt in diesem Fall der Giftstoff BMAA, den symbiotische Zyanobakterien in den Wurzeln von Palmfarnen produzieren. Von dort gelang es in die Samen der Pflanzen, die den Inselbewohnern zur Mehlproduktion dienen.

Jetzt untersuchten Forscher um Sara Jonasson von der Universität Stockholm Zyanobakterien, die in der Ostsee vorkommen und dort gelegentlich »Algenblüten« verursachen. Dabei zeigte sich, dass auch

bei ihnen die BMAA-Produktion weit verbreitet ist. Die Giftkonzentration liegt zwar deutlich niedriger als bei den landlebenden tropischen Arten, über die Nahrungskette reichert sich das Toxin jedoch immer weiter an. Insbesondere in Muscheln und bestimmten Fischarten fanden die Forscher große Mengen davon.

Zu den verseuchten Meerestieren zählten auch Speisefische. Zwar befindet sich das meiste Gift in den Gehirnen, die üblicherweise nicht verzehrt werden. Doch da durch menschliche Eingriffe in die Ökosysteme massenhafte Vermehrungen der Blaualgen immer häufiger auftreten, steigt möglicherweise auch das Vergiftungsrisiko, geben die Forscher zu bedenken. Tatsächlich scheint die Zahl der neuen ALS-Fälle in Schweden zuzunehmen.

*PNAS*, Bd. 107, S. 9252

## KÜNSTLICHES LEBEN

# Bakterium mit synthetischem Erbgut

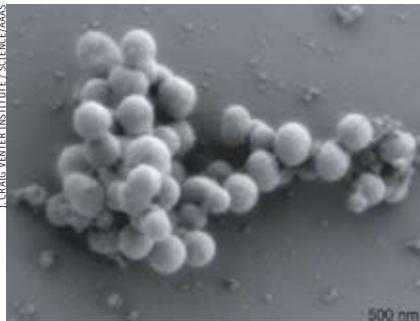
■ Schon 2007 bauten Forscher um den US-Biochemiker Craig Venter das Genom eines Mikroorganismus chemisch nach. Später fanden sie in gezielten Versuchen heraus, wie sich das Erbgut eines Bakteriums erfolgreich in ein anderes übertragen lässt. Nun kombinierte der »Herr der Gene« beide Verfahren, um die erste »synthe-

tische Zelle« zu erzeugen: Mit seinem Team setzte Venter aus einzelnen Nukleotiden das komplette Genom des Bakteriums *Mycoplasma mycoides* in leicht abgewandelter Form zusammen und überführte es in dessen nahen Verwandten *M. capricolum*.

Da sich mit chemischen Methoden bisher nur relativ kurze DNA-Abschnitte herstellen lassen, übertrugen die Forscher die Teilstücke zunächst in Hefe, deren DNA-Reparaturmechanismus sie zu größeren Einheiten zusammenfügte. Nach drei solchen Runden war schließlich ein bakterielles Genom mit einer Gesamtlänge von über einer Million Basenpaaren entstanden. Um das Syntheseprodukt von natürlichem Bakterienerbgut unterscheiden zu können, bauten die Wissenschaftler zusätzliche Gensequenzen als Erkennungsmerkmal ein.

Mit dem neuen Genom produzierte das ehemalige *M. capricolum* nur noch Proteine von *M. mycoides* und übernahm dessen Erscheinungsbild. Die Zellen entwickelten sich normal und konnten sich sogar vermehren. Venter und sein Team hoffen nun, künftig maßgeschneiderte Genome zusammenbauen zu können und Bakterien damit zu befähigen, beispielsweise Kraft- oder Impfstoffe herzustellen.

*Science*, Online-Vorabveröffentlichung



Die synthetischen Bakterien sehen völlig normal aus (oben) und können sich sogar teilen (unten).

# Exotischer Ur-Tintenfisch

Seit Anfang des vergangenen Jahrhunderts befand sich im Royal Ontario Museum in Toronto (Kanada) die Versteinerung eines rund 500 Millionen Jahre alten Tiers aus dem Burgess-Schiefer in den Rocky Mountains. Sein Aussehen war so seltsam, dass es sich nicht klassifizieren ließ. 1976 erhielt es nach einer vorläufigen Beschreibung den Namen *Nectocaris pteryx*. Doch seither wurden 91 neue, teils sehr viel besser erhaltene Fossilien des exotischen Urwesens entdeckt – darunter das hier gezeigte. Mit ihrer Hilfe konnten Martin R. Smith und Jean-Bernard Caron von der University of Toronto nun eine Zuordnung treffen. Demnach waren die zwei bis vier Zentimeter langen Tiere – unten eine Rekonstruktion – frühe Vorläufer der Kraken. An ihrem flachen Körper mit seitlichen Drachenflügeln saßen große Stielaugen und ein Tentakelpaar zum Beutefangen. Eine trichterartige Struktur am Kopf diente höchstwahrscheinlich als Wasserdüse zur Fortbewegung. Nach dieser Klassifizierung von *Nectocaris* gab es Kopffüßer schon 30 Millionen Jahre früher als bisher angenommen.



FRÜHMENSCHEN

## Neandertaler-Erbgut entschlüsselt

Das erste Genom einer ausgestorbenen Hominidenart konnte nun im Wesentlichen entziffert werden. Interessant sind die Daten nicht nur für Urzeitforscher, sondern auch für Genetiker und Mediziner.

Von Michael Groß

Haben sie oder haben sie nicht? Die Frage, ob unsere direkten Vorfahren sich mit den Neandertalern einließen, bewegt die Presse jedes Mal, wenn es neue Forschungsbefunde von unseren entfernten Verwandten mit den wulstigen Augenbrauen gibt. Nun, da das Erbgut des Neandertalers im Groben entziffert ist, steht die Antwort fest (*Science*, Bd. 328, S. 710). Für Wissenschaftler ist sie allerdings eher zweitrangig. Für sie zählt vielmehr die Raffinesse, mit der die extremen Schwierigkeiten bei der Sequenzierung des Genoms einer ausgestorbenen Menschenart überwunden wurden, und was diese Großtat für das Verständnis unserer eigenen Evolution und genetischen Vielfalt und damit letztlich vielleicht für die Medizin bringt.

Die Teilnehmer am Humangenomprojekt entzifferten in den 1990er Jahren mit gigantischem Aufwand und zu einem astronomischen Preis das menschliche Erbgut. Im Juni 2000 wurde der

Öffentlichkeit dann ein grober Entwurf präsentiert. Da waren die zu seiner Bestimmung verwendeten Methoden aber schon veraltet. Nur fünf Jahre später standen Sequenzierverfahren der zweiten Generation bereit, mit denen sich heute Genomdaten um viele Größenordnungen schneller und preiswerter ermitteln lassen.

Dadurch konnte in den vergangenen Jahren das komplette Erbgut einzelner Menschen bestimmt werden. Außerdem sequenzierten Forscher medizinisch relevante Genome von Tumorzellen zum Vergleich mit denen gesunder Zellen sowie von Zwillingspaaren mit und ohne multiple Sklerose, um den Unterschied zwischen beiden und damit womöglich die Krankheitsursache herauszufinden.

Svante Pääbo vom Max-Planck-Institut für evolutionäre Anthropologie in Leipzig setzte sich allerdings ein noch viel ehrgeizigeres Ziel. Er wollte das Genom des vor rund 30 000 Jahren ausgestorbenen Neandertalers entziffern. Die DNA dazu musste er in ausreichender Qualität

und Menge aus Knochenresten der Frühmenschen gewinnen. Dass das möglich ist, zeigte Pääbos Arbeitsgruppe zunächst durch die erfolgreiche Sequenzierung des relativ überschaubaren Erbguts der Mitochondrien von Neandertalern. Das sind die Kraftwerke der Zelle, die über ein eigenes kleines Genom verfügen.

Als Pääbo schließlich sein großes Vorhaben anpackte, musste er mit wenigen hundert Milligramm DNA von Neandertalerknochen aus einer Höhle in Kroatien auskommen. Mehr als 95 Prozent davon stammte zudem von Bodenbakterien, die sich an den Fossilien gütlich taten. Der kleine Rest an mutmaßlicher Neandertaler-DNA lag in Form kurzer Bruchstücke vor. Mit dieser winzigen, extrem fragmentierten und stark verschmutzten Probe wollte Pääbo ein Genom aus drei Milliarden Buchstaben sequenzieren, das mehr als 20 000 Gene enthält – wahrlich ein ambitioniertes Projekt!

Ein erster Fortschrittsbericht von 2006 illustrierte die Schwierigkeiten der Aufgabe. Eine Million Buchstaben waren bis dahin ausgelesen und eindeutig als nicht von Bodenbakterien stammend identifiziert. Pääbo und Kollegen kündigten daraufhin optimistisch an, das gesamte Genom bis 2008 entziffert zu haben. Doch bald zeigte sich, dass nicht die Kontamination mit Bakterien-DNA das Hauptproblem war, sondern die Verunreinigung mit Erbmaterial der Forscher selbst. Es ist dem des Neandertalers so ähnlich, dass nicht sofort auffiel, wenn ein Wissenschaftler aus Versehen

**Rekonstruktion einer Neandertalergruppe im Museum der Krapina-Neandertaler in der kroatischen Stadt Krapina**





mal ein Fragment der eigenen DNA mitsequenzierte.

Nachträgliche Analysen der Daten von 2006 ergaben, dass die Kontamination mit moderner DNA zwischen 11 und 40 Prozent lag. Die Knochenproben waren damals zwar in einem Reinraum entnommen und aufbereitet worden. Die Sequenzierung aber konnte nur in einem normalen Labor stattfinden. Dort kam es offenbar zur Verunreinigung.

### Einblicke in die Evolution des Menschen

Um dieses Problem auszuschließen, versahen die Forscher nun alle im Reinraum präparierten DNA-Fragmente mit einer genetischen Markierung, um sie von später hinzugekommenen Kontaminationen unterscheiden zu können. Nur noch DNA-Bruchstücke mit diesem Etikett wurden berücksichtigt und die bis 2006 erhaltenen Daten verworfen.

Zugute kam den Leipziguern auch, dass die drei verwendeten Proben offenbar alle von weiblichen Neandertalern stammten. Jegliche Spuren von Y-Chromosomen mussten demnach vom männlichen Laborpersonal herrühren. Mit dieser und zwei weiteren, unabhängigen Methoden konnten die Wissenschaftler sicherstellen, dass die Verunreinigung durch moderne DNA nun unter einem Prozent lag.

Am Ende kam ein im Durchschnitt 1,3-fach sequenziertes Gesamtgenom heraus. Stichproben von anderen Neandertalerfunden aus Sibirien, Spanien und dem Neandertal bei Düsseldorf zeigten, dass es typisch für den gesamten Verbreitungsbereich des Frühmenschen ist. Schwachpunkte liegen noch in einigen systematischen Fehlermöglichkeiten, etwa durch die chemische Veränderung

von Basen, sowie darin, dass das hochgradig zerstückelte Erbmaterial es fast unmöglich macht, Wiederholungen von Sequenzen zu erkennen.

Dennoch sind nun erstmals umfassende Vergleiche des Neandertalergenoms mit dem Erbgut von heutigen Menschen und Schimpansen möglich, die detaillierte Einblicke in die Evolution unserer Spezies versprechen; denn statistische Analysen der kleinen genetischen Unterschiede erlauben Rückschlüsse darauf, welche Varianten sich wann durchsetzten. Wenn Schimpansen und Neandertaler ein identisches Gen haben, das von dem beim modernen Menschen abweicht, entstand die modifizierte Form vermutlich erst nach der Abspaltung unserer Entwicklungslinie von der des frühen Verwandten vor etwa 300 000 bis 400 000 Jahren.

Generell lässt sich über solche Vergleiche ermitteln, welcher Selektionsdruck auf bestimmte Erbfaktoren wirkte und wie groß die Populationen waren, die zur Partnerwahl zur Verfügung standen. Langfristig erhoffen sich Forscher davon Einblicke in die biologischen Details der menschlichen Evolutionsgeschichte und Antworten auf Fragen wie: Welche Merkmale ermöglichten unseren Vorfahren die Ausbreitung über die ganze Erde, während die Neandertaler ausstarben?

Auch für das Verständnis der heutigen genetischen Vielfalt des Menschen ist das Neandertalergenom nützlich. Bei Unterschieden im Erbgut einzelner Personen

**Den Großteil der DNA für ihre Untersuchung gewannen die Forscher aus diesen Knochenfragmenten dreier weiblicher Neandertaler, die in der Vindija-Höhle in Kroatien ausgegraben wurden.**

**Zur Extraktion der Erbsubstanz wurden im Reinraum Teile der Neandertalerknochen mit einem Bohrer pulverisiert. Insgesamt verwendeten die Forscher nur 400 Milligramm Knochenpulver für die Analyse.**

bleibt ja zunächst einmal offen, was die »Originalversion« ist und was die Mutation und ob eine Version Vorteile gegenüber der anderen hat. Hier kann das Neandertalergenom als externe Referenz dienen. Vergleiche mit Schimpansen und Neandertalern ermöglichen es, das menschliche Erbgut im Kontext der Evolution zu untersuchen und dadurch besser zu verstehen.

Davon dürfte auch die Medizin profitieren. Man könnte zum Beispiel im Genom nach Spuren der Anpassung an Infektionskrankheiten suchen. Bei vielen davon befiehlt die Erreger zunächst nur Tiere und sprangen erst auf die Menschen über, als diese anfangen, die ursprünglichen Wirte der Keime zu domestizieren. Bei heutigen Kinderkrankheiten wie Mumps und Masern vermuten Mediziner eine solche Herkunft. Sie



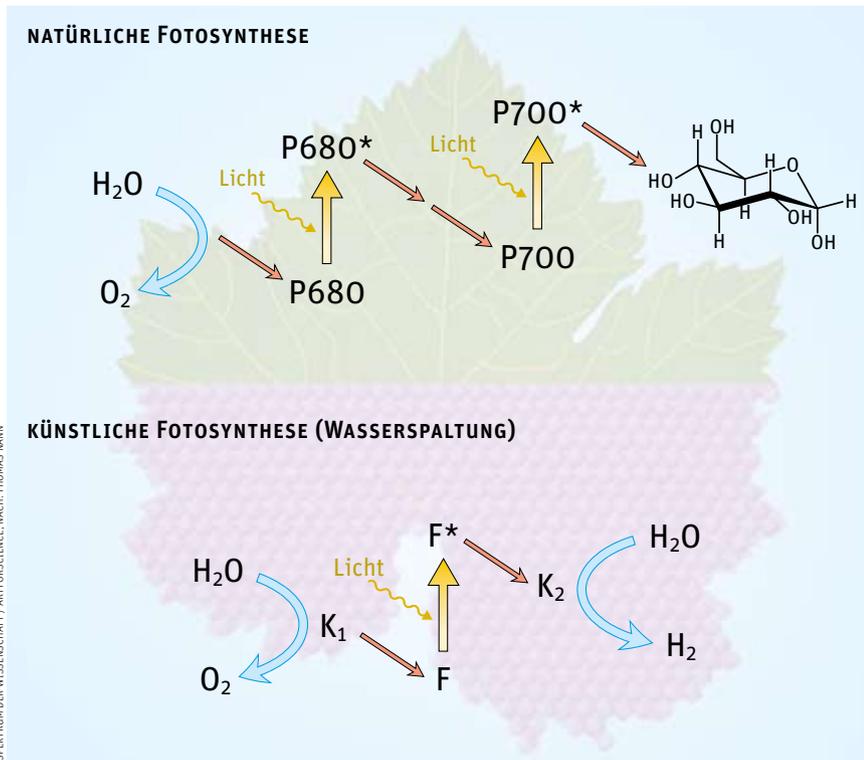


In Pflanzen liefern zwei Pigmente (P680 und P700) nach Anregung durch Sonnenlicht Elektronen, die aus der Oxidation von Wassermolekülen zu Sauerstoff stammen, für die Reduktion von Kohlendioxid und damit für den Aufbau von Kohlenhydraten wie Traubenzucker. Analog setzt bei der künstlichen Fotosynthese eine Lichtantenne Elektronen frei, die ein Katalysator in diesem Fall auf Protonen überträgt. Dabei entsteht Wasserstoff, der als Energieträger der Zukunft dienen könnte.

Wegen der elektronischen Bilanz wird für jede Fotosynthese auch eine Elektronenquelle benötigt; Pflanzen nutzen, wie erwähnt, den Sauerstoff im Wasser. Im Labor oxidieren viele Forscher so genannte Opfersubstanzen wie beispielsweise primäre Amine. Für die Praxis taugt das schon deshalb nicht, weil solche Substanzen zunächst aufwändig hergestellt werden müssen und ihre Oxidationsprodukte industriell meist wertlos sind. Auch wenn die künstliche Fotosynthese nicht auf die Erzeugung von Sauerstoff abzielt, da es sich ja nicht um einen Brennstoff handelt, bietet sich an, dem natürlichen Vorbild zu folgen. Deshalb suchen viele Forscher inzwischen nach preiswerten und effizienten Katalysatoren für die Oxidation von Wasser.

Wir selbst haben in unserem System, mit dem wir nur die Machbarkeit demonstrieren wollten, der Einfachheit halber das kostspielige Platin für diesen Zweck eingesetzt. In einer praktischen Anwendung ließe es sich aber leicht durch einen der neu entwickelten Katalysatoren ersetzen, was die Kosten erheblich reduzieren würde.

Nachdem beide Elektroden beschafft waren, tauchten wir sie in eine neutrale Elektrolytlösung. Sobald wir Licht darauf fallen ließen und eine vergleichsweise geringe Spannung anlegten, trat ein



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / ARTFORSCHUNG, NACH: THOMAS NANN

- Sie absorbieren Licht über einen weiten Bereich von Wellenlängen,
- ihr Einfangsquerschnitt für Photonen und damit die Effizienz der Absorption von Licht ist erheblich höher als bei organischen Molekülen,
- ihre optischen Eigenschaften sind über einen weiten Bereich einstellbar, und
- sie bleichen längst nicht so stark aus wie organische Farbstoffe.

Außerdem bieten Quantenpunkte mit ihrer großen Oberfläche eine nahezu ideale Schnittstelle für die Übertragung von Elektronen auf Katalysatormoleküle oder eine Elektrode. Hinzu kommt, dass sie preiswert aus gängigen, reichlich vorhandenen Elementen hergestellt werden können, während Edelmetallkomplexe – die effizientesten organischen Antennen – extrem kostspielig sind. Außerdem lassen sie sich einfach schichtweise als dreidimensionale Anordnungen auf Oberflächen abscheiden und sind weitestgehend unempfindlich gegenüber Sauerstoff und Feuchtigkeit.

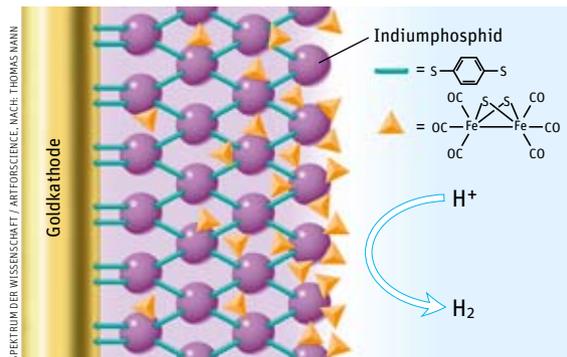
Als Quantenpunkte verwendeten wir Nanokristalle des Halbleitermaterials Indiumphosphid, weil es Licht im sichtbaren Bereich des Spektrums absorbiert und keine giftigen Schwermetalle enthält. Außer den Lichtantennen brauchten wir aber auch einen Katalysator, der die Elektronen, die sie lieferten, auf Protonen im Wasser übertrug und diese so zu

Wasserstoff reduzierte. Dazu machten wir eine Anleihe bei der Natur. Bestimmte Bakterien und Grünalgen enthalten ein Enzym namens Hydrogenase, das die Reduktion von Protonen zu Wasserstoff katalysiert. In seinem aktiven Zentrum befindet sich ein Tetraeder aus je zwei Eisen- und Schwefelatomen.

Wir griffen auf ähnliche, allerdings rein anorganische Eisen-Schwefel-Komplexe zurück. In Vorversuchen konnten wir zunächst zeigen, dass sie sich bereitwillig an die Quantenpunkte anlagern und von diesen nach Lichtanregung sehr effektiv Elektronen aufnehmen.

Damit war die Grundvoraussetzung für die fotokatalytische Erzeugung von Wasserstoff erfüllt. Als Nächstes beschichteten wir eine Goldelektrode mit einer dreidimensionalen Anordnung unserer Quantenpunkte und fügten Katalysatormoleküle hinzu, die sich auf dieser Struktur anlagerten und in sie hineindiffundierten (Grafik unten).

**Gemeinsam mit Kollegen hat der Autor eine preiswerte, lichtstabile und effiziente Fotoelektrode entwickelt, die eine Anordnung von Quantenpunkten aus Indiumphosphidkristallen als Lichtantenne enthält. Die von ihr gelieferten Elektronen überträgt ein Eisen-Schwefel-Komplex auf Protonen des Wassers und reduziert sie so zu Wasserstoff.**



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / ARTFORSCHUNG, NACH: THOMAS NANN

Fotostrom auf, und Wasserstoff begann auszuperlen. Messungen zufolge dienten mindestens 60 Prozent der angeregten Elektronen zur Reduktion von Protonen und damit zur Erzeugung von Wasserstoff. Dieses Ergebnis ist für ein künstliches Fotosynthesesystem beachtlich. Da unsere Lichtantenne ohne optisch angeregte organische Moleküle auskam, war sie deutlich robuster und bleichte wesentlich langsamer aus als Exemplare auf der Basis von Edelmetallkomplexen.

Ein künstliches Fotosynthesesystem aus einfachen, preiswerten und robusten anorganischen Komponenten, dessen prinzipielle Machbarkeit wir damit bewiesen haben, wäre von großer wirtschaftlicher Bedeutung. Wasserstoff ist ein sauberer Energieträger, den man sowohl als Treibstoff verbrennen als auch mittels einer Brennstoffzelle direkt in elektrischen Strom umwandeln kann. Deshalb prophezeien ihm viele eine zentrale Rolle in einem umweltfreundlichen künftigen Wirtschaftssystem. Für industrielle Zwecke wird er heutzutage allerdings noch zu etwa 95 Prozent durch »Cracken«, also thermisches Spalten, von Erdgas erzeugt. Erst wenn es gelingt, ihn preiswert aus erneuerbaren Energiequellen herzustellen, wäre der Umstieg auf eine Wasserstoffwirtschaft sinnvoll. Die fotokatalytische Wasserspaltung, wie unser System sie ermöglicht, stellt einen viel versprechenden ersten Schritt in diese Richtung dar.

Bemerkenswert ist, dass wir selbst mit unserem recht simplen Aufbau schon Erfolg hatten. Nun geht es darum, das System zu verfeinern. So hoffen wir durch Verwendung besserer Katalysatoren und Optimierung der Elektrodengeometrie schließlich ein Stadium zu erreichen, in dem die fotokatalytische Erzeugung von Wasserstoff auch ökonomisch mit dem Cracken von Kohlenwasserstoffen konkurrieren kann, was den Weg zu einer nachhaltigen Wasserstoffökonomie ebnen würde. Die Zukunftsvision von künstlichen Blättern, die in Wüsten oder anderen landwirtschaftlich wertlosen Gebieten Wasserstoff erzeugen, der dann zentral oder dezentral in andere Energieformen umgewandelt werden kann, wäre damit in greifbare Nähe gerückt.

**Thomas Nann** ist Professor für Nanowissenschaft an der chemischen Fakultät der University of East Anglia in Norwich (England). Im Juni wechselte er auf eine Professur an der University of South Australia in Adelaide.

## QUANTENMECHANIK

# Atominterferometrie mit verschränkten Teilchen

Heidelberger Forscher konnten zeigen, dass sich die Präzision von Atominterferometern, die beispielsweise die Grundlage von extrem genauen Uhren bilden, um ein Vielfaches steigern lässt, wenn die Atome quantenmechanisch miteinander verschränkt werden.

Von Oliver Morsch

Seit Louis de Broglie 1924 die Hypothese formulierte, dass materielle Teilchen auch Welleneigenschaften haben, ist diese Grundaussage der Quantenmechanik in unzähligen Experimenten eindrucksvoll belegt worden. Lichtwellen können sich gegenseitig verstärken oder auslöschen und so Interferenzmuster von hellen und dunklen Streifen erzeugen. Den gleichen Effekt zeigen Elektronen, Atome oder Moleküle; nur ist ihre Wellenlänge um Größenordnungen kleiner als die von sichtbarer Strahlung. Das aber

macht sie für Präzisionsmessungen in sogenannten Interferometern, die beispielsweise die Grundlage von Atomuhren bilden, gerade besonders interessant. Zwar ist es dazu erforderlich, die Atome auf Temperaturen nahe am absoluten Nullpunkt (–273,15 Grad Celsius) zu kühlen und dann in Magnet- oder Lichtfallen einzuschließen. Doch Methoden dafür gibt es inzwischen.

Das Prinzip eines Atominterferometers ist einfach (Grafik rechts oben). Ähnlich wie Licht in einem herkömmlichen Interferometer durch einen halb durchlässigen Spiegel geteilt wird, spal-

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

## EMBRYONENSCHUTZGESETZ

# Meine Eizelle gehört mir!

Ein Urteil des Europäischen Gerichtshofs zu Eizellspenden könnte auch für deutsche Paare Konsequenzen haben.

Von Edgar Dahl

Am 1. April 2010 hat der Europäische Gerichtshof für Menschenrechte das in der Republik Österreich geltende Verbot der Eizellspende beanstandet. Die Straßburger Richter verurteilten die österreichische Regierung dazu, einem unfruchtbaren Paar, dem eine solche Spende verwehrt wurde, 10000 Euro Schadensersatz zu zahlen. Außerdem sollen die Wiener Behörden sämtliche Kosten übernehmen, die dem Paar durch seine gerichtlichen Klagen seit dem Jahr 1998 entstanden sind.

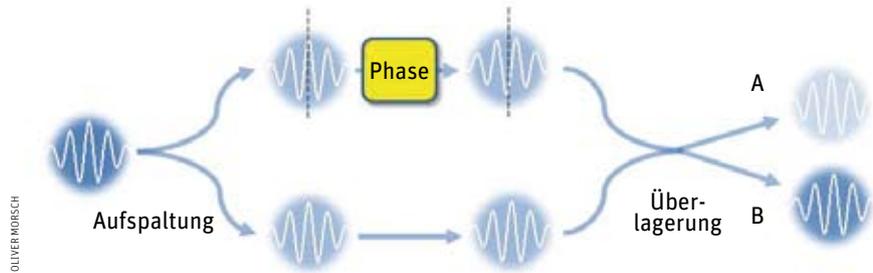
Dieses historische Urteil hat in den deutschen Medien leider nur ein geringes Echo gefunden. Dies ist umso bedauerlicher, als das, was in Österreich

passiert ist, schon bald auch in Deutschland geschehen könnte. Denn dort ist die Eizellspende gleichfalls verboten. So heißt es beispielsweise im deutschen Embryonenschutzgesetz von 1990 (Paragraf 1, Absatz 1, Nummer 2) unmissverständlich: »Mit Freiheitsstrafe bis zu drei Jahren wird bestraft, wer es unternimmt, eine Eizelle zu einem anderen Zweck künstlich zu befruchten, als eine Schwangerschaft der Frau herbeizuführen, von der die Eizelle stammt.«

Demnach kann ein Arzt zu drei Jahren Gefängnis verurteilt werden, wenn er es beispielsweise wagt, einer Frau, die ihre Eierstöcke durch eine Krebserkrankung verloren hat, mit Hilfe einer von ihrer Schwester gespendeten Eizelle zur ersehnten Mutterschaft zu verhelfen.

ten Laserstrahlen oder andere Hilfsmittel die Atome in zwei quantenmechanische Überlagerungszustände auf. Diese können entweder räumlich getrennt sein oder zum Beispiel zwei Energiezustände eines Atoms darstellen. Sie durchlaufen dann die zwei »Arme« der Apparatur, in denen sich die Phasen der zugehörigen Materiewellen – also die Positionen der Wellenberge und -täler – durch äußere Einflüsse gegeneinander verschieben können. Danach werden die beiden Zustände wieder zusammengeführt. Dabei bestimmt die Phasenverschiebung zwischen den zwei Wellen, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Atom schließlich an einem der beiden Ausgänge (A oder B) des Interferometers eintrifft.

Diese Wahrscheinlichkeit ist bei Materiewellen wegen der sehr geringen Wellenlänge extrem empfindlich gegenüber kleinsten Änderungen der Phase. Das kann dazu dienen, physikalische Theorien aufs Genaueste zu testen. Zum Beispiel haben Achim Peters von der Humboldt-Universität zu Berlin sowie Holger Müller und Steve Chu von der University of California in Berkeley kürzlich mit Hilfe eines Atominterferometers eine fundamentale Vorhersage von Einsteins



**In einem Atominterferometer wird die Materiewelle eines Atoms in zwei Teile aufgespalten. Diese durchlaufen die beiden Arme des Interferometers, was zu einer Phasenverschiebung zwischen ihnen führen kann (durch die vertikalen Striche angedeutet). Diese Phasendifferenz bestimmt, mit welcher Wahrscheinlichkeit das Atom in Ausgang A oder B ankommt.**

allgemeiner Relativitätstheorie mit bisher unerrechter Präzision überprüft.

Dazu spalteten die Forscher stark abgekühlte Atome in zwei Gruppen auf, die sie in einer Art Fontäne verschieden hoch fliegen ließen. Anschließend überlagerten sie die Materiewellen dieser Atome und berechneten aus dem Interferenzmuster den Phasenunterschied zwischen den beiden Populationen. Dieser sollte wegen der unterschiedlichen Höhe gemäß Einsteins Relativitätstheorie durch die gravitative Rotverschiebung gegeben sein. Sie rührt daher, dass eine Uhr umso langsamer geht, je stärker das Gravitationsfeld ist, in dem sie sich be-

findet. In einem Atominterferometer entspricht diese Uhr den Oszillationen der Materiewellen, und die sind mit  $3 \cdot 10^{25}$  Schwingungen in der Sekunde extrem schnell. Auf diese Weise konnten Peters, Müller und Chu die gravitative Rotverschiebung bis auf neun Stellen hinter dem Komma überprüfen.

Trotz ihrer enormen Genauigkeit hat die Atominterferometrie allerdings einen entscheidenden Schwachpunkt: Sie beruht letztendlich auf zufälligen Ereignissen. Das liegt daran, dass die Quantenmechanik grundsätzlich keine Voraussagen darüber macht, welches Ergebnis eine Messung haben wird, sondern nur,

Wie in Deutschland beruht auch in Österreich das strafrechtliche Verbot der Eizellspende auf drei Argumenten. Das erste lautet, dass ein solches Verbot dem Wohl der zu erzeugenden Nachkommen diene, indem es sie vor einer »gespaltenen Mutterschaft« bewahre. Mit diesem Ausdruck ist gemeint, dass ein Kind, das aus einer Eizellspende hervorgeht, zwei Mütter besitzt: eine genetische und eine soziale. Die Spenderin der Eizelle wäre die genetische Mutter und die Frau, die das Kind zur Welt gebracht hat, die soziale. Eine derartige Konstellation führe nach Meinung des österreichischen Gesetzgebers zu »ungewöhnlichen Familienverhältnissen«, vor denen Kinder zu schützen seien.

Die Straßburger Richter machten mit diesem Argument jedoch buchstäblich kurzen Prozess. Sie verwiesen einfach darauf, dass auch eine Adoption zu »ungewöhnlichen Familienverhältnissen« führe, und der Umstand, neben einer genetischen noch eine soziale Mutter zu haben, keineswegs das Wohl eines Kindes gefährden müsse.

Nach dem zweiten Argument dient das staatliche Verbot der Eizellspende der Verhinderung eines kommerziellen Eizellhandels. Wie bei der Freigabe der Prostitution, so könnte es auch bei der Freigabe der Eizellspende dazu kommen, dass sich Frauen »gezwungen« sehen, ihren Lebensunterhalt damit zu verdienen, ihren Körper zu Markte tragen und ihre Eizellen verkaufen.

Doch auch dieses Argument machte keinen Eindruck auf die Straßburger Richter. Sie verwiesen kurzerhand darauf, dass der gewerbliche Verkauf von Eizellen nach österreichischem Recht verboten sei und es daher gar nicht zu einem kommerziellen Eizellhandel kommen könne.

Nach dem dritten Argument dient das Verbot der Eizellspende schließlich dem Schutz der Frauen. Da die Gewinnung von Eizellen mit einem medizinischen Risiko einhergehe, sei zu befürchten, dass Frauen, die in eine Spende einwilligen, ihrer Gesundheit Schaden zufügen. Ein Staat, der um das Wohlergehen seiner Bürger besorgt sei, müsse

die Frauen daher vor sich selbst schützen. Wie der Gerichtshof zu Recht ausführte, sei jede reproduktionsmedizinische Behandlung wie etwa die gängige Reagenzglasbefruchtung, ja sogar jede Schwangerschaft mit einem gewissen medizinischen Risiko behaftet. Die Entscheidung, ein solches Risiko einzugehen, müsse daher bei den betroffenen Frauen liegen.

Mit diesem Urteil hat sich der Europäische Gerichtshof für Menschenrechte wieder einmal als ein Verteidiger individueller Freiheitsrechte erwiesen. Es bleibt zu hoffen, dass sich nun auch deutsche Paare an die Straßburger Richter wenden werden. Denn nach Schätzungen des Bundesverbands Reproduktionsmedizinischer Zentren Deutschlands wären hier zu Lande jedes Jahr ungefähr 1000 Paare auf eine Eizellspende angewiesen, um sich ihren Kinderwunsch erfüllen zu können.

**Edgar Dahl** ist promovierter Mitarbeiter am Institut für Ethik, Geschichte und Theorie der Medizin der Universität Münster.

# 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/  
juli](http://spektrum.de/juli)

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



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

## 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.
- 8 Unter allen Abonnenten verlosen wir jeden Monat 4-mal Gutscheine über € 25,- für Science-Shop.de

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

**Spektrum**  
DER WISSENSCHAFT

Wissenschaft aus erster Hand

# MEHR WISSEN, WENIGER ZAHLEN, NICHTS VERPASSEN!

## MINIABO:

- 3 aktuelle Ausgaben mit 35 % Preisvorteil:  
Sie zahlen pro Heft nur € 4,83.
- 1 Präsent zur Wahl

Ob für Schule, Uni oder als Kosmetiktäschchen: Das rote Multicase von Reisenthel ist mit seinen praktischen Innenfächern vielseitig verwendbar; ca. 21 x 10 cm.



Das Spezial »Schlaf« stellt Ihnen die wichtigsten Bereiche der aktuellen Schlafforschung vor: von neuen Wegen gegen Schlafstörungen bis hin zum Kampf gegen den Sekundenschlaf am Steuer.

**35%  
PREIS-  
VORTEIL**

## SO KÖNNEN SIE BESTELLEN:



MIT DER BESTELLKARTE



TELEFON: 06221 9126-743



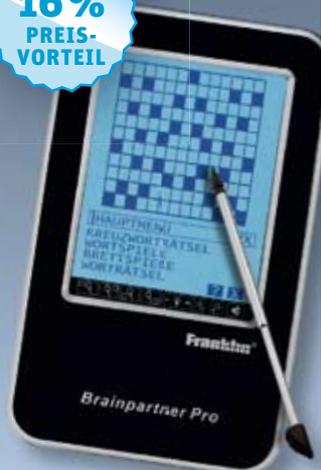
FAX: 06221 9126-751



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

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

**ÜBER  
16%  
PREIS-  
VORTEIL**



## SPEKTRUM VERSCHENKEN

VERSCHENKEN SIE EIN JAHR  
LESEVERGNÜGEN

Das erste Heft des Abonnements versenden 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/juli](http://www.spektrum.de/juli)

## LESER WERBEN LESER

SIE MÖCHTEN UNS EINEN  
NEUEN ABONNENTEN VER-  
MITTELN?

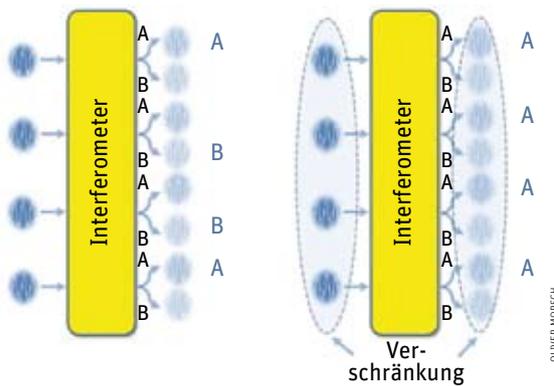
Dann haben Sie sich eine  
Dankesprämie verdient und  
können zwischen mehreren  
Präsenten wählen:

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

## PRODUKT DES MONATS

Mobiler *Brainpartner Pro* mit verschiedenen Rätselinhalten: Kreuzworträtsel, Wortspiele wie Galgenraten, Wortsalat, Wortsuche, Wortbrocken, Brettspiele wie Schach, Dame, Reversi, ... Touchscreen mit Hintergrundbeleuchtung und Kontrastregelung für die optimale Darstellung; Punktebeurteilung Ihrer Gesamtleistung; benutzerfreundliche Bildschirmanweisungen; Kompakte Format und geringes Gewicht; 3 AAA-Batterien sind im Lieferumfang enthalten; Preis für Abonnenten: € 50,- inkl. Versand Inland (statt € 59,90)

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



Ein mit verschränkten Atomen betriebenes Atominterferometer (rechts) liefert sehr viel genauere Resultate als ein herkömmliches (links). Während im konventionellen Gerät parallele Messungen an mehreren Atomen voneinander unabhängig sind und somit nach den Regeln der Quantenmechanik zufällige Ergebnisse liefern, sind die Messungen an verschränkten Atomen miteinander korreliert und haben daher mit höherer Wahrscheinlichkeit dasselbe Resultat. Dadurch lässt sich die Phasenverschiebung im verschränkten Interferometer bei gleicher Atomzahl mit größerer Genauigkeit messen.

mit welcher Wahrscheinlichkeit ein bestimmter Messwert zu erwarten ist. Um bei einem Versuch wie dem oben beschriebenen die relative Phase zwischen den beiden Armen des Interferometers zu bestimmen, muss der Experimentator am Ende ermitteln, in welchem der beiden Ausgänge das Atom erscheint; je nach Phasendifferenz ist die Wahrscheinlichkeit dabei für Ausgang A oder B höher. Eine einzelne Messung erlaubt allerdings noch keine Rückschlüsse auf diese Wahrscheinlichkeit; dazu muss man den Versuch schon mit weiteren Atomen wiederholen und dann eine Statistik erstellen. Je mehr Messwerte vorliegen, desto genauer lassen sich die Wahrscheinlichkeiten bestimmen.

Ein Restfehler bleibt jedoch immer. Er beträgt, wie eine mathematische Betrachtung zeigt, nach  $N$  Messungen ungefähr eins durch Wurzel aus  $N$ . Selbst nach einer Million Wiederholungen liegt der relative Fehler daher immer noch bei einem Tausendstel. Dasselbe gilt, wenn man das Interferometrie-Experiment – wie in der Praxis üblich – gleichzeitig mit einer großen Zahl von Atomen durchführt. Da diese voneinander unabhängige Messwerte liefern, ist der relative Fehler hier umgekehrt proportional zur Wurzel aus der Atomzahl. Theoretisch sollte sich dieses Genauigkeitslimit allerdings deutlich verbessern lassen, wenn

man die Atome zu Beginn der Messprozedur miteinander »verschränkt«.

In der Quantenmechanik bedeutet Verschränkung, dass zwei oder mehr Teilchen eine innige Verbindung eingehen, indem sie etwa durch mechanische Stöße miteinander in Kontakt kommen. Diese Verbindung bleibt anschließend über beliebig große Entfernungen bestehen. Führt man nun eine Messung an einem der Teilchen durch, so beeinflusst dies augenblicklich auch die Ergebnisse von Messungen an den anderen (Grafik links oben). Auf Grund dessen sollte sich der relative Messfehler bei einer Million Atomen idealerweise von einem Tausendstel auf ein Millionstel verringern. Bisher war das nur eine theoretische Möglichkeit. Doch nun hat eine Forschungsgruppe aus Heidelberg gezeigt, dass die Methode auch in der Praxis funktioniert.

Markus Oberthaler und seine Kollegen verschränkten dafür tiefgekühlte Rubidiumatome durch elastische Stöße, deren Stärke sich mit einem Magnetfeld kontrollieren ließ. Als Nächstes realisierten sie ein Atominterferometer, indem sie die Teilchen mit Mikrowellenpulsen in Überlagerungszustände von zwei Energieniveaus versetzten. Dadurch wurden die Materiewellen der Rubidiumatome in zwei Teile aufgespalten, die sich unabhängig voneinander entwickelten, so dass es zu Phasenverschiebungen zwischen ihnen kam.

Nach einer gewissen Zeit ließen die Forscher mit einem weiteren Strahlungs-

puls die beiden Teilwellen miteinander interferieren. Anschließend ermittelten sie, wie viele Atome sich in jedem der zwei Energieniveaus befanden. Daraus errechneten sie die zuvor aufgetretene Phasenverschiebung und verglichen sie mit dem Erwartungswert. Laut Theorie sollte die Verteilung der Atome auf die beiden Energieniveaus, wenn das Zeitintervall zwischen den zwei Mikrowellenpulsen kontinuierlich verlängert wird, in Form einer Sinuskurve schwanken.

Tatsächlich stimmte das Messergebnis bei miteinander verschränkten Teilchen weitaus besser mit der erwarteten Sinuskurve überein als in einem Vergleichsexperiment, bei dem die Mikrowellenpulse so gewählt wurden, dass keine Verschränkung durch Stöße auftrat. Aus der Genauigkeit des Messergebnisses konnten die Heidelberger Forscher sogar ableiten, wie viele Atome bei dem Versuch jeweils quantenmechanisch aneinandergesetzt waren. Dabei erhielten sie die erstaunlich hohe Zahl von etwa 100.

In anderen Experimenten war es bisher nur gelungen, einige wenige Ionen oder Lichtteilchen in einen gemeinsamen Quantenzustand zu versetzen. Mit Hilfe von derart massenhaft verschränkten Atomen, so hoffen die Forscher, könnte sich die Genauigkeit von Atominterferometern also nochmals um ein Vielfaches steigern lassen.

**Oliver Morsch** ist promovierter Physiker und forscht an der Universität di Pisa über Quantencomputer.

#### ENERGIETECHNIK

## Kernfusion in der Schwebel

Ein schwebender Magnetring liefert einen neuen Ansatz für das saubere Kraftwerk der Zukunft. Das Konzept verspricht Kernfusion ohne schädliche Neutronenstrahlung, eines der größten Probleme bisheriger Reaktoren. Dafür sind andere Herausforderungen zu meistern.

Von Ralf Strobel

Seit 2009 entsteht mit dem International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) in Südfrankreich die bisher größte und teuerste Testanlage zur Kernfusion. 2026 sollen in der rund 20 Meter breiten Brennkammer des Kom-

plexes erstmals Wasserstoffkerne miteinander verschmelzen und dabei zehnmal so viel Energie liefern, wie zum Betrieb der Anlage nötig ist. Auch dieses »größte Wissenschaftsprojekt seit der Internationalen Raumstation«, wie es Frankreichs ehemaliger Staatspräsident Jacques Chirac nannte, ist allerdings nur der erste



Bei einem neuen Fusionsreaktorkonzept befindet sich im Zentrum der Plasmakammer ein supraleitender Ring von einem Meter Durchmesser (oben). Im Betrieb heben Magneten diesen Ring, der selbst ein magnetischer Dipol ist, in die Höhe und lassen ihn frei schweben (unten). Mikrowellen heizen das Gas in der Fusionskammer auf über zehn Millionen Grad auf, wobei es zu einem Plasma wird. Die elektrisch geladenen Plasmateilchen folgen dem Magnetfeld des Rings, das kreisförmig durch das Loch in dessen Mitte und entlang der Außenseiten verläuft, und bilden dabei einen Gürtel hoher Dichte in einigem Abstand zur Ringoberfläche, der auf dem Foto lila leuchtet.

Schritt in Richtung eines funktionsfähigen und bezahlbaren Fusionskraftwerks. Mit einem solchen Lieferanten unbegrenzter Mengen an sauberer Energie rechnen Experten nicht vor Mitte dieses Jahrhunderts.

Bis dahin sind noch etliche grundlegende Probleme zu lösen. Mit an erster Stelle steht beim Projekt ITER das Testen von Materialien für die Innenwände des Reaktors. Obwohl starke Magnetfelder das Plasma weitgehend von den Wänden fernhalten, müssen diese immer noch Temperaturschwankungen von mehreren tausend Grad Celsius verkraften. Heikler noch: Sie stehen unter ständigem Beschuss durch energiereiche Neutronen. Solche ladungslosen Bestandteile von Atomkernen dringen tief in jegliche Materie ein, verändern deren atomare Struktur und lassen das Material verspröden. Zudem werden die bestrahlten Teile selbst radioaktiv, und man muss sie für Jahrzehnte einlagern, bis sie keine Gefahr mehr darstellen.

Die Wahl des richtigen Brennstoffs könnte das Neutronenproblem der Kernfusion zumindest stark verringern. Aktuelle Reaktoren und auch der geplante ITER fusionieren meist Deuterium (einen Wasserstoffkern aus einem Proton und einem Neutron) mit Tritium (ein Proton plus zwei Neutronen). Diese Reaktion lässt sich verhältnismäßig leicht bewerkstelligen; denn die beteiligten Kerne tragen nur eine einfache Ladung, weshalb sie sich wenig abstoßen, und sind durch die zusätzlichen Neutronen relativ schwer, so dass sie bereits bei ge-

ringeren Drücken und Temperaturen heftig genug zusammenprallen, um miteinander zu verschmelzen. Als Produkt entsteht neben einem Heliumkern (aus zwei Protonen und zwei Neutronen) allerdings auch ein einzelnes Neutron, das rund 80 Prozent der frei gewordenen Energie abführt.

### Sauber brennen ohne Tritium

Traumziel aller Fusionsforscher wäre die Verbrennung von zwei Deuteriumkernen zu Helium. In diesem Fall träte – rein rechnerisch zumindest – kein überzähliges Neutron auf. Außerdem kommt Deuterium in genügender Menge natürlich vor, wohingegen das radioaktive Tritium erst durch Beschuss von Lithium mit Neutronen künstlich erzeugt werden muss.

Keiner der heute bekannten Reaktortypen wäre jedoch zu dieser Art der Fusion fähig. Grund ist eine um den Faktor 200 schlechtere Energieausbeute im Vergleich zur Deuterium-Tritium-Reaktion. Dadurch entzöge allein die Entnahme der »Abgase«, also des erzeugten Heliums, dem Plasma schon mehr Wärme, als die Teilchen zuvor bei ihrer Fusion geliefert hätten. Das schließt eine sich selbst erhaltende Reaktion aus.

Zudem wäre auch dieser Prozess nicht gänzlich neutronenfrei; denn die Deuterium-Deuterium-Fusion endet nur zu 50 Prozent beim Helium. Die andere Hälfte der Verschmelzungen produziert erneut Tritium, das dann weiter fusioniert, so dass 18 Prozent der erzeugten Energie auch hier in Form von Neutronen anfällt.

Ein neues Reaktorkonzept, mit dem seit 2004 Forscher am Massachusetts Institute of Technology (MIT) in Cambridge experimentieren, könnte zumindest in der Theorie viele der genannten Probleme umgehen. Für dieses Levitated Dipole Experiment (LDX) bauten die Wissenschaftler eine Anlage, bei der Magneten einen supraleitenden Ring von einem Meter Durchmesser im Innern der Plasmakammer frei schweben lassen. Der Torus erzeugt dabei selbst ein zueipoliges Magnetfeld ähnlich dem der Erde – allerdings 50 000-mal stärker.

Vorbild des ungewöhnlichen Reaktorkonzepts ist der Van-Allen-Strahlungsgürtel, der unseren Planeten umgibt: ein parallel zum Äquator orientierter Ring aus hochenergetischen Teilchen der kosmischen Strahlung, die das Erdmagnetfeld in 500 bis 45 000 Kilometer Höhe gefangen hält. Die Partikel folgen in engen Spiralen den Magnetfeldlinien und pendeln auf ihnen im Sekundentakt unaufhörlich zwischen Nord- und Südpol. Turbulenzen treiben sie dabei zu einer Zone größter Dichte nahe am Innenrand des Rings zusammen.

Schon 1987 schlug der Physiker Akira Hasegawa vor, diesen Effekt zu nutzen, um Fusionsplasma zu verdichten. Knapp zwei Jahrzehnte später setzten die MIT-Forscher seine Theorien beim LDX um und konnten an einem zehn Millionen Grad heißen Deuteriumplasma jetzt erstmals auch die grundlegende Anwendbarkeit des Prinzips beweisen (*Nature Physics*, Bd. 6, S. 207) – bisher allerdings ohne Fusion. Hauptvorteil des

## Springers Einwürfe

### Umsonst ist nur der Tod ...

... und der kostet das Leben.

**Wir kriegen die Krise, höre ich allenthalben.** Erst die Banken-, dann die Schulden- und nun vielleicht die Eurokrise. Manche sehen gar den Untergang des Abendlands voraus, seit dessen griechische Wiege wackelt. Die Hellenen waren in ganz Europa immer sehr geschätzt wegen ihrer lockeren Lebensart. Unvergesslich Alexis Sorbas, wie er angesichts des gescheiterten Versuchs, eine Seilbahn zu bauen, dem britischen Initiator zurnt „He Boss, hast du jemals etwas gesehen, was so schön zusammenkracht?“ und die Arme unwiderstehlich zum Sirtaki ausbreitet. Doch neuerdings macht man den Griechen ihr mediterranes Wesen zum Vorwurf. Dagegen möchte ich einwenden: Wer ohne Schulden ist, der werfe den ersten Stein.

Allerdings wüsste ich gern, was ich als virtueller Staatenlenker täte, wenn ich könnte. Aus Talkshows und Kommentaren kristallisieren sich für mich zwei Konsequenzen heraus, die ich unmöglich unter einen Hut kriege. Die einen predigen: Da der Staat astronomisch verschuldet ist, muss er brutalstmöglich sparen. Die anderen geben zu bedenken: Wenn die öffentliche Hand rücksichtslos spart, würgt sie die Wirtschaft ab. Beides leuchtet mir ein, geht aber nicht zusammen.

Vielleicht hilft mir David Stuckler aus dem Dilemma. Der Soziologe von der Oxford University formuliert zusammen mit den Medizinerin Sanjay Basu und Martin McKee einen simplen Gedanken, auf den man als Ökonom aber offenbar erst kommen muss (*Nature*, Bd. 465, S. 289). Ausgangspunkt ist die oberste Devise des altgriechischen Arztes Hippokrates: Die Therapie darf nicht schaden. Was folgt daraus für die Wirtschaftspolitik?

**Absolut schädlich für die von der Roskur betroffenen Menschen** wirken sich jedenfalls Maßnahmen aus, welche das Leben vieler verkürzen. Auf dieses von Ökonomen gern übersehene Kriterium hat der spätere Wirtschaftsnobelpreisträger Amartya Sen in unserer Zeitschrift schon im November 1993 unter dem Titel »Lebensstandard und Lebenserwartung« hingewiesen: »Das Gesamtbild einer Volkswirtschaft gewinnt erst präzisere Konturen, wenn man ihre Fähigkeit bewertet, das Leben zu verlängern und seine Qualität zu steigern.«

Ganz in Sens Sinn haben Stuckler und seine Koautoren herausgearbeitet, dass in wirtschaftlichen Rezessionsphasen die Sterblichkeit zunimmt. Zwar gibt es dann weniger tödliche Verkehrsunfälle, weil Autos für viele unerschwinglich werden und Arbeitslose notgedrungen zu Hause bleiben; aber dieser lebensverlängernde Nebeneffekt der Krise wird durch zusätzliche Morde und Selbstmorde, zunehmenden Alkoholismus und so weiter mehr als ausgeglichen.

Doch dabei ist entscheidend, wie der Staat auf die Rezession reagiert. Wo er, so Stuckler, Basu und McKee, pro Kopf und Jahr weniger als 70 Euro für Arbeitsbeschaffungsmaßnahmen ausgibt wie in Spanien und Osteuropa, steigen die Selbstmordraten. In Staaten wie Finnland und Schweden hingegen, die für Arbeit und Gesundheit mehr als 300 Euro aufwenden, hat das wirtschaftliche Auf und Ab kaum Einfluss auf das allgemeine Wohlbefinden.

Das scheint mir doch ein passabler Wegweiser durch den Dschungel der ökonomischen Weisheiten: Handle stets so, dass deine Wirtschaftspolitik wenigstens die Lebenserwartung nicht mindert. Der Staat muss sparen, weil fortgesetztes Schuldenmachen die kommenden Generationen belastet. Ein rigoroses Kürzen im Bereich Arbeit und Gesundheit aber erhöht direkt die Sterblichkeit. Das würde ich bei der Überlegung, wo der Rotstift anzusetzen ist, unbedingt in Rechnung stellen.



Michael Springer

Verfahrens: Wirbeleffekte sorgen dafür, dass nur kühlere Teilchen aus der Zone größter Dichte entkommen, weshalb der Wärmeverlust gering bleibt.

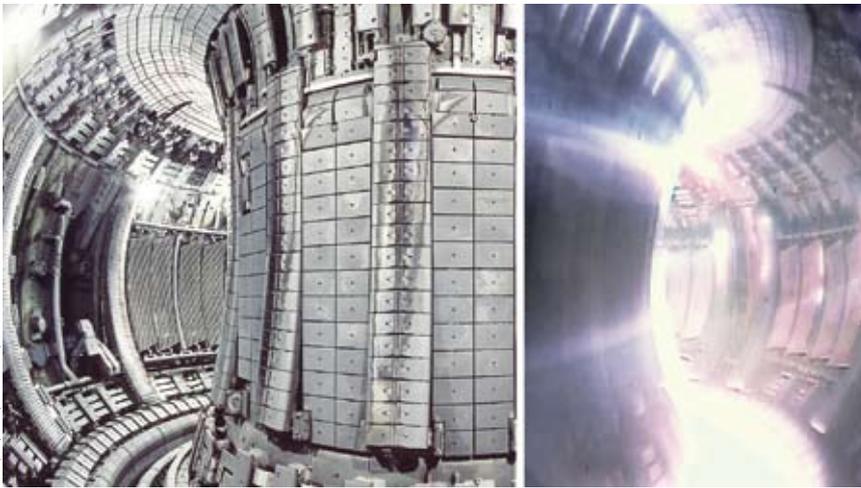
Anders als bei heutigen Reaktoren sollten sich die Abgase deshalb bequem in den Außenregionen des Plasmas entnehmen lassen, ohne dass dieses dabei zu stark auskühlt. So würde auch die Deuteriumfusion in den Bereich des Möglichen rücken. Ein weiterer grundsätzlicher Vorzug des schwebenden Rings bestünde zudem darin, dass sein Wirbelsog ein in sich stabiles System darstellt, während heutige Reaktortypen zahlreiche Regelmagneten benötigen, um das Plasma nach innen zu pressen und unter Kontrolle zu halten.

### Steiniger Weg zum Ziel

»Dieses einfache Prinzip ist schon sehr sexy«, findet auch Ralph Schorn vom Forschungszentrum Jülich. Er gibt jedoch zu bedenken: »Daraus einen rund um die Uhr laufenden Reaktor zu entwickeln, brächte wohl noch gravierendere technische Probleme mit sich, als das bereits bei heutigen Anlagen der Fall ist.«

Die größte Herausforderung wäre, die Spulen im Innern des Magnetings auf der für Supraleitung nötigen Temperatur weit unterhalb des Gefrierpunkts zu halten, während ein hunderte Millionen Grad heißes Plasma die Außenseite des Torus umgibt. Am LDX gelang das bisher nur für jeweils rund zwei Stunden, bevor die Forscher erneut flüssigen Stickstoff nachfüllen mussten. Für den Einsatz als Reaktor wären eine hochwirksame thermische Isolation und ein aktives Kühlsystem unvermeidlich. Doch dadurch würde der Ring nicht nur sehr schwer, sondern müsste zudem über Leitungen mit Energie versorgt werden und könnte nicht mehr völlig losgelöst im Plasma schweben.

Neutronenstrahlung hätte für ein solches System noch fatalere Folgen als für den ITER, denn sie würde ungehindert bis in die Spulen vordringen und sie aufheizen. Um einen wirklich strahlungsfreien Reaktor zu erreichen, schlagen die am LDX-Projekt beteiligten Forscher deshalb vor, durch elektromagnetische Felder das entstehende Tritium selektiv aus dem Plasma zu entfernen, bevor es erneut unter Abgabe eines Neutrons reagieren kann. Das Wasserstoffisotop zerfällt mit einer Halbwertszeit von zwölf Jahren zu Helium-3. Dieses könnte dann



In herkömmlichen experimentellen Fusionsreaktoren wie JET, die nach dem so genannten Tokamak-Prinzip funktionieren, umgeben Magneten eine ringförmige Kammer und komprimieren das darin kreisende Plasma.

als neuer Treibstoff dienen, da es keine Neutronen produziert. Zwischenzeitlich ließe sich das radioaktive Tritium, so die Forscher, gefahrlos in Graphit speichern. Je Kraftwerk wären hierfür nur rund fünf Tonnen des Kohlenstoffmaterials nötig.

Dass bis dahin noch viele Hürden zu überwinden sind, räumt auch Mike Mauel ein. Der heutige Kodirektor des LDX gehört seit den frühen 1990er Jahren der Forschergruppe an, die sich mit

dem neuen Konzept befasst. Er sieht den schwebenden Dipol bisher nicht als Konkurrenz zu heutigen Reaktorkonzepten. »Ich bin überzeugt, der ITER wird ein sehr aufregendes und erfolgreiches Experiment«, so der Physiker von der New Yorker Columbia University. »Die Fusionsenergie ist für die Zukunft der Menschheit aber von so großer Bedeutung, dass wir stets alle Wege dorthin im Blick behalten sollten.«

Als Nächstes muss der schwebende Magnetring nun erst einmal beweisen, dass er auch im größeren Maßstab und bei höheren Temperaturen funktioniert. Dann wird sich zeigen, ob das Prinzip oder Teile davon realistische Chancen haben, den Grundstein einer sauberen Fusion zu bilden.

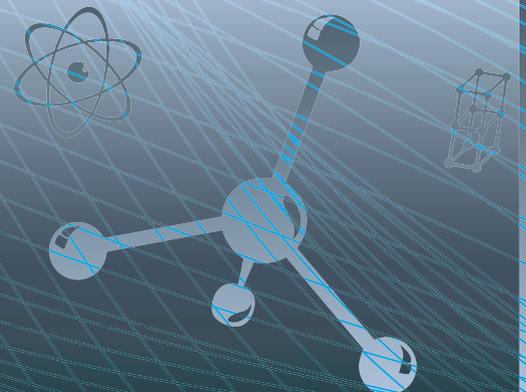
**Ralf Strobel** ist Volontär beim Verlag Spektrum der Wissenschaft.

# www.spektrum.de/aboplus

## Der Premiumbereich – exklusiv für Abonnenten von Spektrum der Wissenschaft

Treue **Spektrum der Wissenschaft**-Leser profitieren nicht nur von besonders günstigen Abo-Konditionen, exklusiv auf sie warten unter [www.spektrum.de/aboplus](http://www.spektrum.de/aboplus) auch eine ganze Reihe weiterer hochwertiger Inhalte und Angebote:

- alle **Spektrum der Wissenschaft**-Artikel seit 1993 im Volltext
- jeden Monat ein neuer Bonusartikel – und das Archiv mit allen Bonusartikeln
- ausgewählte Ausgaben anderer Zeitschriftentitel aus dem Programm der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH als kostenlose Downloads
- ein Mitgliedsausweis, dessen Inhaber in zahlreichen Museen und wissenschaftlichen Einrichtungen Vergünstigungen erhält
- das **spektrumdirekt**-Premiumabo sowie das »Produkt des Monats« – jeweils zum exklusiven Vorteilspreis
- unter allen Abonnenten verlosen wir jeden Monat 4 Gutscheine im Wert von € 25,- für den Science-Shop.de



# Neutrinos als BOTEN FERNER WELTEN

Da Neutrinos Materie fast ungehindert durchdringen, bringen sie uns Nachricht aus dem tiefsten Inneren der Sterne. Allmählich gelingt es, solche Botschaften zu entschlüsseln.

Von Graciela B. Gelmini, Alexander Kusenko und Thomas J. Weiler

**D**en Physik-Nobelpreis von 2002 haben sich Raymond Davis und Masatoshi Koshihara gleich mehrfach verdient. Davis gelang der Nachweis der Sonnenneutrinos; damit wurden zum ersten Mal solche extrem flüchtigen Teilchen aufgespürt, die nicht von der Erde stammten. Koshihara entdeckte Neutrinos, die von der großen Supernova-Explosion 1987 ausgingen. Mit diesen Meisterstücken der Experimentierkunst wurde nachgewiesen, dass die vermeintlich masselosen Geisterteilchen tatsächlich eine – wenn auch winzige – Masse haben. Doch vor allem zeichnete das Nobelpreiskomitee Davis und Koshihara dafür aus, dass sie einen neuen Wissenschaftszweig etablierten: die Neutrinoastronomie.

Damit avancierten die Partikel von einer theoretischen Kuriosität zu einem praktischen Werkzeug für die Erforschung des Alls. Ähnlich wie Astronomen vor 100 Jahren immer größere optische Teleskope konstruierten, bauen sie nun riesige Neutrino-teleskope. Diese Observatorien haben bereits Zehntausende der Teilchen eingefangen und damit die Sonne abgebildet. Neutrinos aus anderen kosmischen Quellen lassen sich nur schwer von den in der irdischen Atmosphäre erzeugten unterscheiden, aber schon im Frühjahr 2011 sollte auch das mit neuen Instrumenten gelingen.

Dann werden sich die Schleusen wahrer Datenfluten öffnen, und ein einst als unbeobachtbar missachtetes Partikel könnte unentbehrlich werden. Neutrinos vermögen Dinge zu enthüllen, für die Licht blind ist. Wenn wir die Strahlung der Sonne analysieren, sehen wir nur ihre Oberfläche – ein paar hundert Kilometer der obersten Gasschichten.

Obwohl die Energie durch Kernreaktionen tief im Inneren entsteht, wird das Sonnenlicht von den äußeren Gasschichten unzählige Male absorbiert und wieder emittiert. Hingegen offenbaren die Neutrinos unmittelbar den zentralen Fusionsreaktor – das heißeste Volumenprozent im Herzen der Sonne. Die dort erzeugten Exemplare durchqueren die Außenschichten fast wie leeren Raum.

Mit Neutrinos werden wir auch tief in Supernovae und andere Sternexplosionen – etwa Gammastrahlungsausbrüche – hineinschauen sowie in die Scheiben, die um super-schwere Schwarze Löcher wirbeln. Die jetzt im Bau befindlichen Observatorien dürften innerhalb der nächsten 50 Galaxien rund eine Supernova pro Jahr aufspüren. Vermutlich sehen sie auch ein paar von den Hunderten Gammastrahlungsausbrüchen, die sich jedes Jahr ereignen, ganz zu schweigen von noch exotischeren und bislang unbemerkten Himmelsobjekten. Doch wie jedes mächtige Werkzeug erfordert auch der Umgang mit Neutrinos eine gewisse Übung. Die Astronomen müssen neue Methoden lernen.

## Faszinierende Eigenbrötler

Für den Teilchenphysiker gleicht das Neutrino dem Elektron – bis auf die fehlende elektrische Ladung. Dadurch ist es immun gegen die elektromagnetischen Kräfte, die in der Alltagswelt herrschen. Wenn wir auf einem Stuhl sitzen, bewahrt uns die elektrische Abstoßung davor, hindurchzufallen. Wenn Chemikalien reagieren, tauschen Atome Elektronen oder teilen sie sich. Wenn Materie Licht absorbiert oder reflektiert, reagieren geladene Teilchen auf ein oszillierendes elektromagnetisches Feld. Doch da Neutrinos elektrisch neutral sind, passieren sie Festkörper praktisch ungehindert; sie spielen in der Atomphysik keine Rolle und bleiben lange völlig unbemerkt.

## In Kürze

► Kein Elementarteilchen **reagiert so wenig mit Materie** wie die Neutrinos; darum enthüllen sie das Innerste der Sterne und andere sonst unzugängliche Orte im Kosmos.

► Dieser Vorzug hat leider den Nachteil, dass sie sich **in einem Detektor kaum bemerkbar** machen. Erst in allerletzter Zeit gelingt es, kosmische Neutrinoquellen eindeutig zu identifizieren.

► Neutrinos existieren **in mehreren Varianten** und können sich im Flug verwandeln. Diese spezielle Eigenschaft liefert zusätzliche Informationen über ihre kosmische Herkunft.

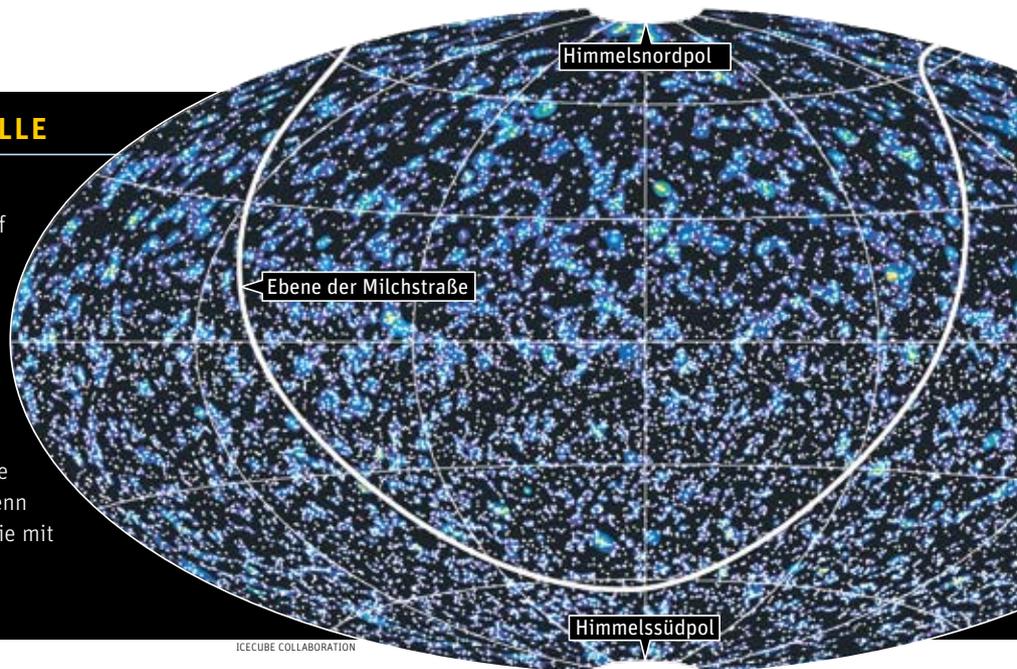


Ein unsichtbares Neutrino tritt von links in eine Blasenkammer ein, trifft ein Elektron (gelb markiert) und schickt es auf eine gewundene Reise (verschnörkelte Linie). Dieses legendäre Bild entstand 1972 in der Gargamelle-Blasenkammer am Europäischen Kernforschungszentrum CERN. Es erhärtete das Standardmodell der Teilchenphysik und schuf die Grundlage für die Verwendung von Neutrinos in der Astronomie.

## EIN BLICK DURCH DIE NEUTRINOBRILLE

### DER NEUTRINOHIMMEL

Durch diese Brille sieht der Himmel etwa so aus wie auf dem Bild, das mit dem halb fertigen IceCube-Observatorium von April 2008 bis Mai 2009 aufgenommen wurde. Die fast 20 000 Neutrinos (Punkte) stammen aus dem Kosmos sowie aus der oberen Erdatmosphäre. Die Subtraktion der atmosphärischen Produkte lässt ein mögliches kosmisches Signal übrig (farbig). Das Signal ist nur »möglich«, denn erst der komplette IceCube wird astronomische Quellen eindeutig identifizieren. IceCube sieht den gesamten Nord- und Südhimmel auf einmal, denn die Erde ist für die meisten Neutrinos – ausgenommen die mit höchsten Energien – fast transparent.



Manche kosmischen Strahlen sind geradezu **unerklärlich energiereich**. Neutrinos können ihre geheimnisvolle Quelle enthüllen

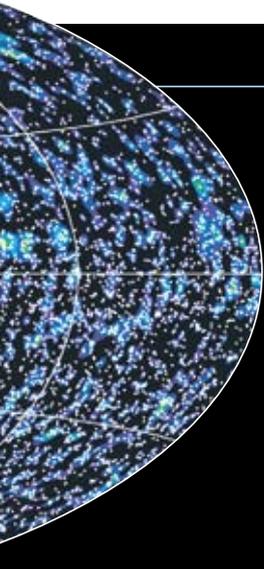
Die uns bekannten Neutrinoarten unterliegen der schwachen Kernkraft; sie ist für den radioaktiven Betazerfall verantwortlich sowie für die Fusion schwererer Elemente. Doch diese Kraft ist, wie der Name sagt, schwach – außer über extrem kleine Distanzen. Darum treten Neutrinos mit anderen Teilchen kaum in Wechselwirkung. Um sie zu entdecken, müssen Physiker und Astronomen große Materievolumina beobachten und darin nach seltenen Spuren suchen. Falls kosmische Neutrinos wie erwartet insgesamt so viel Energie haben wie die als kosmische Strahlung auf unseren Planeten einströmenden Protonen und Ionen, braucht man einen Kubikkilometer Materie, um eine nennenswerte Partikelmenge einzufangen. Die größten Observatorien sind fast so riesig (siehe Kasten S. 29).

Physiker haben zusätzlich so genannte sterile Neutrinos postuliert, die so prüde sind, dass sie sogar auf die schwache Kraft kaum reagieren; die Gravitation wäre ihre stärkste Verbindung zum übrigen Universum. Diese Sorte ist noch schwieriger zu entdecken (siehe Kasten S. 31).

Obgleich Neutrinos Eigenbrötler sind, nehmen sie aktiv am kosmischen Geschehen teil. Sie sind stets ein Nebenprodukt des Betazerfalls, der nicht nur die Trümmer explodierender Sterne und das Innere der Planeten erwärmt, sondern auch ein wichtiger Zwischenschritt bei der stellaren Kernfusion ist. Neutrinos spielen eine zentrale Rolle bei einem der zwei Supernova-Typen: Die Implosion eines sterbenden massereichen Sterns komprimiert sein Inneres auf die Dichte von Atomkernen und setzt binnen 10 bis 15 Sekunden  $10^{58}$  Neutrinos frei. In solchen Unmengen wird sogar das ungeselligste Teilchen zum Mittelpunkt des Geschehens. Neutrinos machen 99 Prozent der bei der Sternexplosion frei werdenden Energie aus. Wenn wir sie beobachten, gewinnen wir also jene 99 Prozent des Bilds, die gewöhnlichen Teleskopen entgehen – inklusive der entscheidenden Frühstadien. Der Nachweis der von der Supernova 1987 ausgehenden Neutrinos bestätigte die Grundzüge der Theorie vom stellaren Kollaps (siehe »Die große Supernova von 1987« von Stan Woosley und Tom Weaver, Spektrum der Wissenschaft 10/1989, S. 86). Die jetzt verfügbaren Detektoren können Kollaps, Rückprall und Explosion in Echtzeit wiedergeben.

Woher die Neutrinos auch stammen mögen, sie erreichen ohne Schwierigkeit die Erde. Sie durchdringen nicht nur Gas und Staub, sondern können sogar das gesamte Universum durchqueren, gleichgültig, wie hoch ihre Ener-





**ANSICHTEN DER SONNE**

Nachdem Astronomen die Sonne bei jeder Strahlungswellenlänge erforscht haben, sehen sie das Gestirn jetzt mit Neutrinoaugen. Das mit dem Super-Kamiokande-Experiment fabrizierte Bild (ganz rechts) ist sehr unscharf: Seine Auflösung beträgt 26 Grad, während die Sonne nur 0,5 Grad groß ist (schwarzer Kreis); dennoch ist das ein technischer Durchbruch. Während die Strahlung bloß die Oberfläche zeigt, offenbaren Neutrinos das Innerste der Sonne.

SICHTBAR (GEFILTERT)	ULTRAVIOLETT	RADIOWELLEN	NEUTRINOS

VON LINKS NACH RECHTS: 1. NASA / SOHO / EIT CONSORTIUM / MDI TEAM, 2. NASA / ESA / SOHO, 3. NRAO / AUI UND STEPHEN WHITE, UNIVERSITY OF MARYLAND, 4. SUPER-KAMIOKANDE KOLLABORATION

gie ist. Für Licht gilt das nicht. Die besonders energiereichen Gammastrahlen werden durch die kosmische Hintergrundstrahlung – diffuse Mikrowellen, die der Urknall hinterlassen hat – geschwächt. Gammastrahlungsfotonen mit 100 TeV (Teraelektronvolt) Energie kommen kaum einige zehn Millionen Lichtjahre weit. Auch energiereiche kosmische Strahlen werden blockiert.

Somit sind Neutrinos für Astronomen eines der wenigen Mittel, die gewaltigsten Naturphänomene zu erforschen. Sie sind schwer zu fangen, aber der Aufwand lohnt sich.

**Drei Typen mit Geschmack**

Sie sind nicht nur unnahbar, sondern haben auch die seltsame Gabe, sich zu verwandeln. Wie bei allen fundamentalen Materieteilchen gibt es drei Versionen, so genannte Flavors (englisch für Geschmack). Das Elektron (e) hat zwei schwerere Verwandte, das Myon (μ) und das Tau (τ), und jedes besitzt einen Neutrino-partner: das Elektronneutrino  $\nu_e$ , das Myon-neutrino  $\nu_\mu$  und das Tauneutrino  $\nu_\tau$ .

Doch während Elektron, Myon und Tau feste Massen haben, gilt das nicht für die drei Neutrino-Flavors. Misst man die Masse eines Neutrinos mit einem bestimmten Flavor, erhält man zufällig eines von drei Resultaten, jeweils mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit. Misst man umgekehrt den Flavor eines Neutrinos mit gegebener Masse, bekommt man eines von drei Ergebnissen. Ein Neutrino kann entweder einen spezifischen Flavor oder eine definierte Masse haben, aber nicht beides auf einmal. Die Massenzustände  $\nu_1, \nu_2, \nu_3$  unterscheiden sich von den Zuständen  $\nu_e, \nu_\mu$  und  $\nu_\tau$ .

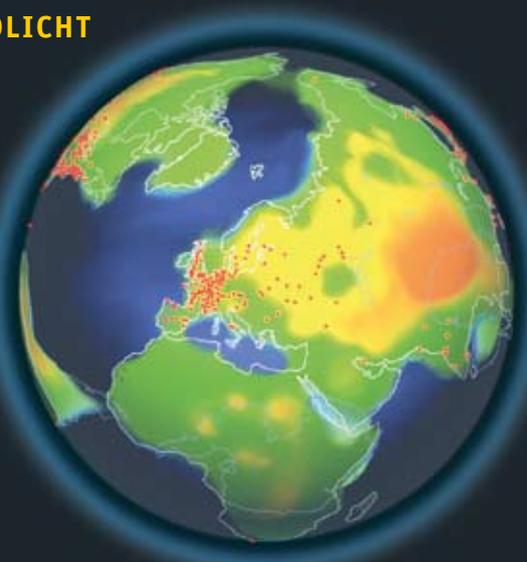
Damit widersprechen die Neutrinos unserer grundlegenden Erfahrung mit Alltagsobjek-

ten. Ein Basketball wiegt rund 600 Gramm, ein Tennisball knapp 60. Doch wenn Bälle sich wie Neutrinos benähmen, wöge ein Basketball manchmal 600, manchmal 60 Gramm. Insofern ähneln die Teilchen eher Menschen mit ihrer mehrfachen Gruppenidentität. Zum Beispiel können Wissenschaftler zugleich einem Institut und einer Partei angehören. Umfragen zufolge sind amerikanische Forscher zu sechs Prozent Republikaner, aber das heißt nicht, dass sechs Prozent der Forschungsinstitute zu dieser Partei gehören, sondern vielmehr, dass in einem typischen Labor sechs von 100 zufällig ausgewählten Wissenschaftlern Republikaner sind. In gleicher Weise kann sich ein  $\nu_1$ -Neutrino in einem Detektor mit berechenbarer Wahrscheinlichkeit als  $\nu_e, \nu_\mu$  oder  $\nu_\tau$  manifestieren.

**DIE ERDE IM NEUTRINOLICHT**

**In dieser schematischen Zeichnung**

erglöhnt unser Planet schwach von Neutrinos, die durch natürliche Radioaktivität freigesetzt werden; die Farben geben die Intensität wieder. Neuerdings nutzen Geophysiker deshalb Neutrinoobservatorien, um die Verteilung radioaktiver Isotope zu bestimmen. Weitere Quellen sind Kollisionen kosmischer Strahlen in der äußeren Atmosphäre, die mögliche Vernichtung von Dunkler Materie im Erdkern sowie Kernreaktoren.



GEORGE RETSECK

Der Flavor legt fest, wie Neutrinos von der schwachen Kernkraft beeinflusst werden, und die Masse bestimmt, wie sie sich durch den Raum bewegen. Beispielsweise erzeugt der Betazerfall nur Neutrinos des Flavors  $\nu_e$ . Für ihre Bahn im Raum ist ihr Flavor unwichtig; ihr Massenzustand diktiert ihr Verhalten. Das  $\nu_e$  ist eine Mischung aus  $\nu_1$ ,  $\nu_2$  und  $\nu_3$  in einem Verhältnis, das Physiker Mischungswinkel nennen. An Stelle eines einzigen Teilchentyps müssen die Physiker nun drei verfolgen. Schließlich reagieren die Neutrinos mit dem Material eines Detektors, und dabei kommt es wiederum auf den Flavor an. Falls die relativen Anteile der Massenzustände unverändert geblieben sind, addieren sie sich wieder zum ursprünglichen Flavor – beim Betazerfall zu  $\nu_e$ . Aber das muss nicht sein. Während die Partikel als Massenzustände unterwegs sind, können gewisse Effekte die Mischung und somit ihren Flavor verändern. Durch diesen Vorgang werden sie umgewandelt.

Jeder Massenzustand entspricht nach den Prinzipien der Quantenmechanik einer Welle mit bestimmter Wellenlänge. Die Wellen überlappen sich und interferieren miteinander. Um einen Vergleich mit der Akustik zu bemühen: Ein Neutrino gleicht einer Schallwelle, die aus drei reinen Tönen besteht. Wie jeder weiß, der je ein Musikinstrument gestimmt hat, erzeugen überlagerte Schallwellen mit geringfügig verschiedenen Tonhöhen oder Wellenlängen so genannte Schwebungen – eine Schwankung der Schallstärke. Im Fall der Neutrinos wirkt eine Massendifferenz wie ein Unterschied der Tonhöhe, und die Schwebungen verursachen eine räumliche Oszillation des Flavors (siehe Kasten S. 30).

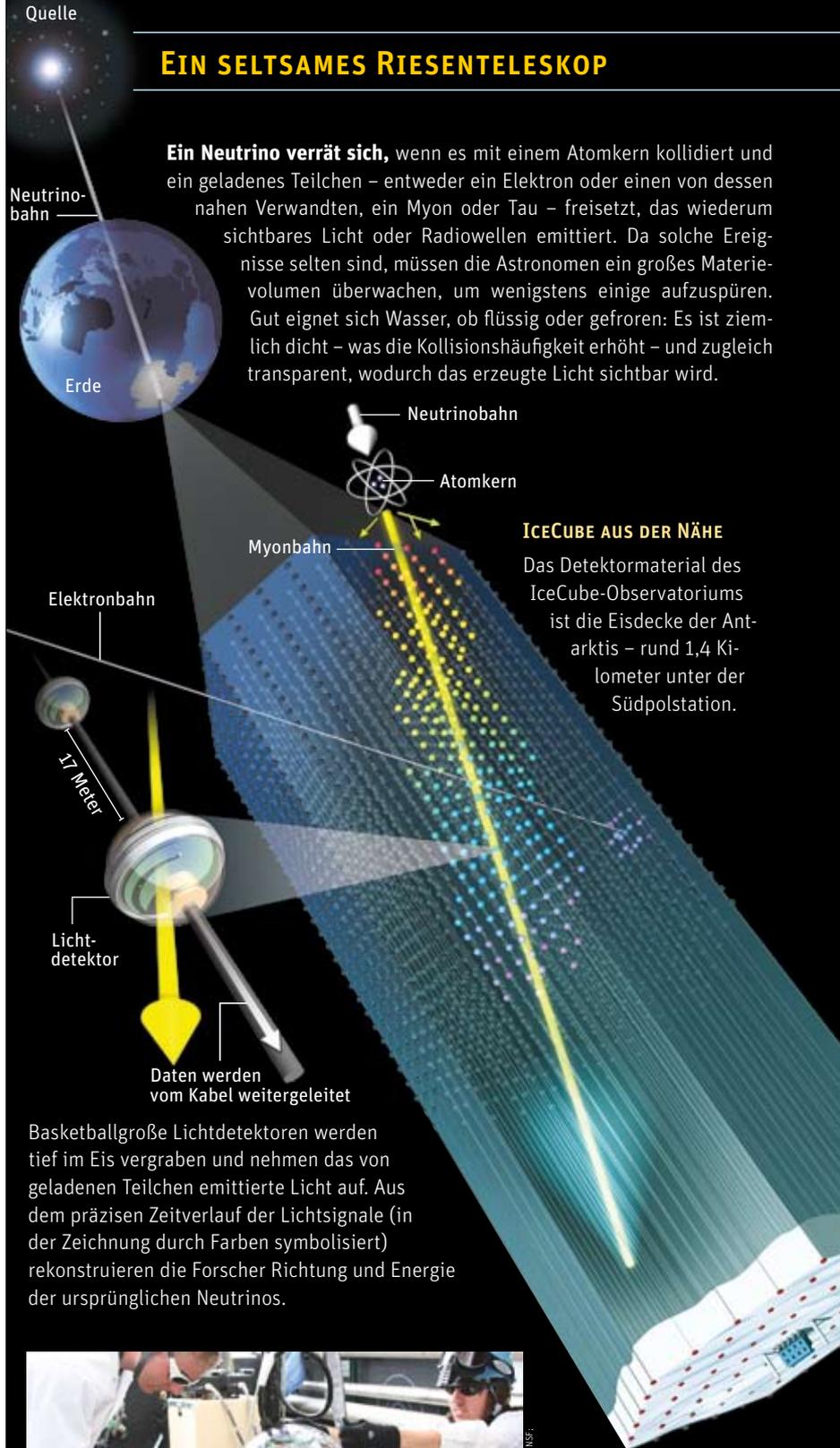
Die Sonne zum Beispiel erzeugt Elektronenneutrinos. Bevor sie die Erde erreichen, werden sie zu einer Mischung aus allen drei Flavors. Die bahnbrechenden Experimente von Davis und Koshiba zeigten nur Elektronenneutrinos auf; sie ignorierten die Myon- und Tauneutrinos, in die sich viele Elektronenneutrinos unterwegs verwandelt hatten. Erst der Detektor des Sudbury Neutrino Observatory in Kanada konnte 2001 und 2002 alle drei Flavors nachweisen (siehe »Ende einer unendlichen Geschichte« von Georg Wolschin, Spektrum der Wissenschaft 10/2002, S. 21).

Ein weiterer Fall von Neutrino-Metamorphose tritt auf, wenn die Partikel in der oberen Erdatmosphäre entstehen. Kosmische Strahlen kollidieren in der Luft mit Atomkernen und erzeugen instabile Teilchen, so genannte Pionen, die in Elektron- und Myonneutrinos zerfallen. Diese Neutrinos flitzen dann als Massenzustände ungehindert durch Luft und Erde. Je weiter ihr Weg bis zum Detektor ist,

Quelle

## EIN SELTSAMES RIESENTELESKOP

Ein Neutrino verrät sich, wenn es mit einem Atomkern kollidiert und ein geladenes Teilchen – entweder ein Elektron oder einen von dessen nahen Verwandten, ein Myon oder Tau – freisetzt, das wiederum sichtbares Licht oder Radiowellen emittiert. Da solche Ereignisse selten sind, müssen die Astronomen ein großes Materievolumen überwachen, um wenigstens einige aufzuspüren. Gut eignet sich Wasser, ob flüssig oder gefroren: Es ist ziemlich dicht – was die Kollisionshäufigkeit erhöht – und zugleich transparent, wodurch das erzeugte Licht sichtbar wird.



### ICECUBE AUS DER NÄHE

Das Detektormaterial des IceCube-Observatoriums ist die Eisdecke der Antarktis – rund 1,4 Kilometer unter der Südpolstation.

Basketballgroße Lichtdetektoren werden tief im Eis vergraben und nehmen das von geladenen Teilchen emittierte Licht auf. Aus dem präzisen Zeitverlauf der Lichtsignale (in der Zeichnung durch Farben symbolisiert) rekonstruieren die Forscher Richtung und Energie der ursprünglichen Neutrinos.

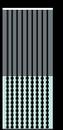


FOTO: HEIKO MARUYAMA, ICECUBE, NSF; ILLUSTRATIONEN: GEORGE BECK

Die Arbeit begann im südlichen Sommer 2005/2006 und soll 2010/2011 beendet sein. Die Forscher bohren mit heißem Wasser 2,5 Kilometer tiefe Löcher und versenken die Fotodetektoren an einem Kabel.

Ein Detektorenfeld auf der Oberfläche identifiziert kosmische Strahlen, die den Neutrino nachweis stören.

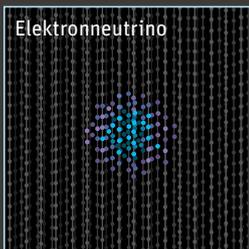
IceCube: 1000 Meter  
Empire State Building: 318 Meter



OBSERVATORIEN	KONSTRUKTION
<b>SUPER-KAMIOKANDE</b> Ort: nördlich von Nagoya (Japan) Detektorvolumen: 50 000 Kubikmeter Betriebsbeginn: 1996 Winkelauflösung: 26 Grad Energiebereich: $10^8 - 10^{12}$ eV	Fotodetektoren säumen einen riesigen Wassertank in einer Zinkmine. Physiker möchten durch 20-fache Erweiterung den Hyper-Kamiokande schaffen.
<b>PIERRE-AUGER-OBSERVATORIUM</b> Ort: südlich von Mendoza (Argentinien) Detektorvolumen: 30 000 km <sup>3</sup> (Teleskopgröße), 20 000 m <sup>3</sup> (Bodendetektoren) Betriebsbeginn: 2004 Winkelauflösung: 0,5 – 2 Grad Energiebereich: $10^{17} - 10^{21}$ eV	Auger ist vor allem ein Detektor für kosmische Strahlen, entdeckt aber mit einem Feld von 1600 kleinen Wassertanks auch energiereiche Neutrinos. Außerdem halten Ultraviolett-Teleskope nach Teilchenkollisionen in der Atmosphäre Ausschau.
<b>ANTARCTIC IMPULSE TRANSIENT ARRAY (ANITA)</b> Ort: McMurdo-Station (Antarktis) Detektorvolumen: 1 Million km <sup>3</sup> Flugzeiten: 2006 – 2007, 2008 – 2009 Winkelauflösung: 1 – 2 Grad Energiebereich: $10^{17} - 10^{21}$ eV	Ein Ballon schwebt einen Monat lang über der Antarktis, um nach Radiowellen zu suchen, die von energiereichen, mit der Eisdicke kollidierenden Neutrinos stammen.
<b>ASTRONOMY WITH A NEUTRINO TELESCOPE AND ABYSS ENVIRONMENTAL RESEARCH (ANTARES)</b> Ort: Mittelmeer bei Marseille (Frankreich) Detektorvolumen: 0,05 km <sup>3</sup> Betriebsbeginn: 2008 Winkelauflösung: 0,3 Grad Energiebereich: $10^{13} - 10^{16}$ eV	Zwölf am Meeresboden verankerte Fotodetektorstränge suchen nach Kollisionen im Wasser. ANTARES ist eines von drei Pilotprojekten für das KM3NeT, ein für 2011 bis 2015 geplantes kubikkilometergroßes Neutrino-teleskop.
<b>ICECUBE</b> Ort: Südpol Detektorvolumen: 1 km <sup>3</sup> geschätzte Fertigstellung: 2011 Winkelauflösung: 1 – 2 Grad Energiebereich: $10^{11} - 10^{21}$ eV	86 lichtempfindliche Detektorstränge und einige Radioantennen werden durch Bohrlöcher ins Eis versenkt und frieren dort fest. IceCube ist die vergrößerte Version des früheren AMANDA-Experiments (Antarctic Muon and Neutrino Detector Array).
<b>EXTREME UNIVERSE SPACE OBSERVATORY (EUSO)</b> Ort: Internationale Raumstation Detektorvolumen: 1 Million km <sup>3</sup> Luft (entspricht 1000 km <sup>3</sup> Eis) geschätzte Fertigstellung: 2015 Winkelauflösung: 1 – 2 Grad Energiebereich: $10^{19} - 10^{21}$ eV	Ein Ultraviolett-Teleskop des Japanese Experiment Module (JEM) wird die Erdatmosphäre nach Spuren geladener Teilchen durchsuchen.

RÜCKSCHLUSS AUF DEN NEUTRINO-FLAVOR

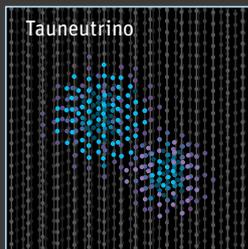
Jeder Neutrinentyp oder Flavor setzt sein zugehöriges Teilchen frei – ein Elektronneutrino ein Elektron, ein Myonneutrino ein Myon und ein Tau-neutrino ein Tau. Anhand der unterschiedlichen Lichtmuster lässt sich der Flavor auf 25 Prozent genau feststellen.



Das Elektron tritt mit Atomen in Wechselwirkung und gibt seine Energie ab. Ein fast kugelförmiges Volumen leuchtet auf.



Da das Myon weniger wechselwirkt, legt es mindestens einen Kilometer zurück und erzeugt dabei eine kegelförmige Lichtspur.



Das Tau zerfällt rapide. Seine Entstehung und sein Zerfall bringen zwei Lichtkugeln hervor – den typischen »Doppelknall« (double bang).

JEN CHRISTENSEN

desto mehr Myonneutrinos verwandeln sich in Tauneutrinos. Darum sehen die Neutrino-observatorien halb so viele Myonneutrinos, die von unten – von der anderen Seite des Planeten – kommen, wie von oben, direkt aus der äußeren Atmosphäre.

Kosmische Teilchenbeschleuniger

Für Neutrinoastronomen trägt der Flavor ähnlich bedeutsame Information wie die Polarisation von Licht. Ein Himmelsobjekt kann nicht nur Strahlung einer bestimmten Polarisation aussenden, sondern auch Neutrinos mit gewissen Flavors, und aus deren Messung schließen die Astronomen, welche Prozesse innerhalb der Quelle abgelaufen sind. Der Trick besteht darin, die Metamorphose, welche die Partikel auf ihrer Reise erfahren haben, rechnerisch rückgängig zu machen.

Wenn wir die Energie und die zurückgelegte Wegstrecke eines Neutrinos präzise messen könnten, dann wüssten wir, an welcher Stelle sein Oszillationszyklus aufgehört hat, und wären in der Lage, die relativen Anteile der drei Flavors zu berechnen. Diese Präzision fehlt uns. Über große Distanzen und lange Zeiten oszillieren die Teilchen so oft, dass wir die Flavormischung nicht verfolgen können – sie erscheint uns verschwommen. Stattdessen begnügen wir uns mit einem statistischen Mittelwert, den die so genannte Flavor-Ausbreitungsmatrix beschreibt. Aus dieser Matrix können die Astronomen herleiten, wie das beobachtete Mischungsverhältnis ursprünglich ausgesehen haben muss.

Zum Beispiel stammen viele Neutrinos vermutlich von extrem energiereichen Kollisionen zwischen Photonen und Protonen. Dieser Vorgang findet in gewaltigen kosmischen Teilchenbeschleunigern statt – an den Stoßfronten von Supernova-Resten und in den von Schwarzen Löchern erzeugten Jets – sowie in den Tiefen des Raums, wo kosmische Strahlen mit der Hintergrundstrahlung wechselwirken. Die Kollisionen produzieren geladene Pionen, die zu Myonen und Myonneutrinos zerfallen. Die Myonen wiederum zerfallen unter anderem in Elektronen und Elektronneutrinos. Der resultierende Neutrinostrom besteht aus einem Teil  $\nu_e$ , zwei Teilen  $\nu_\mu$  und keinem  $\nu_\tau$  – ein Flavorverhältnis von 1:2:0. Aus den entsprechenden Werten in der Ausbreitungsmatrix schließen wir, dass dieses Verhältnis sich zu 1:1:1 entwickelt. Wenn ein irdisches Experiment etwas anderes sieht als 1:1:1, dann kann die Pion-Zerfallskette nicht die Quelle der Neutrinos sein.

Mitunter verlieren die Pionen Energie, weil sie mit anderen Partikeln kollidieren oder weil sie in einem Magnetfeld eine gekrümmte

# DIE METAMORPHOSE DER NEUTRINOS

Im Gegensatz zu anderen Teilchensorten mutieren Neutrinos, während sie durch den Raum jagen. Die Astronomen müssen diesen Effekt rechnerisch umkehren, um zu rekonstruieren, wie die Teilchen ursprünglich aussahen und wodurch sie entstanden.

## MHRDEUTIGE IDENTITÄT

Ein Neutrino hat die einzigartige Fähigkeit, zu mutieren, weil es zwei Identitäten besitzt. Es kann drei unterschiedliche Flavors und unabhängig davon dreierlei Massen haben.

Der **FLAVOR** bestimmt, wie das Teilchen mit Materie wechselwirkt.



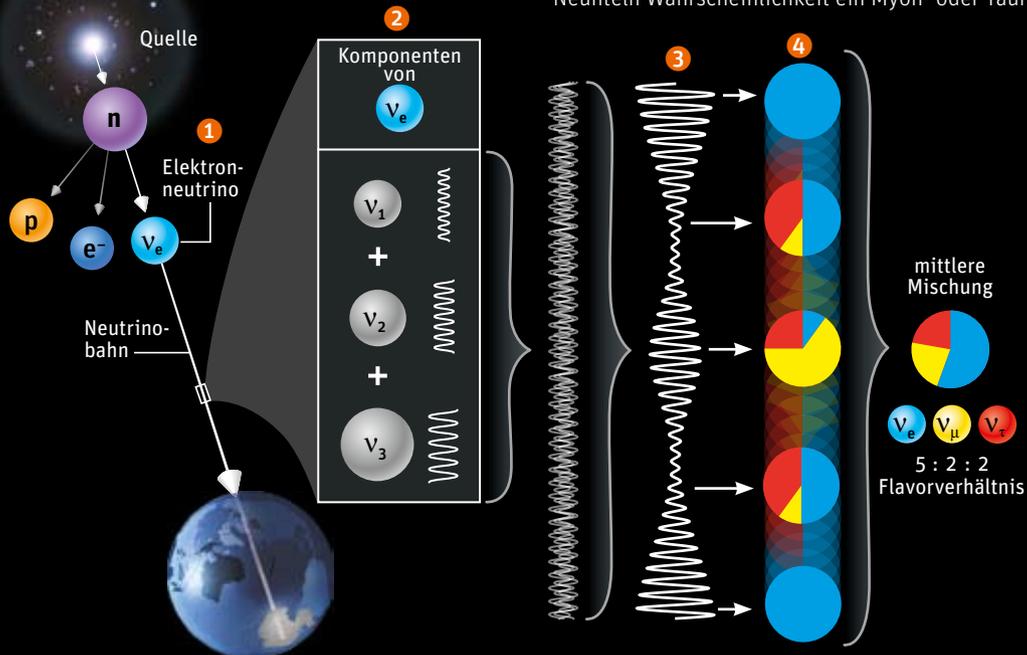
Die **MASSE** bestimmt, wie das Teilchen sich durch den Raum bewegt.



## FLAVOR-OSZILLATIONEN

Wenn ein Neutrino erzeugt oder nachgewiesen wird, hat es einen bestimmten Flavor. Beispielsweise erzeugt der Betazerfall des Neutrons ein Elektronneutrino 1. Dieses Neutrino hat keine bestimmte Masse, sondern ist ein Gemisch aus allen drei Möglichkeiten, dargestellt durch eine Summe aus drei Wellen unter-

schiedlicher Wellenlänge 2. Während das Neutrino sich fortbewegt, geraten die Wellen aus dem Takt; sie addieren sich nicht mehr zu dem ursprünglichen Flavor, sondern zu einem Gemisch aus allen drei Flavors 3. Das Gemisch variiert, während das Neutrino unterwegs ist 4. Hier beträgt die Mischung im Mittel 5:2:2 – das heißt, im Detektor erscheint mit einer Wahrscheinlichkeit von fünf Neunteln ein Elektronneutrino und mit je zwei Neunteln Wahrscheinlichkeit ein Myon- oder Tauneutrino.



FLAVORMISCHUNGEN	QUELLE	MISCHUNG AN DER QUELLE	MISCHUNG AUF DER ERDE
Astrophysikalische Prozesse erzeugen unterschiedliche Flavormischungen, die sich durch Zurückrechnen der Metamorphose herleiten lassen. Im Detektor tauchen Myon- und Tauneutrinos auf Grund ihrer Symmetrieeigenschaften stets zu gleichen Teilen auf.	Neutronzerfall	$1\nu_e : 0\nu_\mu : 2\nu_\tau$	$5\nu_e : 2\nu_\mu : 2\nu_\tau$
	Pionzerfall (vollständig)	$1 : 2 : 0$	$1 : 1 : 1$
	Pionzerfall (unvollständig)	$0 : 1 : 0$	$4 : 7 : 7$
	Zerfall Dunkler Materie (Beispiel)	$1 : 1 : 2$	$7 : 8 : 8$
	Raumzeit-Schaum	beliebig	$1 : 1 : 1$
	Neutrinozerfall ( $\nu_1$ am leichtesten)	beliebig	$4 : 1 : 1$
	Neutrinozerfall ( $\nu_3$ am leichtesten)	beliebig	$0 : 1 : 1$

ILLUSTRATIONEN: JEN CHRISTIANSEN, QUELLE UND ERDE (LINKS AUSSEN); GEORGE REISECK

## STERILE NEUTRINOS

**Gelegentlich dachten Kosmologen**, die rätselhafte Dunkle Materie könnte aus Neutrinos bestehen; dafür erwiesen sich die Teilchen aber als zu leicht – sie besitzen höchstens ein Millionstel der Elektronmasse. Möglich wäre jedoch, dass es eine noch unbeobachtete Variante gibt, so genannte sterile Neutrinos, die nicht auf die schwache Kernkraft reagieren und die gewünschte Masse mitbringen.

Der Nachweis steriler Neutrinos erscheint zunächst völlig unmöglich, aber dasselbe dachte man früher auch von gewöhnlichen Neutrinos. Vielleicht verraten sie sich bei Supernova-Explosionen. Da solche Sternkatastrophen asymmetrisch ablaufen, würden die

Partikel bevorzugt in eine Richtung emittiert, und der Reststern müsste einen Stoß von mehreren hundert Kilometern pro Sekunde in Gegenrichtung erleiden. Tatsächlich beobachten die Astronomen diesen Rückstoß und können ihn bislang nicht erklären.

Außerdem könnten sterile Neutrinos instabil sein und zu Röntgenphotonen zerfallen. Das Chandra-Röntgenobservatorium entdeckte schwache Emissionen, die auf ein steriles Neutrino mit einem Hundertstel der Elektronmasse hinweisen, und die Suzaku-Röntgenmission fand ebenfalls ein schwaches Signal dieser Art. Der Zerfall steriler Neutrinos könnte auch den Wasserstoff im frühen Universum ionisiert haben oder sogar erklären, warum es viel mehr Materie als Antimaterie gibt. Doch vorläufig sind all diese Indizien uneindeutig.

Bahn beschreiben und dabei Strahlung emittieren. Dadurch kommt das Myon, in welches das Pion zerfällt, nicht mehr als energiereiche Neutrinoquelle in Frage, und die ursprüngliche Flavormischung beträgt 0:1:0. Gemäß der Ausbreitungsmatrix wird dann das Verhältnis auf der Erde nicht 1:1:1 ausmachen, sondern 4:7:7. Falls ein Experiment für niederenergetische Neutrinos einen Flavor 1:1:1 feststellt, aber 4:7:7 für hochenergetische, können Astronomen daraus auf die Teilchendichte und magnetische Feldstärke der Quelle schließen.

Neutrinos stammen manchmal auch aus so genannten Betastrahlenquellen. In kosmischen Teilchenbeschleunigern können sehr schnelle Atomkerne Pionen austauschen oder einfach zerfallen; dabei entsteht ein Strahl schneller Neutronen. Die Neutronen gehen durch Betazerfall in einen reinen Strahl aus Elektronen und Elektronenneutrinos über, mit einem Flavorverhältnis 1:0:0. Nach Anwendung der Ausbreitungsmatrix ergibt sich als Flavormischung auf der Erde 5:2:2.

Unabhängig von der anfänglichen Mischung kommen die beiden Flavours  $\nu_\mu$  und  $\nu_\tau$  auf der Erde stets in gleichen Mengen an. Dieser Umstand deutet auf eine tiefere, noch ungeklärte Symmetrie und ist bemerkenswert, weil demnach Tauneutrinos immer in Teleskopen auftauchen, obwohl keine bekannte astrophysikalische Quelle sie produziert.

Das Flavorverhältnis vermag über die unterschiedlichen Vorgänge in Himmelsobjekten besser Auskunft zu geben als jede andere Informationsquelle. Zusammen mit kosmischen und Gammastrahlen werden Neutrinos den Mechanismus und das Energiebudget der mächtigsten natürlichen Beschleuniger aufklären. Damit lässt sich unterscheiden, ob kosmische Teilchenbeschleuniger rein elektromagnetisch funktionieren – wobei keine Neutrinos entstehen – oder ob schwere Partikel beteiligt sind, denn dann tauchen Neutrinos auf. Viel-

leicht löst sich auf diese Weise sogar ein Rätsel, das die Astronomen besonders quält: Wie entsteht die kosmische Strahlung höchster Energie? Einige kosmische Strahlen sind so energiereich, dass an ihrer Erklärung die herkömmliche Physik zu scheitern droht; Neutrinos können das Innere des geheimnisvollen Entstehungsorts aufdecken.

Das gilt auch für andere Naturvorgänge. Der Zerfall von Teilchen der Dunklen Materie liefert vermutlich Neutrinos im Verhältnis 1:1:2, das sich zu ungefähr 7:8:8 weiterentwickelt. In bestimmten Quantentheorien der Gravitation vibriert in mikroskopischem Maßstab das Gewebe der Raumzeit selbst. Neutrinos sehr hoher Energie haben so kurze Wellenlängen, dass sie vielleicht für diese Fluktuationen empfindlich sind. Die Raumzeitschwankungen durchmischen dann den Flavor und führen zu dem beobachteten Verhältnis von 1:1:1. Wenn die Physiker künftig eine andere Mischung als 1:1:1 messen, können sie bestimmte Theorien ausschließen und die Energieniveaus bestimmen, bei denen Quantengravitationseffekte ins Spiel kommen.

Ein weiterer exotischer Prozess ist der Zerfall eines schweren Neutrinos in eine leichtere Variante mit veränderter Flavormischung. Aus der Untersuchung der Sonnenneutrinos wissen die Forscher zwar, dass  $\nu_1$  leichter ist als  $\nu_2$ , aber sie wissen nicht, ob  $\nu_1$  oder  $\nu_3$  am leichtesten ist. Fänden die Astronomen ein Verhältnis 4:1:1, so würde das bedeuten, dass Neutrinos tatsächlich instabil sind und dass  $\nu_1$  das leichteste ist; eine Mischung 0:1:1 würde für  $\nu_3$  sprechen.

Die Astronomie begann einst als Himmelsbeobachtung mit sichtbarem Licht und erweiterte ihre Wahrnehmung schrittweise über Infrarot, Mikro- und Radiowellen zu Röntgen- und Gammastrahlen. Nun kommen die Neutrinos hinzu. Das kommende Jahrzehnt wird das goldene Zeitalter der Neutrinoastronomie sein.



**Graciela B. Gelmini** (oben) ist Physikprofessorin an der University of California in Los Angeles (U.C.L.A.). Sie studierte in Argentinien Kunst, Philosophie und Astronomie, bevor sie sich für Physik entschied.

**Alexander Kusenko** (Mitte) schloss sein Physikstudium in der Sowjetunion ab, nutzte dann ein Austauschprogramm, um zur Stony Brook University (US-Bundesstaat New York) zu wechseln, und ging schließlich zur U.C.L.A. Er und Gelmini gehören dem Team des Pierre-Auger-Observatoriums an.

**Thomas J. Weiler** studierte Quantenmechanik und Relativitätstheorie an der Stanford University und an der University of Wisconsin-Madison. Er ist Physikprofessor an der Vanderbilt University und gehört zum Team des Extreme Space Observatory.

**Gelmini, G. B.:** High Energy Cosmic Rays. In: Journal of Physics: Conference Series 171(1), Paper Nr. 012012, 2009.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/1034788](http://www.spektrum.de/artikel/1034788).

## Die Energie der platzenden Kirsche

Was einer reifen Frucht den Kragen platzen lässt, könnte bald zu unserer Energieversorgung beitragen.



Eine Kirsche nach längerem Regen: Quer über die Frucht läuft eine tiefe Platzwunde und zeugt von der Energie, die hier im Spiel sein kann.

Von H. Joachim Schlichting

Kirschen haben es nicht leicht. Mal setzt ihnen der Frost zu, und wenn ihnen in der Endphase ihres Wachstums anhaltender Regen zu schaffen macht, platzt ihnen sogar regelrecht der Kragen. Dann wird alles nur noch schlimmer, denn vor allem Pilze nutzen dieses Einfallstor ins Fruchtfleisch allzu gerne. Andererseits lässt sich dem Vorgang auch Positives abgewinnen. Denn wo etwas platzt, muss allerhand Energie im Spiel sein. Tatsächlich illustriert der Vorgang die ganz erhebliche Kraft der Osmose. Die wiederum könnte im Prinzip schon bald einiges zu unserer Energieversorgung beitragen.

Das Fruchtfleisch der Kirsche wird durch eine Membran zusammengehalten, die wie viele andere Häute die wunderbare Eigenschaft zu selektieren besitzt. Sie lässt bestimmte Stoffe durch und andere nicht. Die

Kirschhaut etwa arbeitet dank spezialisierter Proteine wie ein Sieb oder Filter, in dem – grob gesagt – die Teilchen nach Größe sortiert werden. Sie ist durchlässig für von außen eindringende Wassermoleküle, nicht aber für die Zuckermoleküle in ihrem Inneren.

Was treibt die Wasserteilchen überhaupt dazu, gegen den dort herrschenden Druck ins Innere der Kirsche vorzudringen, zumal sie den Druck in der bereits prall mit Saft gefüllten Kirsche noch weiter erhöhen?

Dafür verantwortlich ist die universelle Tendenz der Natur, einheitliche Verhältnisse zu schaffen. Man trifft sie allenthalben an. Niemand wundert sich, wenn ein Tropfen Tinte ein ganzes Glas mit Wasser einheitlich hellblau einfärbt oder heißer Tee nach einiger Zeit Zimmertemperatur annimmt. Thermodynamisch lassen sich diese Prozesse mit dem Begriff der Entropie beschreiben. Die Veränderlichkeit dieser Größe kann man als Maß für das Mischungsbestreben auffassen. Dahinter verbirgt sich der 2. Hauptsatz der Thermodynamik, wonach Prozesse in einem abgeschlossenen System stets so ablaufen, dass dessen Entropie zunimmt.

Im Fall zweier Flüssigkeiten unterschiedlicher Konzentration erfolgt die Entropiezunahme durch Diffusion von Teilchen. Sind die Flüssigkeiten durch eine Membran getrennt, entscheidet die Teilchengröße oder im Fall von Molekülen die Molmasse, in welche Richtung der Konzentrationsausgleich stattfindet. Bei der Kirsche ist es das eindringende Wasser, das für den Ausgleich sorgt.

Wie stark die Tendenz zum Konzentrationsausgleich ist, zeigt die Kirsche ebenfalls. Das Wasser lässt sie platzen, obwohl ihre Haut erheblichen Druck aushält. Wer eine Kirsche bis über die Elastizitätsgrenze hinaus zusammendrückt, erlebt, wie weit der Saft spritzen kann – das gibt einen anschaulichen Eindruck von der Größe des Drucks, dem ihre Membran gerade noch standhalten kann.

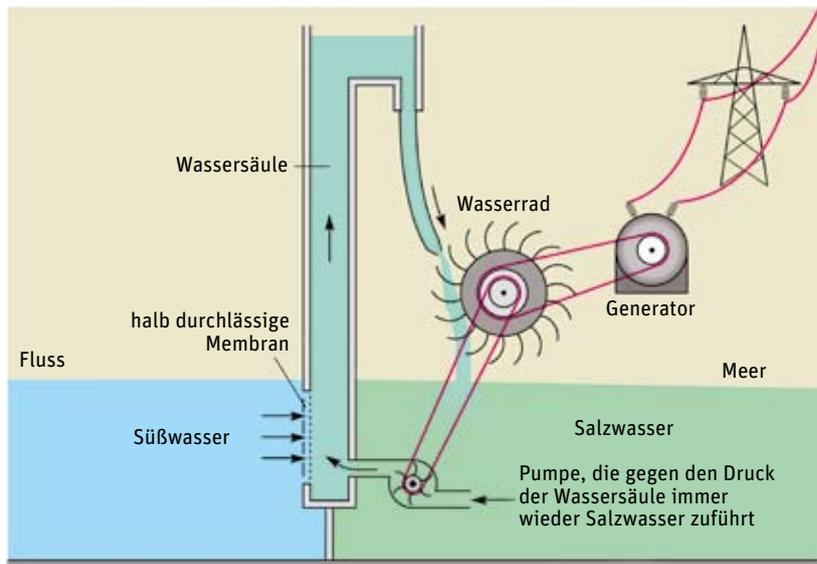
Die mechanische Wirkung des Mischungsbestrebens lässt sich in einem einfachen Experiment demonstrieren. Dazu füllt man ein Röhrchen, das am unteren Ende mit Zellophan fest abgedichtet ist, etwa mit Himbeersirup oder mit Wasser hoher Salzkonzentration. Das Röhrchen taucht man in Wasser,

und zwar so, dass seine Füllhöhe der Wasseroberfläche entspricht. (Dadurch schaltet man zumindest anfangs die Wirkung des hydrostatischen Drucks aus – es geschieht also nicht einfach deshalb etwas, weil die Schwerkraft des Wassers wirkt.) Dann kann man beobachten, wie der Wasserspiegel im Röhrchen allmählich steigt, obwohl die Wassersäule zunehmenden Druck aufbaut, der die Flüssigkeit eigentlich wieder nach unten durch die Membran herausdrücken will. Jetzt hat die Wassersäule potenzielle Energie oder Lageenergie gewonnen. Liefße man das Wasser ablaufen, könnte man damit im Prinzip einen Generator betreiben.

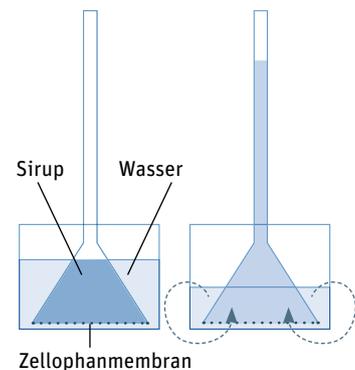
Könnten wir solche Mischungsvorgänge tatsächlich »zähmen« und zur Energiegewinnung heranziehen? Diese unorthodoxe Idee gewinnt dadurch an Reiz, dass in der Natur ständig großräumige Mischungsvorgänge stattfinden: dort etwa, wo Süßwasserflüsse in Salzwassermeere einmünden. An mangelndem Mischungsbestreben sollten Osmosekraftwerke nicht scheitern. Ihr Potenzial zeigen thermodynamische Abschätzungen, bei denen man die beiden Flüssigkeiten wie ideale Gase behandelt, die sich zu vermischen streben: Trifft Meerwasser mit einer Salzkonzentration von drei Prozent auf reines Flusswasser, ist der osmotische Druck theoretisch so stark, dass er eine rund 230 Meter hohe Wassersäule aufstauen könnte. Oder anders gesagt: Gelänge es, die durch Membranen kanalisierte Vermischung von Süßwasser mit Salzwasser vollständig zu nutzen, erhielte man die Energie eines in 230 Meter Tiefe stürzenden Flusses.

Die Idee, das Mischungsbestreben von Salz- und Süßwasser zur Energiegewinnung einzusetzen, wurde von Richard S. Norman von der University of Connecticut bereits in den 1970er Jahren geäußert, zeitgleich beschäftigte sich auch Sydney Loeb von der israelischen Ben-Gurion-Universität mit dieser Frage. Das erste Osmosekraftwerk existiert allerdings erst seit 2009. Errichtet wurde die Versuchsanlage vom norwegischen Energiekonzern Statkraft.

Das Hauptproblem, dem sich dieser europaweit größte Produzent erneuerbarer Energie gegenüber sieht: Die großtechnische Nutzung der Osmose erfordert die Herstellung leistungsfähiger, großflächiger Membranen. Salz müssen sie auch bei hohem Druck wirkungsvoll zurückhalten, während sie Wasser möglichst widerstandsarm hindurchlassen sollten. Speziell entwickelte Polymerfolien können diese Aufgabe mittlerweile erfüllen. Wegen des enormen Druckgefälles zwischen den Flüssigkeiten müssen die hauchdünnen Membranen aber auf einem porösen Substrat



An Flussmündungen, wo Süß- und Salzwasser sonst ungehindert ihre Salzkonzentration ausgleichen, können Kraftwerke Energie gewinnen. Denn der osmotische Druck befördert das vermischte Wasser auf ein höheres Energieniveau. Dann fällt es gemäß dieser (dem ursprünglichen Entwurf von Richard S. Norman nachempfundenen) Skizze auf ein Wasserrad, das einen Generator antreibt. Wirkungsgradverluste entstehen auch dadurch, dass eine Pumpe gegen den Druck der Wassersäule immer wieder Salzwasser zuführen muss.



aufgebracht werden, das ihnen die nötige Stabilität verleiht.

Pro Quadratmeter Membranfläche liefert die Versuchsanlage derzeit eine Leistung von etwa drei Watt. Ab fünf Watt ließe sich aus der Mischung von Salz- und Süßwasser Energie wohl wirtschaftlich gewinnen. Und tatsächlich: Das erste kommerzielle Kraftwerk, so planen die Betreiber, soll 2015 in Betrieb gehen und eine Leistung von 25 Megawatt erbringen. 40 solcher Anlagen könnten bereits ein Kernkraftwerk ersetzen.

Woher stammt aber eigentlich die Energie, die wir hier anzapfen? Wie fast immer nutzen wir letztlich Solarenergie. Die Sonne nämlich lässt Meerwasser verdunsten, das sich – weil das Salz nicht mitabhebt – als Dampf in Süßwasserwolken sammelt. Von dort scheucht es der ebenfalls solargetriebene Wind zum Festland, wo es sich als Regen direkt oder indirekt in die Flüsse ergießt. Im Osmosekraftwerk wird also letztlich ein Teil der Energie zurückgewonnen, die von der Sonne für die Trennung von Salz- und Süßwasser aufgewandt wurde.

Man darf gespannt sein, ob die Energie der platzenden Kirsche uns eines Tages ein klein wenig unabhängiger vom Öl machen wird. <

**Das Grundprinzip zum selbst Ausprobieren: Dringt destilliertes Wasser dank Osmose von unten durch das Zellophan in den Sirup, gewinnt die entstehende Flüssigkeitsmischung Lageenergie.**



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

Er erhielt 2008 den Pohl-Preis der Deutschen Physikalischen Gesellschaft für seine didaktischen Konzepte.

**Norman, R. S.:** Water Salination: A Source of Energy. In: Science 186 (4161), S. 350–352, 25. 10. 1974.

**Loeb, S.:** Osmotic Power Plants. In: Science 189(4203), S. 654–655, 22. 8. 1975.

Weblinks finden Sie unter: [www.spektrum.de/artikel/1035236](http://www.spektrum.de/artikel/1035236)

# STAMMZELLHYPE: MEHR KONTROLLE BITTE!

Der Entwicklungsbiologe Hans Schöler erklärt, wieso Stammzellforscher wieder mehr Biologie studieren sollten, warum Patienten auf neue Therapien noch warten müssen und warum manch ethisches Verbot gerade ethisch recht fragwürdig ist.



Von Bernhard Epping

**I**m Jahr 2004 kehrte der Deutsch-Kanadier Hans R. Schöler aus den USA zurück und wurde Direktor am Max-Planck-Institut für molekulare Biomedizin in Münster. Einer der international besonders prominenten Stammzellforscher avancierte damit auch zum gern genutzten Aushängeschild für hiesige Exzellenzforschung.

Ganz ohne Kratzer ist Schölers Verhältnis zum Standort Deutschland bis heute allerdings nicht geblieben. Es mindere unsere internationalen Kooperationsmöglichkeiten, so der Zellbiologe im Gespräch, und schade unserem Ansehen, wenn Forscher menschliche embryonale Stammzellen (ES-Zellen) hier zu Lande nur importieren, aber nicht zumindest einige wenige Linien selbst neu anlegen dürfen. Zugleich bleibt Schöler ein Mann des Ausgleichs: Der Hype um vermeintliche Sensationen und Therapien ist ihm ebenso zuwider wie methodische Schlampereien seiner eigenen Zunft.

Auch wird ihm eine Charakterisierung allein als Stammzellforscher nicht gerecht. Vielmehr ist sein Leitmotiv die Entwicklungsbiologie, und hier vor allem die Suche danach, wie Organismen jene speziellen Keimzellen »beiseitelegen«, aus denen die nächste Generation entsteht. Dass dies mitgeholfen hat, die Barrieren zwischen Körper und Keimbahn wenigstens im Labor einzureißen, hält er für einen Nebeneffekt: 2003 gelang es Schölers Labor erstmals, bei Mäusen aus ES-Zellen Keimzellen herzustellen. Also schon bald eine neue Option auf leibliche Kinder auch für homosexuelle Paare? Schöler winkt ab: »Auf absehbare Zeit kein funktionierender Ansatz.« Ganz nach seinem Motto: zuerst bitte die Kontrollen!



ALLE FOTOS DES ARTIKELS: WILFRIED GERHARZ

## ZUR PERSON

Der 1953 im kanadischen Toronto geborene **Hans R. Schöler** gilt als einer der international profiliertesten Stammzellexperten. Schöler studierte Biologie an der Universität Heidelberg, forschte dort ab 1982 unter Peter Gruss während seiner Dissertation zur Regulation von Genen, um nach einem zweijährigen Intermezzo in der Industrie erneut bei Gruss, in Göttingen am MPI für biophysikalische Chemie, sein eigentliches Thema zu finden: die Regulation der Embryonal- und Zellentwicklung bei Säugetieren. 1989 gelang Schöler die Erstbeschreibung von Oct4, einer Schlüsselsubstanz, um etwa aus Körperzellen pluripotente Stammzellen zu machen. Ab 1991 leitete Schöler eine Arbeitsgruppe am EMBL, bevor er 1999 an die University of Pennsylvania wechselte. 2004 kehrte er als Direktor des Münsteraner MPI für molekulare Biomedizin nach Deutschland zurück.

**Als Berater von Politik und Öffentlichkeit** stellt Schöler sich seit Jahren auch dem kritischen Diskurs über die ethischen und gesellschaftlichen Fragen von Stammzellforschung. Er ist Mitglied der Zentralen Ethik-Kommission für Stammzellenforschung (ZES). Der Protestant Schöler ist verheiratet und hat zwei Söhne.

## STAMMZELLEGESETZ (STZG)

Es erlaubt seit 2002 den Import von aus überzähligen Embryonen abgeleiteten Stammzelllinien aus dem Ausland. Dabei verschob der Bundestag den Stichtag, zu dem solche Zellen spätestens produziert sein mussten, im Jahr 2008 auf den 01. Mai 2007. Über Anträge zum Import entscheidet das Robert Koch-Institut, das sich auf Stellungnahmen der Zentralen Ethik-Kommission für Stammzellenforschung (ZES) stützt.

**Spektrum der Wissenschaft:** Herr Schöler – dürfen wir das Aufnahmegerät anstellen?

**Professor Hans R. Schöler:** Bitte – wieso nicht?

**Spektrum:** Sie haben auf dem Weltkongress für Genetik im Juli 2008 einen Vortrag abgebrochen, nur weil sich Journalisten im Raum befanden.

**Schöler:** Das ist sehr verkürzt und hat einen anderen, ernstesten Hintergrund: Ich will nicht, dass vorläufige, unpublizierte Daten in die Öffentlichkeit gelangen. Auf einer Tagung zuvor hatte ich über Hinweise auf eine mögliche neue Stammzelle berichtet, die dann als »Mutter aller Stammzellen« in einer großen Tageszeitung Furore machte. Das will ich nicht mehr haben.

**Spektrum:** Dann erzählen Sie doch einfach nichts Ungesichertes mehr ...

**Schöler:** Wir Wissenschaftler brauchen Tagungen, auf denen wir auch unveröffentlichte Dinge berichten. Es geht doch darum, sich kontroverse Dinge um die Ohren zu hauen, um Konzepte und Hypothesen zu prüfen. Und das ist nichts, was in der Öffentlichkeit ausgeschlachtet werden sollte. Dennoch bin ich dafür, dass Journalisten teilnehmen, um

sich ein Gesamtbild zu machen, sie sollten dann aber vorher eine Vertraulichkeitsvereinbarung unterzeichnen. In den USA ist das überrig gängige Praxis.

**Spektrum:** Andererseits ist Hype keine Domäne allein von Journalisten. Gerade auf dem Gebiet der Stammzellen weckt auch die Forschergemeinde immer wieder hohe Erwartungen. In den USA kündigen etwa die Firmen Geron und Advanced Cell Technology klinische Studien mit embryonalen Stammzellen an (ES-Zellen – Kasten S. 36). Motto: Hoffnung bei Querschnittlähmung und Blindheit.

**Schöler:** Das sind Versprechen, die ich nicht will. Ich sehe derzeit gar keinen Anlass für eine klinische Erprobung. Diese Konzepte müssen erst noch besser getestet werden, wahrscheinlich auch im Primatenmodell, zum Beispiel an Rhesusaffen. Daten vom Mausmodell reichen meiner Ansicht nicht; die Maus ist nicht immer ein gutes Modell für den Menschen. Deswegen kann ich auch jene Forscher verstehen, die sagen, wir müssen Grundlagenforschung von vornherein mit menschlichen ES-Zellen machen, anstatt uns lange mit ES-Zellen der Maus zu beschäftigen.

## PLURIPOTENTE STAMMZELLEN

... können noch alle der etwa 220 differenzierten Zelltypen des Säugerorganismus hervorbringen. Sie lassen sich heute in mehreren Varianten generieren:

► **EMBRYONALE STAMMZELLEN (ES-ZELLEN)**

1981 erstmals bei der Maus, 1998 erstmals beim Menschen kultiviert. Beim Menschen sind die Hauptquellen bis heute Embryonen, die bei künstlicher Befruchtung im Labor »überschüssig« sind. Der Somatische Kerntransfer (SCNT) gelingt beim Menschen bis heute nicht standardmäßig: das Reprogrammieren von differenzierten Zellen zu einem Embryo durch Einschleusen des Kerns in eine Eizelle, deren Erbgut entfernt wurde.

► **INDUZIERTER PLURIPOTENTE STAMMZELLEN (IPS-ZELLEN)**

2006 gelingt es den Japanern Shinya Yamanaka und Kazutoshi Takahashi mit den vier Eiweißen Oct4, Sox2, c-Myc und Klf4, differenzierte Körperzellen der Maus in pluripotente Stammzellen zu verwandeln. Yamanaka schleust zunächst die Gene dieser Transkriptionsfaktoren in Zellen ein. Heute ist es möglich, den Prozess allein durch Zugabe der chemisch stabilisierten Proteine zu starten.

► **REPROGRAMMIERTE KEIMBAHN-STAMMZELLEN (GPS – FÜR GERMLINE-DERIVED PLURIPOTENT STEM CELLS)**

sind Stammzellen aus den Hoden, die sich unter speziellen Kulturbedingungen zu pluripotenten Stammzellen reprogrammieren lassen.

**Spektrum:** Bevor wir in das nächste Reizthema abtauchen, ein Blick auf Ihren Lebensweg. Sie sind Westfale und doch in Toronto geboren – 1953. Wie kam das?

**Schöler:** Meine Mutter war – bevor sie heiratete – zum Protestantismus konvertiert, um die gleiche Konfession zu haben wie mein Vater. Und damit bekam sie heftige Probleme. In Delbrück, wo sie aufgewachsen ist, wurde ihr klargemacht, dass sie nach ihrem Tod nicht in heiliger Erde begraben wird. Meine Eltern haben dann 1950 gesagt – das ist uns

zu kompliziert hier, wir wandern nach Kanada aus.

**Spektrum:** Einfach ins Blaue hinein?

**Schöler:** Ja, absolut. Meine Eltern hatten kaum Geld, mein Vater begann in Toronto neu als Kaufmann. Was mich noch heute mit Freude erfüllt, ist, dass wir in eine jüdische Straße zogen und dort sehr herzlich aufgenommen wurden. Und das so kurz nach dem Krieg. Wir sind dann 1960 zurück nach Deutschland, aber der Kontakt ist bis heute nicht abgerissen. Ein Teil von mir ist immer noch kanadisch. Ich freue mich zum Beispiel ganz besonders, wenn die Kanadier im Eishockey gewinnen.

**Spektrum:** Wie kamen Sie zur Biologie?

**Schöler:** Ich hatte schon immer eine große Leidenschaft für Insekten. Meine Mutter erzählt noch heute, ihr wären die Augen rausgefallen, wenn ich mal wieder die Hand aus der Hosentasche holte und irgendwelche Hummeln drin hatte – lebendige wohlgerukt. Fasziniert war ich auch von Karl von Frisch. Kennen Sie sein Buch »Zehn kleine Hausgenossen«?

**Spektrum:** Wir müssen passen.

**Schöler:** Ein ganz wunderbares kleines Buch über den Floh, die Laus, die Stubenfliege und so weiter. Auch sein »Aus dem Leben der Bienen« habe ich verschlungen. Mir war früh klar, dass ich Biologie studieren wollte.

**Spektrum:** Stichwort »Jahr der Biodiversität«: Ist der Verlust an biologischer Vielfalt für Sie ein Thema?

**Schöler:** Ich weiß um die Problematik. Aber das ist kein Bereich, in dem ich mich engagiere. Wie Sie wissen, mache ich das auf anderen Gebieten.

**Spektrum:** Wann wollten Sie Stammzellforscher werden?

**Schöler:** Zunächst gar nicht. Mein wissenschaftlicher Werdegang startete bei Peter Gruss.

**Spektrum:** ... dem heutigen Präsidenten der Max-Planck-Gesellschaft.

**Schöler:** Er kam 1982 aus den USA nach Heidelberg zurück. Ich wurde sein erster Doktorand – zunächst in einem ganz kleinen Labor.

**Spektrum:** Wir haben gelesen, es ging um regulatorische DNA-Abschnitte, Enhancer (Verstärker, Info S. 38) ...

**Schöler:** Ja – und wie die funktionieren, war damals noch unklar. Ich konnte Hinweise darauf finden, dass für die Regulation von Genen über solche Enhancer auch Proteine wichtig waren – Transkriptionsfaktoren, die an Enhancer binden.

**Spektrum:** Hatten Sie Vorbilder in der Wissenschaft?

**Schöler:** Peter Gruss hat mich in der wissen-



schafflichen Denkweise sicherlich geprägt. Von ihm habe ich beispielsweise gelernt, dass das Wichtigste am Experiment die Kontrollen sind.

**Spektrum:** Das Handwerk also ...

**Schöler:** Nein, das ist kein Handwerk, sondern wissenschaftliches Denken an sich. Oftmals werden reine Befunde publiziert. Doch die Stärke eines Befunds ist häufig nicht dieser allein, sondern es sind die Kontrollen dazu.

**Spektrum:** Und wenn die fehlen, stellt die Forscherszene später überrascht fest, dass ein Artikel ein Artefakt beinhaltet.

**Schöler:** So ist es.

**Spektrum:** Sind Sie heute kritischer wegen des Skandals um den Koreaner Woo-suk Hwang, bei dem Ende 2005 aufflog, dass die Daten zu seinen ES-Zellen aus vermeintlich geklonten menschlichen Embryonen gefälscht waren?

**Schöler:** Da wurde ich genauso geblendet wie viele andere. Ich hielt seine Daten für korrekt. Es bleibt aber furchtbar schwer, solche Dinge im Vorfeld zu erkennen. Insbesondere dann, wenn man die Versuche nicht wiederholen kann. Er hatte ja zuvor gezeigt, dass er Tiere klonen kann, und da habe ich gedacht, dass ihm das mit den vielen hundert Eizellen von Frauen auch gelungen ist.

**Spektrum:** Bis heute ist der somatische Kerntransfer beim Menschen nicht endgültig gelungen. Würden Sie es versuchen, wenn es hier zu Lande erlaubt wäre?

**Schöler:** Nein! Vor allem fände ich es ethisch höchst problematisch, die nötige Zahl an Eizellen von Frauen zu gewinnen. Aber man könnte Techniken bei anderen Primaten weiterentwickeln, die zwar Eizellen verwenden, aber keinen Embryo im engeren Sinn erzeugen. Wir arbeiten dafür mit US-Kollegen aus Oregon an einem Projekt, das von den National Institutes of Health gefördert wird. Dieses Projekt wurde übrigens selbst von dem sehr kritischen Bioethikbeirat des ehemaligen US-Präsidenten Bush begrüßt. Vielleicht können wir eines Tages menschliche Eizellen aus der Kulturschale dafür einsetzen.

**Spektrum:** Im Jahr 1986, nach Ihrer Dissertation, sind Sie zunächst in die Industrie gegangen – zu damals Boehringer Mannheim, heute Roche, in Penzberg. Zwei Jahre später waren Sie schon wieder weg. Warum?

**Schöler:** Mir fehlte schlicht die Wissenschaft. Wieder war es Peter Gruss, der mir den Weg in die Forschung ermöglichte. Einmal, auf dem Weg nach Dänemark, habe ich ihn in Göttingen besucht, wo er bereits Max-Planck-Direktor war. Er bot an, mich bei ihm mit den *Hox*-Genen (Kasten S. 39 unten) zu beschäftigen. Das hörte sich interessant an.



**Spektrum:** Das ist eine Familie von Genen, die während der frühen Embryonalentwicklung steuert, wie der Körper sich in Segmenten aufbaut.

**Schöler:** Genau. Um das zu erklären, muss ich jetzt leider etwas fachlich werden. Just vor einem dieser *Hox*-Gene fiel mir eine bereits bekannte Sequenz auf, das so genannte Octamer-Motiv. Damals kannte man zwei Oct-Proteine, die an diesen DNA-Abschnitt binden können, Oct1 und Oct2. 1988 hatten dann US-Forscher beschrieben, dass Oct2 eine bekannte DNA-Bindedomäne besitzt, die so genannte Homeodomäne (Kasten S. 39 unten). Das war eine ganz spannende Nachricht für mich, denn diese Domäne wiederum findet man in jedem Mitglied der großen *Hox*-Genfamilie.

**Spektrum:** Ja und?

**Schöler:** Ich zählte eins und eins zusammen und dachte: Wenn Oct2 ebenfalls so eine Homeodomäne hat, hat sie Oct1 vielleicht auch, und dann gibt es sicher noch mehr dieser Burschen. Ich habe daraufhin in einer Vielzahl von Zellen und Geweben von Embryonen, Föten und erwachsenen Mäusen nach ihnen gesucht und konnte noch acht weitere identifizieren.

**Spektrum:** Besonders wichtig wurde das so genannte Oct4.

**Schöler:** Ja. Manche Oct-Proteine steuern noch vor den *Hox*-Genen die frühe Embryonalentwicklung. Oct4 ist das wichtigste davon, 1989 hatten wir es publiziert.

## »Das Wichtigste an einem Experiment sind die Kontrollen«

### INFO

**ADULTE STAMMZELLEN** (AS-Zellen) im Gewebe auch ausgewachsener Organismen sind noch multipotent – aus ihnen können bestimmte Linien differenzierter Zellen hervorgehen. Ein Beispiel sind hämatopoetische Stammzellen, die bereits seit Jahrzehnten im klinischen Einsatz sind. Die Grenzen der Multipotenz sind seit Kurzem aber nicht mehr absolut gültig (siehe Transdifferenzierung, S. 39 unten).

**BLASTOZyste** Embryonalstadium, beim Menschen etwa drei bis vier Tage nach der Befruchtung. Ungefähr am sechsten Tag nistet sich die Blastozyste ein.

»» FORTSETZUNG AUF S. 38



## »Die positive Einstellung in den USA verleiht einem Flügel«

>>> FORTSETZUNG VON S. 37

zyste in die Gebärmutter ein. Aus der inneren Zellmasse geht der spätere Organismus hervor, daraus lässt sich aber auch eine Kultur von ES-Zellen anlegen.

### EMBRYONENSCHUTZGESETZ (ESCHG)

seit 1991 in Kraft, untersagt in Deutschland, menschliche Embryonen für Forschungszwecke zu zerstören

### ENHANCER

DNA-Abschnitt neben einem Gen, der dessen Aktivität mitkontrolliert. Agiert oft zusammen mit Proteinen (Transkriptionsfaktoren), die hier andocken

### EPIGENETIK

Gesamtheit der Programme, die den genetischen Kode

**Spektrum:** Das war zugleich Ihr Einstieg in die Stammzellforschung?

**Schöler:** Ja. Ich sehe mich ja als Entwicklungsbiologen. Damals wie heute interessiert mich vor allem die Frage, was eine Generation mit der nächsten verbindet. Was unterscheidet unseren Körper von jenen Zellen, die die Erbinformation an die nächste Generation weitergeben – der Keimbahn?

**Spektrum:** Haben auch wir Oct4 im Körper?

**Schöler:** Das Gen ist in allen Zellen vorhanden, aber nur in Keimbahnstammzellen aktiv. Sie haben Oct4 als aktives Protein in Ihren Hoden. In speziellen Stammzellen, aus denen die Spermien hervorgehen.

**Spektrum:** Und Frauen?

**Schöler:** Frauen bilden Oct4 in Oozyten und haben es auch noch in den reifen Eizellen.

**Spektrum:** Was macht das Oct4 nun?

**Schöler:** Es sorgt dafür, dass Zellen im frühen Embryo pluripotent werden, also dass sie den Alleskönner-Zustand erreichen. Nach der Befruchtung wird zunächst jenes Oct4, das noch die Eizelle enthielt, abgebaut. Dann aber wird im Vierzellstadium das Genom wieder angeschaltet sowie das Oct4-Gen erneut abgelesen. Dieses Oct4 verhilft dem Embryo zur Fähigkeit, die mehr als 200 Zelltypen zu generieren, aus denen unser Körper besteht. Darum ist es so wichtig. Mit der Gastrulation (Info rechts oben), wenn der Organismus sich also schon ausdifferenziert, wird das Oct4 wieder abgeschaltet. Nur in den Vorläuferzellen von Eizellen und Spermien ist es dann noch aktiv.

**Spektrum:** Was indirekt letztes Jahr auch Ihrer Gruppe ermöglichte, aus den Hoden von Mäusemännchen eine weitere Variante pluripotenter Stammzellen im Labor zu entwickeln –

die reprogrammierten Keimbahn-Stammzellen (Kasten S. 36). Ist das die »Mutter aller Stammzellen«, die Sie eingangs erwähnten?

**Schöler:** Ja, aber das ist ganz und gar nicht meine Formulierung. Ich nenne sie lieber Stammzellen der Keimbahn oder Keimbahn-Stammzellen. Von »Mutter aller Stammzellen« bei männlichen Stammzellen zu sprechen, passt ja schon semantisch gar nicht.

**Spektrum:** 1994 haben Sie sich an der Universität Heidelberg habilitiert.

**Schöler:** Oh ja, das war eine etwas unrühmliche Geschichte. Die biologische Fakultät hatte damals Externe wie mich – ich war damals Gruppenleiter am European Molecular Biology Laboratory (EMBL) – bei der Zulassung zum Habilitationsverfahren gleich reihenweise durchfallen lassen. Und mich dann eben auch ... Wissen Sie, ich besaß zudem die Frechheit, auf meine Vortragsfolien unten klein zu schreiben: »Habilitation Schöler«. Das führte wohl zu Irritationen: »Woher weiß der das denn, das ist doch hier erst das Verfahren ...«, bekam ich zu hören. Beim zweiten Anlauf erkannte man mir dann die Habilitation an. Aber das ist wirklich Schnee von gestern, und das heutige Verhältnis zwischen EMBL und Universität ist, nach allem, was ich höre und selbst denke, exzellent.

**Spektrum:** War das mit ein Grund dafür, dass Sie 1999 Deutschland den Rücken kehrten?

**Schöler:** Nein, bestimmt nicht! Der Kontakt in die USA war purer Zufall. Ich sollte zu einem Kandidaten für eine Professur an einer amerikanischen Universität meine Meinung sagen. In dem Gespräch stellte ich fest, dass der Kandidat sicherlich großes Interesse haben müsste. Das war auch eine tolle Stelle, die sie zu besetzen hatten. Die würde ich selbst auch nehmen, hatte ich ihnen gesagt. Das machte dort offenbar die Runde. Und stellen Sie sich vor, auf einmal bekam ich gleich mehrere Angebote, wurde mir quasi der rote Teppich ausgerollt. In Philadelphia wollten mich zugleich die medizinische als auch die tierärztliche Fakultät für sich gewinnen. Schon bei den Vorstellungsgesprächen dort kannte jeder alle Details meiner Arbeit; sie hatten sich wirklich vorbereitet und waren interessiert. Das war zweifellos eine ganz andere Erfahrung, als ich sie in Deutschland gemacht hatte. Diese positive Grundeinstellung in den USA, die verleiht einem Flügel.

**Spektrum:** Drüben ist alles besser?

**Schöler:** Nein, nicht alles. Aber für Wissenschaftler gilt das vielfach schon. In den USA besteht ein gewisser Vertrauensvorschuss gegenüber Wissenschaftlern. Aber wehe, wenn man das Vertrauen missbraucht. In Deutschland ist man eher misstrauisch, und man muss

sich Vertrauen recht hart erarbeiten. Dabei ist ein Wissenschaftler auch nur ein Mensch, der im Einklang mit der Gesellschaft leben möchte. Selbst wenn Wissenschaftler manchmal etwas entrückt zu sein scheinen, ab und zu brauchen auch sie ihre Streicheleinheiten.

**Spektrum:** Sind Sie denn heute mit den Forschungsmöglichkeiten hier zu Lande zufrieden?

**Schöler:** Nicht ganz, ich halte die gesetzlichen Rahmenbedingungen, die wir hier mit dem Stammzellgesetz (Kasten S. 35 unten) geschaffen haben, eher für zu eng.

**Spektrum:** Es ermöglicht doch den Import von ES-Zelllinien aus dem Ausland ...

**Schöler:** Ja, aber diese Regelung ist problematisch. Die pragmatische Sicht ist, dass wir mit den Zelllinien gut forschen können, somit sind wir in dieser Hinsicht eigentlich nicht mehr im Nachteil gegenüber unseren Kollegen im Ausland. Was mir dennoch zu schaffen macht: Viele Forscher im Ausland halten uns Deutsche für heuchlerisch. Denn wir lassen auf diese Weise andere für uns, so ihre Sichtweise, die Drecksarbeit machen.

**Spektrum:** Ist es ein Wunder, dass gerade Deutschland ein halbes Jahrhundert nach den Nazis besondere Skrupel im Umgang mit dem Leben hat?

**Schöler:** Nein, überraschend ist das nicht. Andererseits hat mir etwa der israelische Ethiker Asa Kasher zu diesem Thema erklärt: Was immer ihr entscheidet zu tun oder nicht zu tun, benutzt bloß nicht uns Juden als Entschuldigung dafür. Ich bleibe dabei – es wäre gut, wenn Forscher in Deutschland menschliche ES-Zellen gewinnen dürften. Einige wenige, und dies natürlich unter strikten Auflagen.

**Spektrum:** Ist diese Forschung überhaupt noch nötig? Dem Japaner Shinya Yamanaka ist es ja 2006 gelungen, differenzierte Körperzellen direkt in pluripotente Stammzellen zu verwandeln: die berühmten iPS-Zellen (induzierte pluripotente Stammzellen, Kasten S. 36).

**Schöler:** Richtig, aber die Forschung an ES-Zellen ersetzen können iPS bisher nicht. Der momentane wissenschaftliche Stand ist, dass iPS schlechter für Therapien geeignet sind als ES-Zellen. Die wichtigste Frage ist, ob sie sich dennoch eignen würden oder ob man sie noch besser machen kann. Wir brauchen eben beide Zelltypen, um zu wissen, wann die reprogrammierten Zellen für Untersuchungen in der Kulturschale und wann für die Transplantation gut genug sind.

**Spektrum:** Welches Verhältnis haben Sie zu Yamanaka?

**Schöler:** Wir sind gute Kollegen.

**Spektrum:** Warum haben Sie seinen Ansatz nicht auch versucht? Schließlich war vor allem

auch Oct4 der Schlüssel zum Erfolg von Yamanakas Rezeptur.

**Schöler:** Auch wir hatten dazu einige Experimente gemacht. Aber es ist zu großen Teilen sein Verdienst, den richtigen Cocktail gefunden zu haben, um Fibroblasten zu reprogrammieren.

**Spektrum:** Sie gehören jedoch zu einer Gruppe, der wenig später als erster eine wesentlich verbesserte Methode gelang.

**Schöler:** Yamanakas Arbeit fußte zunächst auf Gentechnik, er schleuste die Gene für die Transkriptionsfaktoren mit viralen Vektoren in die Zellen. Heute können wir durch Zugabe der Proteine in der Kulturschale die Reprogrammierung anstoßen. Mittlerweile tüfteln viele Gruppen schon daran, allein mit Chemikalien den Prozess in Gang zu setzen. Der Effekt ist am Ende immer der gleiche: Es reicht, Oct4 und zwei, drei weitere Faktoren in den Zellen zu aktivieren. Der Rest läuft selbstständig ab.

**Spektrum:** Klingt wie ein schlichtes Kochrezept.

**Schöler:** Ja, es ist auch relativ simpel. Wenn Sie etwa adulte Stammzellen (siehe Info S. 37) des Gehirns als Vorläufer von Nervenzellen nehmen, reicht sogar Oct4 allein, um iPS-Zellen zu gewinnen.

**Spektrum:** Wir hoffen, Sie haben ein Patent auf Oct4.

**Schöler:** (*lacht*) Ich hätte es haben können, aber ich habe es nicht. Erst in den USA begann ich, Patente anzumelden. Da ist das ganz selbstverständlich.

**Spektrum:** Die Biologie kann heute mit wenigen Faktoren das gesamte Programm der körperlichen Entwicklung zurückdrehen. Vor 50 Jahren war das völlig undenkbar.

**Schöler:** Auch vor zehn Jahren noch.

**Spektrum:** Ihre Gruppe hat gleich noch eine Mauer eingerissen, die als unüberwindlich galt. Der Schöler-Gruppe in Philadelphia ge-

der Erbsubstanz DNA steuern. Zahlreiche molekulare Spieler: Transkriptionsfaktoren, Verpackungsproteine (Histone), RNA-Moleküle – und chemische Modifikationen durch Methylgruppen

**GASTRULATION**

Embryonalstadium, beim Menschen 13 Tage nach Befruchtung, in dem sich die Keimblätter voneinander trennen

**KEIMBLÄTTER**

drei Zellschichten, aus denen jeweils nur noch einige festgelegte Zell- und Gewebetypen des Organismus entstehen. Das (äußere) Ektoderm bildet etwa Haut und Nervenzellen, das (mittlere) Mesoderm Knochen oder Knorpel, das (innere) Entoderm Darm und Leber.

**WISSENSWERT**

Zwei während der Embryonalentwicklung wichtige Faktoren sind die

- **HOX-TRANSKRIPTIONSFAKTOREN:** Sie sorgen für den Aufbau eines Organismus aus verschiedenen Körperabschnitten, den Segmenten. Charakteristisch ist die Homeodomäne, mit der die Proteine an Zielstrukturen auf der DNA andocken.
- **POU-FAKTOREN:** Einige Mitglieder regulieren die *Hox*-Gene. Bei Säugetieren ist das Protein Oct4 Alleskönner, der dafür sorgt, dass Zellen eines neuen Embryos nach der Befruchtung pluripotent werden.

**TRANSDIFFERENZIERUNG:** die direkte Umprogrammierung differenzierter Körperzellen in einen anderen Zelltyp ohne den Durchgang durch ein Stammzellstadium

**TRANSKRIPTIONSFAKTOR:** Protein, das durch Andocken an der DNA, etwa an Enhancern, das Ablesen von Genen mitsteuert



**Bernhard Epping** ist promovierter Biologe und Wissenschaftsjournalist in Tübingen. Die Fragen stellten er und Reinhard Breuer, Chefredakteur von »Spektrum der Wissenschaft«.

**Heinemann, T., Kerste, J.:** Stammzellforschung: Naturwissenschaftliche, rechtliche und ethische Aspekte. Karl Alber, Freiburg 2007.

**Kempermann, G.:** Neue Zellen braucht der Mensch – Die Stammzellforschung und die Revolution der Medizin. Piper, München 2008.

**Strauer, B.-E. et al. (Hg.):** Adulte Stammzellen. Düsseldorf University Press, Düsseldorf 2009.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/1034790](http://www.spektrum.de/artikel/1034790).

lang es 2003, aus ES-Zellen Eizellen herzustellen. Bis dahin ebenfalls ein Ding der Unmöglichkeit.

**Schöler:** Auch männliche Keimzellen lassen sich so – bei Mäusen – in der Laborschale gewinnen. Sie können alternativ heute genauso eine Hautzelle zur iPS-Zelle umwandeln und aus ihr Gameten (Keimzellen) gewinnen.

**Spektrum:** Die iPS-Zellen gelten als ethisch unbedenkliche Alternative zu den ES-Zellen, da hier zur Produktion keine Embryonen zerstört werden müssen. Aber jetzt eröffnen sie offenbar eine ganz neue Richtung der Reproduktionsmedizin: Man mache aus einer Hautzelle eine Ei- oder Samenzelle!

**Schöler:** Da bin ich sehr skeptisch. Es ist bislang nur einer Gruppe gelungen, aus ES-Zellen von Mäusen Spermien zu machen, die tatsächlich für eine Befruchtung taugen. Und bei Gameten aus iPS-Zellen hat noch gar keiner gezeigt, dass sie auch funktionsfähig sind.

**Spektrum:** Da gilt aber vermutlich eher ein »noch nicht«?

**Schöler:** Dennoch wäre das kein tauglicher Ansatz. Wenn Sie aus Körperzellen Gameten machen, ist die DNA dieser Zellen auf Grund von Alterungsprozessen stark mutiert und daher nicht zu gebrauchen. Unser Körper ist dazu geschaffen, Erbinformationen via Keimbahn an die nächste Generation weiterzureichen. Danach sind wir im Prinzip für die Reproduktion überflüssig. Unsere Körperzellen taugen nicht für Nachwuchs. Das ist eben das Vorrecht der Keimbahn.

**Spektrum:** Dann wäre aber auch ein via iPS-Zellen produzierter Zellersatz eigentlich nicht zu gebrauchen?

**Schöler:** Für einen Patienten, der ja ebenfalls schon gealtert ist, könnte die vielleicht mäßige DNA-Qualität solcher Zellen noch ausreichen. Aber die vermutlich beste Quelle für iPS-Zellen sind möglicherweise Stammzellen aus Nabelschnurblut, die noch kaum Alterungsprozessen unterlagen.

**Spektrum:** Also doch! Wäre es dann mit Stammzellen aus Nabelschnurblut möglich, knackig jugendliche iPS-Zellen zu züchten und daraus Gameten zu generieren, die für Nachwuchs taugen?

**Schöler:** Das halte ich technisch zwar nicht für unmöglich, doch müssen Sie bedenken, dass diese Zellen außerhalb der Gonaden keiner Qualitätskontrolle mehr unterliegen. Alles in allem bleibe ich sehr skeptisch.

**Spektrum:** Was rät der Politikberater Hans Schöler der Gesellschaft – sollte sie diese Möglichkeit nutzen?

**Schöler:** Nein, sie sollte solch einen Einsatz von menschlichen iPS-Zellen verbieten. Auf diesem Weg Gameten zum Ziel der Fortpflan-

zung zu gewinnen und menschliche Embryonen für die Reproduktionsmedizin zu schaffen, lehne ich entschieden ab. Davon abgesehen gibt es diesbezüglich ohnehin gesetzliche Regelungen.

**Spektrum:** Es gibt mittlerweile auch die Möglichkeit der Transdifferenzierung (siehe Kasten S. 39). Motto: Man nehme eine Hautzelle und wandle sie ohne den Umweg über eine Stammzelle in eine neuronale Vorläuferzelle um.

**Schöler:** Ja, das gibt es, aber es ist fraglich, ob das zu funktionsfähigen Zellen führen wird. Wenn Sie im Labor eine Hautzelle direkt in eine Nervenzelle umwandeln, könnte es sein, dass diese induzierten Nervenzellen eine Erinnerung, ein epigenetisches Gedächtnis an den vorherigen Zustand der Hautzelle behalten; und das könnte Probleme bereiten. Beim Weg über eine ES- oder iPS-Zelle wird hingegen quasi Tabula rasa gemacht. Und selbst das scheint nicht perfekt zu klappen, wie neuere Arbeiten zeigen.

**Spektrum:** Welchen Zeithorizont sehen Sie bis zu einer klinischen Erprobung neuer Zelltherapien?

**Schöler:** Ich mache diesbezüglich grundsätzlich keine Prognosen. Bis dahin brauchen wir auf alle Fälle erst noch mehr entwicklungsbiologische Untersuchungen.

**Spektrum:** Wie das?

**Schöler:** Es wird nicht gelingen, aus einer ES-Zelle eine Nervenzelle einsam in einer Laborkultur zu generieren, so wie das viele Leute heute probieren. Denn bei der normalen Entwicklung eines Organismus unterhalten sich die Zellen ständig, und erst dadurch wird ihre unterschiedliche Funktionalität definiert. Wir müssten für echte Nervenzellen erst die Entstehung dreidimensionaler Gewebe verstehen.

**Spektrum:** Im Jahr 2004 kamen Sie zurück nach Deutschland, nach Münster. Warum eigentlich?

**Schöler:** Das Angebot der MPG war einfach zu verlockend. Auch für meine Frau hat sich dadurch die Situation verbessert. Bevor wir in die USA gingen, war sie als Juristin tätig. In den USA konnte sie zwar studieren, aber trotz ihres sehr guten Abschlusses nach dem 11. September 2001 keinen Job in den USA bekommen. Während der Zeit wurden Leute eher entlassen als neu eingestellt. Sie wollte weg – zumal wir auf dem platten Land wohnten.

**Spektrum:** Platt ist es um Münster herum doch auch.

**Schöler:** Ja, aber Münster ist eine lebendige und spannende Stadt, und platt bedeutet hier, dass wir prima Fahrrad fahren können. Wir leben sehr gerne in Münster. <



# Warum unser Gehirn zwei Seiten hat

Komplexe Aufgaben ungleich auf beide Hemisphären des Gehirns zu verteilen, ist keine biologische Neuerung beim Menschen. Schon Fische besitzen Seitenpräferenzen – ein Zeichen für frühe Wurzeln unserer Rechts-links-Asymmetrie.

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

## In Kürze

- ▶ Schon vor 500 Millionen Jahren besaßen Wirbeltiere vermutlich ein Endhirn mit **seitenspezifisch spezialisierten Hemisphären**.
- ▶ Anfangs befasste sich **die linke Hemisphäre** anscheinend mit der Steuerung von häufigem, routinemäßigem Alltagsverhalten. **Die rechte Seite** war für unerwartete Geschehnisse zuständig.
- ▶ **Rechtshändigkeit und Sprache**, beides unter Zuständigkeit der linken Hemisphäre, könnten aus der Steuerung in Standard-situationen hervorgegangen sein.
- ▶ **Gesichtserkennen und räumliche Kompetenz**, Spezialisierungen der rechten Hirnseite, entstammen möglicherweise der Notwendigkeit, Raubtiere schnell zu entdecken.

Von Peter F. MacNeilage,  
Lesley J. Rogers und Giorgio Vallortigara

**B**ei den meisten Menschen sitzt das Sprachvermögen links im Gehirn, genauer in der linken Großhirnhemisphäre. Auch die in allen Bevölkerungen stark dominierende Rechtshändigkeit rührt von der linken Hirnseite her. Bei anderen Leistungen dominiert die rechte Hemisphäre, zum Beispiel bei der Orientierung im Raum. Wie die Sprache hielten Wissenschaftler noch vor 40 Jahren auch die Dominanz der rechten Hand für ein genuin menschliches Phänomen. Sie glaubten sogar, eine Seitenspezialisierung des Gehirns trete nur beim Menschen auf. Den Tieren trauten sie dergleichen nicht zu.

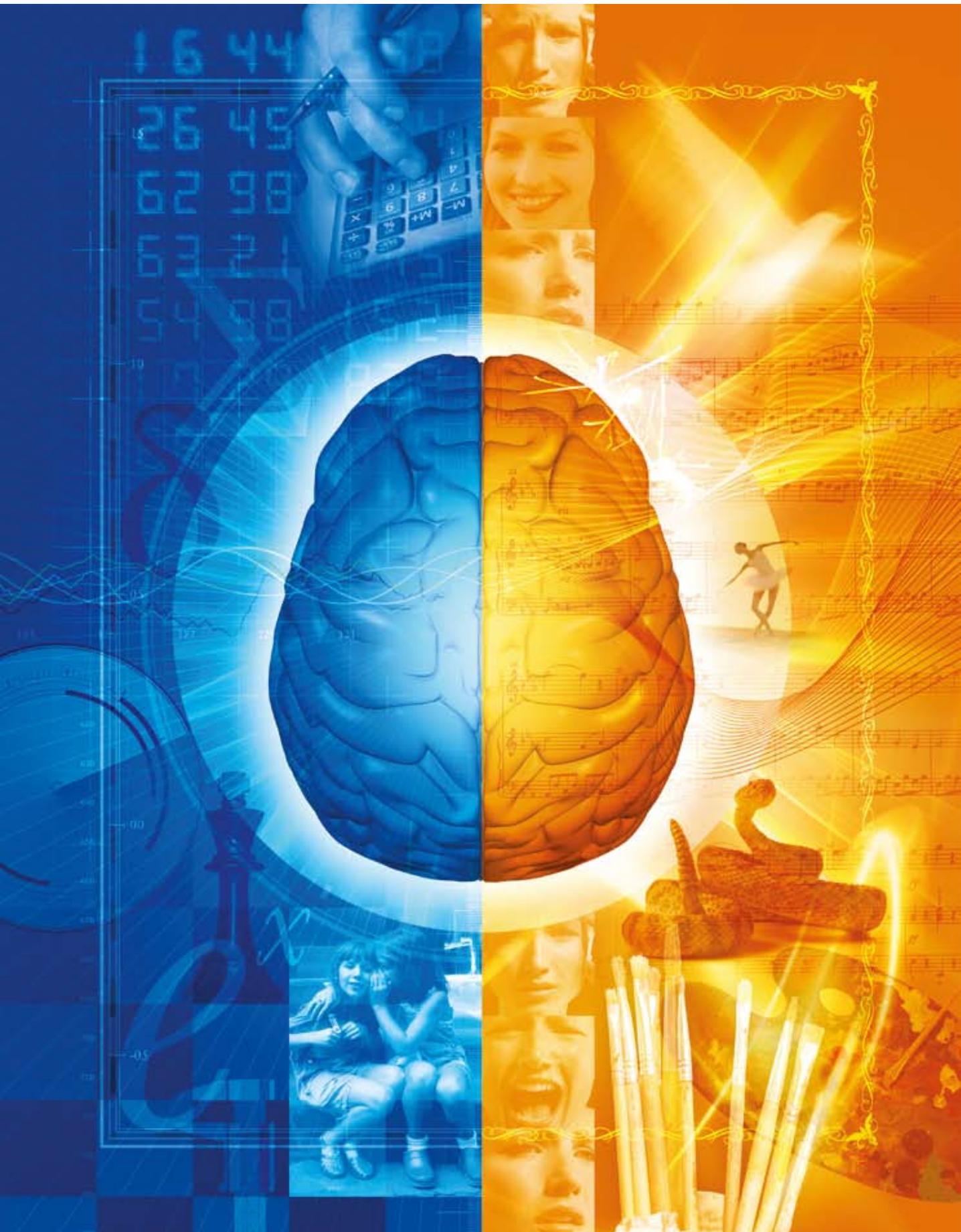
Die Asymmetrie oder so genannte Lateralisierung der beiden Großhirnhälften galt nachgerade als ein Zeichen unseres besonderen Evolutionsstatus. Frühere Biologen und Verhaltensforscher meinten denn auch, die Rechtshändigkeit sei vor rund 2,5 Millionen Jahren mit dem Werkzeuggebrauch entstanden. Die Sprachfähigkeit wäre quasi im Gefolge davon aufgetreten. Nach einem der Szenarien entwickelten die Menschen mit der bevorzugt benutzten rechten Hand zunächst eine Zeichensprache, die somit in der linken Hirnseite ver-

ankert war. Später wurde daraus eine Lautsprache. Einer anderen Idee zufolge erweiterte die linke Hemisphäre ihren Einflussbereich: Hatte sie zunächst beim Gebrauch der Hände überwogen, so dehnte sie ihre Dominanz nun auf den Stimmapparat aus. Die ein bisschen vernachlässigte rechte Hirnhälfte übernahm in diesen Modellen gewissermaßen, was übrig blieb: etwa das Zurechtfinden im Raum.

Ganz im Gegensatz zu dieser Vorstellung erkannten Forscher in den letzten Jahrzehnten auch bei zahlreichen Tieren Aufgabenteilungen der beiden Hemisphären. Für viele unserer Kollegen ändert das allerdings bis heute am gezeichneten Bild nichts. Nach ihrer Ansicht entstand die Seitenspezialisierung beim Menschen eigenständig mit der Evolution unserer Gattung. Mit den Erscheinungen bei Tieren hat das Phänomen ihres Erachtens nichts zu tun.

Wir vertreten einen völlig anderen Standpunkt, der besonders unter Biologen immer

**Die beiden Hälften des Großhirns teilen sich die Aufgaben – und damit die Zuständigkeit für einzelne Funktionen vom Sprachverständnis bis hin zur Verarbeitung von Gefühlen.**



FOTOILLUSTRATION: TWIST CREATIVE; VERWENDETE MOTIVE: CORBIS / MEDICALRE.COM (GEHIRN); GETTY IMAGES / MEDIOIMAGES (TASCHENRECHNER); CORBIS / JORG STEFFENS (GESICHTER); CORBIS / WESTENSKI (LÄCHENDE FRAU); GETTY IMAGES / DOUGAL WATERS (BALLERINA); GETTY IMAGES / MIKE KEMP (KLAPPERSCHLANGE); GETTY IMAGES / C SQUARED STUDIOS (MALERPALETTE); GETTY IMAGES / VLADIMIR GONNIK (PINSEL); CORBIS / CARRIE BORETZ (TUSCHELNDEN MÄDCHEN)

mehr Anhänger findet und den eine Menge Daten stützen. Wir sind davon überzeugt, dass schon die Hirnhemisphären der frühen Wirbeltiere vor 500 Millionen Jahren unterschiedlich spezialisiert waren. Genauer gesagt wiesen die damaligen Gehirne bereits die Grundform der Lateralisierung auf, welche die Evolutionsprozesse dann veränderten und abwandeln, bis hin zur Situation beim Menschen. Nach unserer Ansicht benutzten frühe Wirbeltiere die linke Hemisphäre dazu, in alltäglichen, vertrauten Situationen die normalen, gängigen Verhaltensabläufe zu steuern. Die rechte Hemisphäre, Hauptsitz von emotionalen Erregungszuständen, hatte dagegen die Aufgabe, plötzliche, unerwartete Umgebungsreize wahrzunehmen und darauf zu reagieren.

Wahrscheinlich begann die Arbeitsteilung damit, dass eine der Hirnhälften, welche auch immer, allmählich in gewissen Situationen zu einer leichten Vorherrschaft neigte. Jener kleinen Abweichung mag später eine klarere Verteilung der Aufgabenschwerpunkte entspringen sein. Dadurch, so stellen wir uns vor, gewann die rechte Seite schließlich die Führung, wenn Gefahren auftauchten, ob konkret oder eingebildet – und zwar immer wenn es galt, ganz rasch auf das bedrohliche Geschehen zu reagieren, etwa auf ein Raubtier. In den übrigen Lebenslagen übernahm die linke Hemisphäre die Oberkontrolle. Sie wurde somit zum Sitz für Verhalten aus eigenem Antrieb, aus selbst generierter Motivation – immer dann, wenn das Gehirn, und nicht die Außenwelt, von innen heraus das Geschehen bestimmt. (Hierunter fällt keineswegs nur angeborenes Verhalten – vieles davon ist erlernt.) Die rechte Hirnseite gewann für die umgekehrte Richtung die Oberhand, wenn die Außenwelt Reaktionen einforderte. Sie steuerte, was von außen nach innen lief. Aus den unterschiedlichen Zuständigkeiten entwickelten sich später spezielle seitenspezifische Kompetenzen, so links die für Sprache oder Werkzeugherstellung, rechts für Raumerfassen oder Gesichtserkennung.

Die meisten Indizien für solch einen Zusammenhang lieferten nicht etwa Hirnstudien, sondern Verhaltensbeobachtungen an Tieren. Wie bei uns kreuzen bei ihnen viele der Nervenbahnen zur Gegenseite, so dass die linke Hemisphäre hauptsächlich für die rechte Körperseite zuständig ist und umgekehrt. Das gilt für Wahrnehmungen ebenso wie für Bewegungsbefehle, was sich im Verhalten äußern kann.

Für die Spezialisierung der linken Hemisphäre auf Routinetätigkeiten und auf Verhalten aus eigenem Antrieb spricht etwa das Fressen. Bei den meisten Wirbeltierarten ist die Mehrheit der Tiere rechtslastig. Fische oder Kröten schnappen sich Beute oft nur dann,

wenn sie diese vor dem rechten Auge sehen (siehe Kasten S. 46). Bei vielen Vögeln – Hühnern, Tauben, Wachteln und Stelzenläufern – übernimmt in der Regel das rechte Auge beim Futterpicken oder Beutemachen die Führung. Der Schiefschnabel, ein Regenpfeifer in Neuseeland, hat zu dem Zweck sogar einen leicht nach rechts gebogenen Schnabel.

**Uraltes Erbe?**

**Fressen lieber auf der rechten Seite**

Unter den Säugetieren bietet der Buckelwal ein eindrucksvolles Beispiel für die überwiegende Bevorzugung der rechten Körperseite beim Fressen. Philip J. Clapham, inzwischen am Alaska Fisheries Science Center in Seattle, entdeckte mit seinen Mitarbeitern, dass 60 von 75 Buckelwalen nur am rechten Kiefer Abriebe aufwiesen (Kasten S. 46). 15 der Wale trugen solche Spuren nur links. Bei Arten aller Wirbeltierklassen, von Fischen über Amphibien und Reptilien bis zu Vögeln und Säugern, benutzt anscheinend eine Mehrzahl der Tiere beim Fressen mehr die rechte Körperseite, also die linke Hirnhemisphäre. Das erweckt den Eindruck eines uralten Erbes.

Was besagen diese Fälle hinsichtlich unserer eigenen Rechtshändigkeit? Die alte Ansicht, dass unsere Lateralität erst bei der Menschwerdung entstand, widerlegen jene Beispiele von Walen und Vögeln noch lange nicht. Überzeugender wirken allerdings Daten von Affen. Über ein Dutzend Studien der letzten Zeit an einer Reihe von Primaten zeigten, dass eine Mehrzahl von ihnen bevorzugt die rechte Hand benutzt. Das betrifft Paviane, Kapuziner-, Rhesus- und Menschenaffen sowie auch Schimpansen.

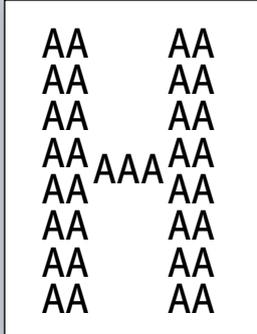
Viele jener Untersuchungen an Menschenaffen führte William D. Hopkins vom Yerkes National Primate Research Center in Atlanta mit seinen Kollegen durch. Wie die Forscher beobachteten, benutzten die Affen besonders dann bevorzugt die rechte Hand, wenn sie beide Hände koordiniert verwendeten oder wenn sie einen Leckerbissen nur auf den Hinterbeinen stehend erreichten. Zum Beispiel erhielten sie Honig in einem Röhrchen. Wenn sie das in einer Hand hielten, konnten sie mit einem Finger der anderen Hand die Süßigkeit herauskratzen. In zwei von drei Fällen nahmen die Tiere dazu einen rechten Finger. Auch nach hoch hängendem Futter griffen sie vorzugsweise mit rechts.

Diese Ergebnisse schürten bei uns einen Verdacht: Vielleicht hat sich die Händigkeit bei den Primaten mit der Zeit ja verstärkt, weil sie sich Futter auf immer komplexere und pfiffigere Weisen beschafften. Fressverhalten gehört zwar zu den Routinetätigkeiten, er-



Die Nervenverbindungen zwischen den beiden Körperhälften und den Hemisphären des Großhirns kreuzen zur anderen Seite. Darum steuert die linke Hirnseite die rechte Körperseite und umgekehrt.

## ARBEITSTEILUNG: ÜBERBLICK ODER DETAILS



Vorlage

Bei diesem klassischen Test, den in diesem Fall eine Forschergruppe um Dean C. Delis von der University of California in San Diego benutzte, sollten Hirngeschädigte aus dem Gedächtnis Bilder eines Buchstabens nachzeichnen, der wiederum aus Buchstaben zusammengesetzt war. Viele Probanden mit einer rechtsseitigen Läsion (also einem rechtsseitigen Defekt) zeichneten dann nur die kleineren Buchstaben, ohne die Gesamtstruktur wiederzugeben, während viele der Patienten mit linksseitiger Schädigung nur den großen Buchstaben aufmalten. Offenbar erfasst die rechte Hemisphäre übergeordnete Strukturen, die linke Einzelheiten.



Schädigung rechts:  
Die linke Hemisphäre registriert Details.



Schädigung links:  
Die rechte Hemisphäre registriert die übergeordnete Struktur.

ANDREW SWIFT, MCH; D.C. DELIS, L.C. ROBERTSON UND R. EFRON, "HEMISPHERIC SPECIALIZATION OF MEMORY FOR VISUAL HIERARCHICAL STIMULI", IN: NEUROPSYCHOLOGIA, VOL. 24, NO. 2, 1986

**SCHOKOLADEN-SEITE**  
Auf den Porträts der National Gallery in London schauen die meisten Personen leicht nach rechts, zeigen also mehr die linke Gesichtshälfte – somit die emotionale Seite. Dies ist bei den Männern weniger ausgeprägt. Möchten sie eher ihre Gefühle verbergen?

forderte nun aber mehr manuelle Raffinesse. Möglicherweise bot es sich an, von der für Fressen zuständigen Hirnhälfte direkt auch die mit dieser Hirnseite korrespondierende Hand anzusteuern. Von dort aus war das der kürzeste Weg zu den Händen. Falls diese These zutrifft, wäre unsere ausgeprägte Rechtshändigkeit aus der anspruchsvollen Nahrungsbeschaffung von Primaten entstanden.

Aber galt das auch für den Sitz der Sprache auf der linken Seite? An einen direkten Zusammenhang glauben wir nicht. Vielmehr vermuten wir, dass die linke Hemisphäre schon bei Tieren besondere Spezialisierungen aufweist, um im Alltag zu kommunizieren, und zwar stimmlich und mit Gesten. Das war sicherlich nicht gleich am Beginn der Wirbeltierrevolution so, aber wohl auch nicht viel später. Dafür gibt es verschiedene Anhaltspunkte.

Den Vogelgesang etwa steuert die linke Hirnseite. Auch wenn Seelöwen, Hunde und Affen Rufe von Artgenossen wahrnehmen, hat die linke Hirnhälfte das Sagen. Weißbüschelaffen, südamerikanische Krallenaffen, öffnen die rechte Mundseite mehr, wenn sie Artge-

nossen freundliche Laute schicken. Das beobachteten eine von uns (Rogers) und Michelle A. Hook-Costigan, die jetzt an der Texas A&M University in College Station arbeitet. Übrigens öffnen auch wir beim Sprechen in der Regel den Mund rechts mehr als links – einfach weil die rechte Gesichtseite über die linke Hemisphäre stärker aktiviert wird.

### Zuständig für aufgeregte Rufe

Wie so oft existieren in der Natur auch Ausnahmen. Bei manchen Tieren scheint die linke, nicht wie erwartet die rechte Hirnseite für aufgeregte Laute zuständig. Wird ein männlicher Frosch von einem Rivalen von hinten umklammert, kontrolliert sie die Klagerufe. Sie steuert bei Labormäusen den Empfang von Hilferufen von Jungtieren und bei Wüstenrennmäusen die Lauterzeugung bei der Paarung. Dagegen kontrollieren Affen und der Mensch, vielleicht sogar die meisten Tiere, emotional getönte Rufe und Laute mit der rechten Hemisphäre. Die linke übernimmt die wenig aufregenden Standardsituationen. Ebenso gibt es für die Lateralisierung unserer

**SITZ DER SPRACHE**  
Bei 95 Prozent der Rechtshänder, aber auch bei 70 Prozent der Linkshänder geht die Sprachproduktion von der linken Hemisphäre aus. Nur bei einem kleinen Teil der Linkshänder befindet sich das Sprachzentrum rechts. Bei manchen Menschen sind beide Seiten zuständig.

nichtlautlichen Verständigung offenbar Vorläufer im Tierreich. Schimpansen verwenden nicht nur beim Hantieren, sondern auch beim Gestikulieren vorzugsweise die rechte Hand. Gorillas beziehen gerade diese Hand gern bei komplexen Äußerungen mit ein, bei denen sie Kopf und Mund benutzen. Paviane nehmen überwiegend die rechte Hand, wenn sie für eine bestimmte Geste auf den Boden hauen, so beobachteten Adrien Meguerditchian und

Jacques Vauclair von der Université de Provence in Aix-Marseille. Auch die meisten Menschen gestikulieren mehr mit rechts. Es sieht so aus, als hätten das schon Vorfahren vor etwa 40 Millionen Jahren getan, die wir mit Pavianen gemein haben. Da war an die Hominiden noch lange nicht zu denken.

**Begann Sprechen mit Schmatzen?**

Wie aber entstand mit solchen Vorgaben – Nahrungsaufnahme, Lautäußerungen und Gestikulieren – Sprache? Nach einer These von einem von uns (MacNeilage) könnte alles mit Silbenbildung angefangen haben. Typische Silben weisen in rhythmischem Wechsel Konsonanten und Vokale auf. Bei einem Vokal strömt die Luft ziemlich ungehindert aus dem Mund, bei einem Konsonanten wird der Luftstrom in verschiedener Weise unterbrochen. Vielleicht entstanden Silben zunächst als Nebenprodukt beim Heben und Senken des Unterkiefers, wie beim Kauen, Saugen und Lecken. Möglich, dass Schmatzlaute mit den Lippen bei Frühmenschen kommunikative Bedeutungen erhielten. Viele Primaten nutzen dergleichen als Signale.

Irgendwann müssten sich dann entsprechende Eigenschaften des Kehlkopfs hinzugesellt haben (wie dessen Lage und Kontrolle), so dass aus den Schmatzlauten gesprochene Silben wurden. Anfangs mögen diese noch Einzelkonzepte symbolisiert haben, das heißt, man benutzte Wörter, um etwa ein Ding oder einen Vorgang zu bezeichnen. Sprache wurde daraus, als Menschen die Fähigkeit erwarben, solche Komponenten zu Sätzen zusammenzufügen.

Wie steht es um die Evolution der rechten Hemisphäre? Was für Anzeichen finden sich dafür, dass sie sich bei den Wirbeltieren schon früh auf unerwartete Ereignisse spezialisierte? Und wie ging es weiter?

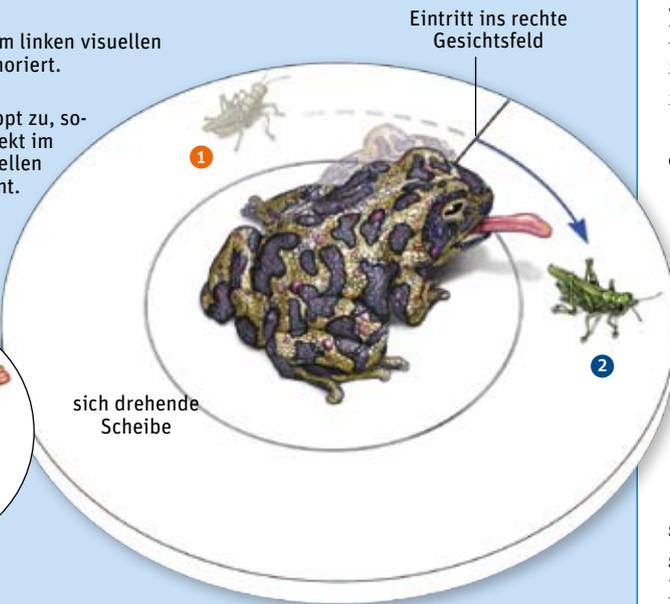
Recht aufschlussreich ist hier die Reaktion auf Raubfeinde. Kaum etwas dürfte mehr erschrecken als ein plötzlich auftauchender Räuber. Tatsächlich flüchten Fische, Amphibien, Vögel und Säugetiere schneller, wenn der Feind im linken Gesichtsfeld auftaucht, sie ihn also zuerst mit der rechten Hirnseite wahrnehmen (Kasten S. 48).

Gleiches gilt anscheinend für den Menschen. Das zeigen eine Reihe von Arbeiten, bei denen Forscher mit modernen Methoden sozusagen das Gehirn in Aktion betrachteten. Michael D. Fox und seine Kollegen von der Washington University in St. Louis (Missouri) haben die Studien zusammengefasst. Sie kommen zu dem Ergebnis, in unserer rechten Hemisphäre sitze ein Alarmsystem. Dieses sei besonders empfänglich für überraschende und

**LINKES GEHIRN: ZUSTÄNDIG FÜR ROUTINE**

**Anscheinend steuert die linke Hemisphäre** bei fast allen Wirbeltieren häufiges Alltagsverhalten. Dazu gehören in der Regel auch Fressen und Beutefang. Kröten wurden mit Grashüpferattrappen konfrontiert, die vor ihnen im oder gegen den Uhrzeigersinn vorbeizogen. Kam das Insekt von links, schlugen sie erst zu, wenn es im rechten Sehfeld erschien (Bild). Kam es von rechts, schnappten sie insgesamt seltener danach, aber auf das rechte wie linke Gesichtsfeld bezogen gleich oft (nicht dargestellt).

- 1 Grashüpfer im linken visuellen Feld wird ignoriert.
- 2 Kröte schnappt zu, sobald das Insekt im rechten visuellen Feld erscheint.



Wie viele andere Tiere auch bevorzugen Paviane und Wale in zahlreichen Situationen die rechte Körperseite. Paviane schlagen etwa zu Kommunikationszwecken gern mit der rechten Hand auf den Boden. Viele Buckelwale scheinen beim Fressen die rechte Seite des Mauls stärker einzusetzen, wie Abriebspuren am rechten Kiefer zeigen (Pfeil im rechten Foto).



ANDREW SWIFT, NACH C. VALORTIGARA ET AL., „COMPLEMENTARY RIGHT AND LEFT HEMISPHERE USE FOR PREDATORY AND AGONISTIC BEHAVIOR“, IN: NEUROREPORT, VOL. 9, NO. 14, 1998; UND A. ROBINS UND J. J. ROGERS, „LATERALIZED PREY-CATCHING RESPONSES IN THE CANE TOAD, BUFO MARINUS: ANALYSIS OF COMPLEX VISUAL STIMULI“, IN: ANIMAL BEHAVIOUR, VOL. 68, NO. 4, 2009.

ADRIEN MEGUERDITCHIAN UND JACQUES VAUCLAIR, UNIVERSITÉ DE PROVENCE

PROVINCE/TOWN CENTER FOR COASTAL STUDIES

unmittelbar verhaltensrelevante Reize – also auch für Gefahr. Das erklärt womöglich einen bisher unverständlichen Befund: In Tests reagieren Rechtshänder bei unerwarteten Ereignissen schneller mit der linken Hand – die von der rechten Hemisphäre gesteuert wird.

Auch wenn keine akute Gefahr droht, behalten viele Wirbeltiere jeden erkennbaren Raubfeind wachsam im linken Auge. Die Linkslastigkeit erstreckt sich bei zahlreichen Arten sogar auf aggressives Verhalten gegenüber Artgenossen. Kröten, Chamäleons, Hühner, Paviane – sie greifen andere ihrer Art leichter an, wenn sich diese links von ihnen befinden.

Die eher einfache Alarmbereitschaft mit Vermeiden und Vorsicht verwandelte sich beim Menschen zu verschiedensten negativen Gefühlen. Im 19. Jahrhundert fiel Ärzten auf, dass hysterische Gliedmaßenlähmungen öfter die linke Körperseite betreffen. Wir erwähnten schon die Zuständigkeit der rechten Hirnseite, wenn wir erregt rufen und schreien – ein klarer Gegensatz zu den von der linken Seite gesteuerten gefühlsneutralen Stimmübungen, sofern sich die entsprechenden Hinweise erhärten. Bei einem linksseitigen Hirnschaden werden Menschen auch eher depressiv als bei einem rechtsseitigen. Zudem ist die rechte Hemisphäre bei einer chronischen Depression aktiver als die linke.

### Gesichtserkennung muss rasch gehen

Neben plötzlich auftauchenden Raubfeinden gehören etwa unvermutete Begegnungen mit Artgenossen zu den wichtigsten Situationen, auf die Tiere oft sehr schnell reagieren müssen. Die rechte Hemisphäre erkennt bei Fischen und Vögeln Kumpane. Sie erfasst auch soziales Verhalten, das manchmal eine rasche Reaktion erfordert.

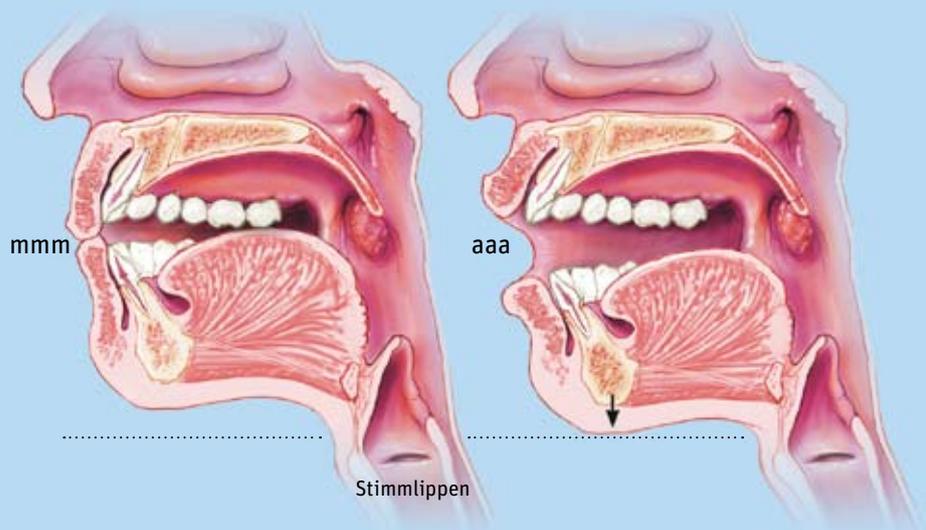
Viele Wirbeltiere identifizieren individuelle Artgenossen anhand ihres Aussehens. Das dürfte aus dem in der rechten Hemisphäre gelagerten Gesichtserkennen hervorgegangen sein. Vielleicht unterscheiden schon manche Fische zwischen einzelnen Artgenossen. Auf jeden Fall leistet das aber wohl die rechte Hirnhälfte der meisten Vögel. Nach Studien von Keith M. Kendrick vom Babraham Institute in Cambridge (England) sorgt bei Schafen vorrangig die rechte Hemisphäre dafür, dass sie Gesichter von verschiedenen Schafen – und die von Menschen – auseinanderhalten können. Das Gleiche fanden Charles R. Hamilton und Betty A. Vermeire von der Texas A&M University bei Rhesusaffen.

Hirnforscher wissen noch nicht lange, dass Menschen zum Erkennen von Gesichtern die rechte Hemisphäre gebrauchen. Eine so ge-

nannte Gesichtsbblindheit (Prosopagnosie) beruht in der Mehrzahl der Fälle auf Beschädigungen der rechten Hirnseite. Gesichtsausdrücke erfassen Menschen wie auch Affen im Übrigen mit der rechten Seite besser. Unseres Erachtens hängt das auch damit zusammen, dass diese Hemisphäre ursprünglich die Identität oder Vertrautheit erkannte. Sie beurteilte gewissermaßen, ob das Wahrgenommene schon einmal vorkam.

## WARUM SITZT DIE SPRACHE LINKS?

**Vielleicht entwickelte sich das Sprechen** aus rhythmischen Mundbewegungen wie beim Kauen – einem Routineverhalten. So mögen zuerst Silben entstanden sein, bei denen Konsonanten und Vokale abwechseln, wie bei »mama«. Kauen entstand bei den Säugetieren vor etwa 200 Millionen Jahren.



ANDREW SWIFT, NACH: SUSANNA DOUGLAS, UNIVERSITY OF TEXAS IN AUSTIN



Die beiden Hemisphären unterscheiden sich anscheinend noch in anderer Hinsicht – nicht nur darin, dass sich die linke ursprünglich um die Routine kümmerte und die rechte um Ausnahmesituationen. Die rechte Seite des menschlichen Gehirns befasst sich eher mit dem großen Ganzen; sie achtet mehr auf übergeordnete Aspekte als auf Einzelheiten – eine gute Voraussetzung, um Raumbeziehungen einzuschätzen. Gedächtnisinhalte speichert diese Hirnseite eher in Gesamtmustern – nicht so sehr als Einzelheiten – und ruft sie auch als solche ab. Die linke Hemisphäre des Menschen beachtet und bearbeitet dagegen stärker die Details.

Eindrucksvoll zeigt den Unterschied ein an sich simpler Test mit so genannten Navon-Buchstaben, die ursprünglich der Psychologe David Navon von der Universität Haifa (Israel) ersann. Er wollte damit herausfinden, ob Menschen mehr aufs Ganze oder auf Einzelheiten achten. Bei dem hier relevanten Test sollten Hirngeschädigte aus dem Gedächtnis ein Bild nachzeichnen, bei dem ein großer Buchstabe aus vielen kleinen zusammengesetzt war (Kasten S. 45). Lag der Hirndefekt links, zeichneten die Patienten oft nur den großen Buchstaben. Lag er rechts, malten sie viele kleine Buchstaben, aber ohne sie zu ordnen.

Auch dazu finden sich schon im Tierreich Parallelen. Wie Richard J. Andrew von der University of Sussex (England) und einer von uns (Vallortigara) entdeckten, benutzen Hühner die rechte Hemisphäre, wenn sie auf größere räumliche Zusammenhänge achten. Verdeckt man ihnen das rechte Auge, so dass nur die rechte Hemisphäre – vom linken Auge – Signale erhält, dann interessieren sie sich für ein breites Spektrum von Reizen. Das wirkt, als ob sie auf ihre gesamte Umgebung achten. Ist das linke Auge bedeckt, sind sie also rein auf die linke Hemisphäre angewiesen und kümmern sich nur um spezielle markante Orientierungspunkte.

Warum teilen sich überhaupt die Hemisphären bei manchen Funktionen die Arbeit? Bei einem neuen Reiz ist gleichzeitig zweierlei erforderlich: Zum einen muss das Tier den Neuheitsgrad abschätzen – und gegebenenfalls Sofortmaßnahmen ergreifen, eine Aufgabe der rechten Hirnseite; zum anderen gilt es festzustellen, ob der Reiz in manchem doch vertraut ist, ob sich also eine bewährte Verhaltensreaktion anbietet, eine Aufgabe der linken Seite.

Die erste Maßnahme verlangt, bei dem Erlebten das zu beachten, was an der Sache bislang einzigartig, also wohl neu ist. Gerade solch einen »Riecher für Neues« braucht insbesondere auch die räumliche Wahrnehmung, denn die Umwelt sieht praktisch von überall her anders aus. Das mag erklären, wieso die rechte Hemisphäre auch dafür zuständig ist.

Dagegen erfordert die zweite Maßnahme, das Erlebte einer Kategorie zuzuordnen. Das Tier muss bewerten, welche Merkmale davon es schon kennt. Besonderheiten sollte es hierbei ignorieren oder für unwichtig befinden. Es übt sich in selektiver Aufmerksamkeit: eine Funktion der linken Hemisphäre, die zum Wichtigsten zählt, was unser Gehirn kann.

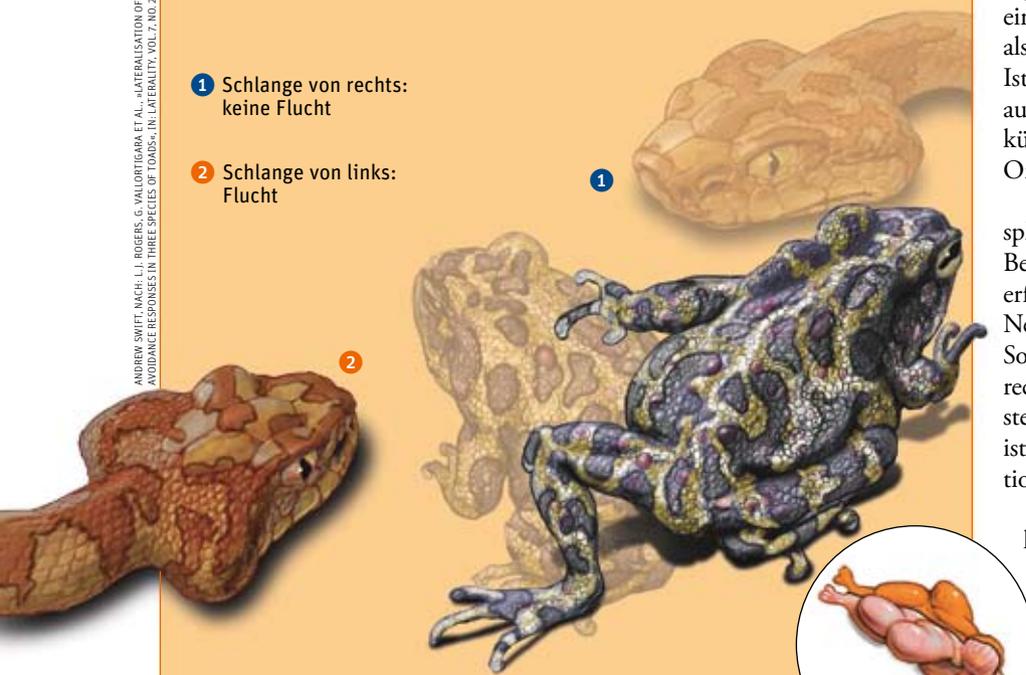
Haben sich die Hemisphären ursprünglich in verschiedene Richtungen spezialisiert, weil sie dadurch zusammen beide Arten von Leistungen leichter und effizienter erfüllen

## RECHTES GEHIRN: FÜR ÜBERRASCHUNGEN GUT

**Die rechte Hemisphäre tritt in Aktion**, wenn das Tier rasch reagieren muss – etwa weil unvermutet ein Raubfeind oder ein Artgenosse auftaucht. Stößt die Attrappe eines Schlangenkopfs plötzlich von rechts auf eine Kröte zu, gibt es keine Reaktion. Doch das Gleiche von links löst Flucht aus: Die Kröte springt weg.

1 Schlange von rechts: keine Flucht

2 Schlange von links: Flucht



Zum Wiedererkennen von Artgenossen verhilft Schafen hauptsächlich die rechte Hemisphäre. Gleiches gilt für Töpel.



ANDREW SWIFT, NACH: L.J. ROGERS, G. VALLORTIGARA ET AL., »LATERALISATION OF PREDATOR AVOIDANCE RESPONSES IN THREE SPECIES OF TOADS«, IN: LATERALITY, VOL. 7, NO. 2, 2002

GETTY IMAGES / JOHN GIUSTINA

GETTY IMAGES / KEVIN MORRIS

## ZWEI SEHEN MEHR

**Wie stark sich bei Hühnern** die Lateralisierung der Hirnhemisphären ausbildet, hängt davon ab, ob das Küken zuletzt im Hellen oder Dunklen ausgebrütet wird. Licht bewirkt stärkere Seitenunterschiede: Solche Küken können gleichzeitig Futterkörner zwischen Steinchen herauspicken und auf einen Raubvogel achten – die anderen nicht. Erstere lernen es schnell, Steinchen und Körner auseinanderzuhalten, Letztere im Prinzip auch. Doch sie tun sich damit schwer, wenn sie währenddessen auf den Raubvogel aufpassen müssen.



GETTY IMAGES / STOCKBYTE

konnten – und zwar gleichzeitig –, als wenn jede Hälfte für alles zuständig sein musste? Diese Idee lässt sich überprüfen, wenn wir Tiere mit einem lateralisierten Gehirn mit anderen vergleichen, deren Hemisphären symmetrisch zueinander aufgebaut sind. Erstere müssten bei zwei konkurrierenden Aufgaben besser abschneiden, wenn jede eine andere Hirnhälfte beschäftigt. Bei einem lateralisierten Gehirn müssten die beiden Seiten gleichzeitig, also parallel arbeiten können.

### Küken im Härtetest

Hier kamen uns Forschungen von einer von uns (Rogers) zugute. Sie hatte nachgewiesen, dass bestimmte Seitenspezialisierungen ohne Licht nicht auftreten. Kurz vor dem Schlüpfen haben Küken den Kopf normalerweise so gedreht, dass das linke Auge vom Körper bedeckt ist. Licht, das durch die Schale dringt, erregt nur das rechte Auge. Solche Helligkeit löst die Entwicklung einiger der seitenspezifischen Muster für die Verarbeitung optischer Signale aus. Dunkelheit dagegen verhindert sowohl, dass die linke Hemisphäre überragend darin wird, Futterkörner von kleinen Steinchen zu unterscheiden, als auch, dass die rechte gut auf Raubfeinde reagiert.

Wir (Rogers und Vallortigara) testeten zusammen mit Paola Zucca von der Università degli Studi di Teramo (Italien) derart beeinträchtigte und normale Küken. Die Tiere sollten Futterkörner zwischen Steinchen finden – und gleichzeitig aufpassen, ob eine Raubvogelattrappe am Himmel auftauchte. Küken, die bei Licht ausgebrütet worden waren, bewältigten den Test. Doch die anderen versagten: Sie konnten nicht beides zugleich. Demnach vermag ein lateralisiertes Gehirn parallele Anforderungen effizienter zu verarbeiten.

Doch warum erhält so oft die gleiche Hirnseite den Vorzug für bestimmte Aufgabenfelder? Warum sind nicht einfach die Hälfte der Menschen Linkshänder? Man könnte ar-

gumentieren, von der Evolution her sei es ungünstig, wenn die meisten Mitglieder einer Population bei bestimmten Eigenschaften auf die gleiche Seite geprägt sind. Beispielsweise könnte ein Fressfeind das ausnutzen und von der schlechteren Seite angreifen. Aber vielleicht, so überlegen Rogers und Vallortigara, hilft die meist gleiche Seitenausprägung sozialen Tieren im Umgang mit Artgenossen. Sie können deren Verhalten besser im Voraus einschätzen.

In simulierten Populationen kann eine vorherrschende Rechts- (oder Links-)lastigkeit spontan aufkommen, wenn das Verhältnis zwischen Rechts- und Linkstypen die Kosten und Nutzen (Vor- und Nachteile im Evolutionssinn) für die einzelnen Mitglieder mitbestimmt. Das zeigten Stefano Ghirlanda von den Universitäten Stockholm sowie Bologna und Vallortigara mit spieltheoretischen Modellen. Demnach kann sozialer Selektionsdruck eine Spezialisierung der immer gleichen Hirnseite fördern – wenn die Populationsmitglieder gezwungen sind, sich einheitlich zu verhalten. Schwarmfische etwa sollten bei Richtungswechseln möglichst die gleiche Entscheidung treffen, damit der Schwarm zusammenbleibt. Einzelne lebende Fische benötigen keine konformen Richtungspräferenzen. Tatsächlich ist das so auch zu beobachten.

Die dargestellten Befunde werfen in Bezug auf den Menschen und besonders auf seine höheren geistigen Leistungen Fragen auf. Welchen Anteil mögen die beiden Hemisphären wohl jeweils an Phänomenen wie Bewusstsein oder Empathie haben oder an der Begabung für Geistesblitze? Wir wissen darüber noch allzu wenig. Doch was wir hier zusammengetragen haben, lässt annehmen, dass auch diese schwer zu ergründenden Eigenschaften mehr von sich preisgeben werden, wenn wir Hirnleistungen aus Zeiten hinzuziehen, als es Menschen noch nicht gab, und ihre weitere Entwicklung betrachten.



**Peter F. MacNeilage** (oben) hat an der University of Texas in Austin eine Psychologieprofessur inne.

**Lesley J. Rogers** ist emeritierte Professorin für Neurowissenschaften und Tierverhalten an der University of New England in Armidale (New South Wales, Australien).

**Giorgio Vallortigara** ist Professor für Kognitive Neurowissenschaften an der Universität Trient (Italien).

**MacNeilage, P. F.:** The Origin of Speech. Oxford University Press, 2008.

**Rogers, L. J., Andrew, R. J. (Hg):** Comparative Vertebrate Lateralization. Cambridge University Press, 2002.

**Rogers, L. J. et al.:** Advantages of Having a Lateralized Brain. In: Proceedings of the Royal Society B 271(6), S. S420 – S422, 7. Dezember 2004.

**Tommasi, L.:** Mechanisms and Functions of Brain and Behavioural Asymmetries. In: Philosophical Transactions of the Royal Society B 364, S. 855 – 859, 12. April 2009.

**Vallortigara, G., Rogers, L. J.:** Survival with an Asymmetrical Brain: Advantages and Disadvantages of Cerebral Lateralization. In: Behavioral and Brain Sciences 28(4), S. 575 – 633, Aug. 2005.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/1034791](http://www.spektrum.de/artikel/1034791).



# Der vergessene ENTDECKER DER DNA

Vor bald 150 Jahren stieß Friedrich Miescher in Tübingen auf eine seltsame, bislang unbekannte Substanz, die er Nuclein taufte. Er konnte nicht wissen, dass er damit den Startschuss für eine wissenschaftliche Umwälzung gegeben hatte, die uns noch heute in Atem hält.

## In Kürze

- ▶ Die Erforschung der Erbsubstanz DNA erscheint heute untrennbar verbunden mit den Namen James Watson und Francis Crick, die 1953 die Struktur des Moleküls enträtselten. Doch kaum jemand erinnert sich an **Friedrich Miescher (1844–1895)**, den eigentlichen Entdecker der DNA.
- ▶ Der Schweizer entstammte einer Baseler Forscherfamilie und ging nach seinem Medizinstudium nach Tübingen, wo er die chemische Zusammensetzung von weißen Blutkörperchen untersuchte. Bei diesen Experimenten entdeckte er, dass Zellkerne **eine bislang unbekannte Substanz** enthalten: die DNA.
- ▶ Er erkannte viele grundlegende Eigenschaften der DNA und spekulierte, dass sie **eine entscheidende Rolle in Zellen** spielt, konnte sich aber letztlich nicht mit der Vorstellung anfreunden, dass dieses Molekül als Träger der Erbinformation dient.

Von Ralf Dahm

**D**as Jahr 1869 scheint für Historiker eher uninteressant: Kein Umsturz besiegelt das Schicksal einer Nation, keine große Schlacht entscheidet einen Krieg, kein neuer Kontinent taucht auf der Weltkarte auf. Dennoch geschieht etwas in diesem Jahr, was die Welt grundlegend verändern wird: Friedrich Miescher (1844–1895) entdeckt das vielleicht wichtigste biologische Molekül überhaupt – die DNA. Ohne es zu wissen, hat Miescher damit nicht nur jene Substanz aufgespürt, in der die Baupläne aller Lebewesen verschlüsselt sind, sondern auch eine der größten wissenschaftlichen Revolutionen der Neuzeit angestoßen.

Am 13. August 1844 kommt Johann Friedrich Miescher in Basel zur Welt – auf den ersten Vornamen verzichtet er jedoch zeit lebens. Sowohl sein Vater Friedrich Miescher-His (1811–1887) als auch sein Onkel Wilhelm His (1831–1904) sind angesehene Mediziner und Professoren an der Universität Basel. Zahlreiche Wissenschaftler gehen bei der Familie ein und aus; ihre lebhaften Diskussionen geben dem jungen Friedrich reichlich Anschauungsunterricht in wissenschaftlichem Denken. In dieser anregenden Umgebung entwickelt Miescher bald ein ausgeprägtes Interesse für die Naturwissenschaften. Schon als 17-Jähriger beginnt er in Basel mit dem Medizinstudium; gut sechs Jahre später schließt er es ab. Viel mehr als eine Tätigkeit als praktizierender Arzt interessiert Miescher aber die wissenschaftliche Forschung. Inspiriert durch

die Überzeugung seines Onkels, dass »die letzten Fragen der Gewebsentwicklung auf chemischem Boden zu lösen sind«, beschließt er, sich mit einem damals noch brandneuen Fach zu beschäftigen: der Biochemie, die zu dieser Zeit noch »Physiologische Chemie« heißt.

Daher zieht der 23-Jährige im Frühling 1868 nach Tübingen, wo er unter zwei der berühmtesten Wissenschaftler seiner Zeit arbeitet: Ein Semester lang macht er sich im Labor des organischen Chemikers Adolph Strecker (1822–1871) mit wichtigen Arbeitstechniken vertraut, dann begibt er sich unter die Fittiche des Biochemikers Felix Hoppe-Seyler (1825–1895), eines Pioniers der jungen Disziplin. Von 1860 bis 1871 leitet Hoppe-Seyler eines der weltweit ersten biochemischen Labors, wo er unter anderem bahnbrechende Experimente zum roten Blutfarbstoff Hämoglobin durchführt. Angesiedelt ist es in einer umgebauten Waschküche in Tübingens mittelalterlichem Schloss, das hoch oben über der Altstadt und den umgebenden Flusstälern thront; Miescher bekommt als Arbeitsplatz die ehemalige Schlossküche zugewiesen.

Dort macht er sich unter Hoppe-Seylers Anleitung daran, die chemische Zusammensetzung von Zellen zu studieren. Als Untersuchungsmaterial dienen ihm Leukozyten – weiße Blutkörperchen. An diesen »einfachsten und selbständigsten Formen thierischer Zellen« will er die Geheimnisse des Grundbausteins des Lebens ergründen. Allerdings sind dafür zunächst recht unappetitliche Arbeiten nötig: Das Material für seine Experimente gewinnt Miescher aus eitrigen Verbänden des Tübinger Krankenhauses. Die gibt es in Hülle

und Fülle, da Ärzte zu dieser Zeit Desinfektionsmittel eher sporadisch einsetzen.

Als Erstes muss Miescher eine Methode entwickeln, um die Leukozyten aus dem Verbandsmaterial herauszuwaschen. Er testet dazu verschiedene Salzlösungen und kontrolliert das Ergebnis jeweils unter einem Mikroskop. Dann knöpft er sich die unterschiedlichen Einweißstoffe (Proteine) vor, die er aus den Zellen gewinnt. Wie viele seiner Zeitgenossen hofft Miescher auf diese Weise herauszufinden, wie Zellen funktionieren. Doch es hagelt Rückschläge: Vor dem komplexen Gemisch der vielen verschiedenen Proteine müssen die damaligen, recht primitiven Methoden und Laborgeräte kapitulieren.

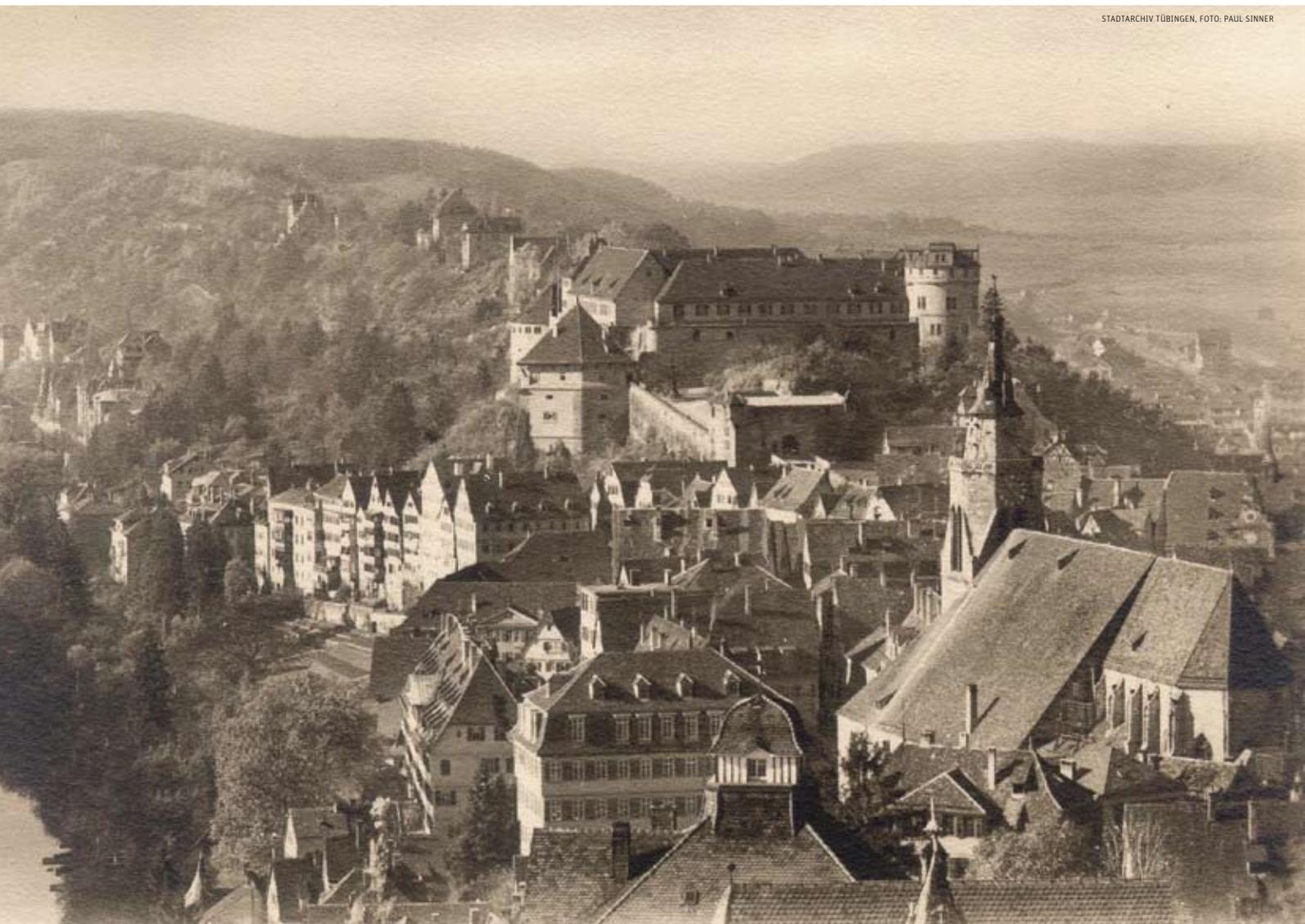
Während dieser langwierigen Experimente beobachtet Miescher eines Tages etwas Merkwürdiges: Fügt er zu einem Zellextrakt Säure hinzu, bildet sich ein Niederschlag, der sich

unter Laugenzugabe wieder auflöst. Es scheint sich bei diesem Stoff also nicht um ein Protein, sondern um eine Art Säure zu handeln. Ohne es zu wissen, hat Miescher die Erbsubstanz DNA entdeckt und damit den Grundstein für die moderne Molekularbiologie gelegt.

Für Miescher stellt sich zunächst die Frage, woher genau diese rätselhafte Substanz stammt. Er beobachtet, dass sich nach längerem Behandeln der Leukozyten mit verdünnter Salzsäure Teilchen absetzen, die wie Zellkerne aussehen. Sie lassen sich zudem mit Jod nicht mehr gelb anfärben, was darauf hinweist, dass sie kaum noch Proteine enthalten. Und in schwachen Laugen schwellen diese mutmaßlichen Kerne stark an, ohne sich jedoch aufzulösen. Auf Grund solcher indirekten Hinweise spekuliert Miescher, dass sein geheimnisvoller Niederschlag aus den Zellkernen stammen könnte.

**Die alte Universitätsstadt Tübingen auf einer Fotografie aus den 1870er Jahren: Die Räume des großen Schlosses waren damals zu Laboratorien der Universität umgebaut worden. Hier entdeckte Friedrich Miescher das Molekül, das er Nuclein nannte – die DNA. In späteren Jahren dachte er oft wehmütig an die großzügigen Räumlichkeiten innerhalb der dicken Schlossmauern zurück, die er scherzhaft als Labor der Alchimisten bezeichnete.**

STADTARCHIV TÜBINGEN, FOTO: PAUL SINNER



AUS: FRIEDRICH MIESCHER, DIE HISTORISCHEN UND PHYSIOLOGISCHEN ARBEITEN, BD. 1, LEIPZIG 1897; UNIVERSITÄTS- und BIBLIOTHEK TüBINGEN, SIGNATUR: UB 1 630-1



Friedrich Miescher in späteren Jahren. Diese Fotografie lag der von seinem Onkel Wilhelm His posthum veröffentlichten Sammlung seiner Publikationen bei.

Zwar ist der Zellkern schon seit 1802 bekannt, aber dennoch wissen Forscher über ihn eigentlich fast nichts. Welche Funktionen er in der Zelle übernimmt, ist auch noch zu Mieschers Zeit Gegenstand heftiger Kontroversen und wilder Spekulationen. Allerdings vermutet bereits 1866 der deutsche Zoologe Ernst Haeckel (1834–1919), dass der Zellkern Faktoren enthalte, die erbliche Eigenschaften übertragen. Doch erst Mieschers Entdeckung drei Jahre später macht den Weg frei für die weitere Erforschung dieser Organelle.

Miescher macht sich nun daran, seinen mysteriösen Niederschlag genauer zu untersuchen. Hierzu muss er jedoch erst einmal die Zellkerne ausreichend rein isolieren. Nach vielen Versuchen findet er schließlich eine geeignete Methode: Er wäscht die Zellen über mehrere Wochen hinweg immer wieder mit verdünnter Salzsäure, und zwar in »Winterkälte«, damit sich das Material möglichst wenig zersetzt. Auf diese Weise zerstört er die Zellmembranen und löst das Zytoplasma großteils auf. Übrig bleiben im Wesentlichen die Kerne. Um fettige Reste von Zellmaterial (Lipide) zu entfernen, schüttelt Miescher den Rückstand im nächsten Schritt kräftig in einer Mischung aus Wasser und Ether und lässt den Behälter eine Weile stehen. Die gereinigten Zellkerne setzen sich dann als feine Körnchen am Boden des Gefäßes ab.

Mit diesem Material wiederholt der Forscher nun seine Versuche: Wieder quellen die Zellkerne in Laugen auf, und nach Zugabe von Säure bildet sich ein weißer, wolliger Niederschlag. Die von ihm zuvor beobachtete Ausflockung stammt also tatsächlich aus dem Zellkern. Später tauft er die Substanz daher auch Nuclein (von lateinisch *nucleus*, Kern). In der modernen Bezeichnung Desoxyribonucleinsäure (auf englisch *desoxyribonucleic acid*, kurz DNA) existiert der Begriff bis heute weiter.

Anfangs ist sich Miescher trotz der ungewöhnlichen Eigenschaften des Nucleins nicht ganz sicher, ob es sich dabei wirklich nicht um ein Protein handelt. Er beschließt, ein Verfahren auszuprobieren, das der deutsche Physiologe Wilhelm Kühne (1837–1900) in seinem »Lehrbuch der physiologischen Chemie« nur ein Jahr zuvor beschrieb. Kühne hatte beobachtet, dass das Verdauungsenzym Pepsin das Zytoplasma auflöst, ohne die Zellkerne anzugreifen.

Somit beginnt ein weiteres unappetitliches Kapitel in Mieschers wissenschaftlicher Laufbahn: Er wäscht Schweinemägen mit verdünnter Salzsäure aus, filtert die gewonnene Flüssigkeit und erhält so einen Rohextrakt aus proteinverdauenden Enzymen. Als er diesen zu den Zellen gibt, zersetzen sich die Proteine, das Nuclein bleibt jedoch intakt. Mieschers rätselhafte Substanz ist also tatsächlich kein Protein. Aber was könnte sie dann sein?

**Mit dem zweiten Anlauf endlich ans Ziel gelangt**

Als Nächstes versucht Miescher herauszufinden, aus welchen chemischen Elementen das Nuclein besteht. Dazu muss er es jedoch in größeren Mengen als bisher sowie in noch reinerer Form gewinnen; insbesondere Reste von Zytoplasma stören bei solchen Analysen gewaltig. Mit der Pepsinverdauung hat er nun aber eine geeignete Methode bei der Hand, um ein optimiertes Verfahren zur DNA-Isolierung zu entwickeln (siehe Kasten S. 54).

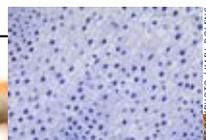
Anders als vorher wäscht Miescher jetzt die Leukozyten zunächst mehrmals mit warmem Alkohol. Damit bricht er die Zellmembranen auf und entfernt das meiste Zytoplasma sowie den Großteil der Lipide. Dann setzt er das zurückbleibende Material bis zu einen Tag lang seiner Pepsinlösung aus, welche die übrig gebliebenen Proteine beseitigt. Das Resultat: ein

**1865**  
Gregor Mendel entdeckt durch Kreuzungsversuche an Erbsen, dass die Vererbung von Merkmalen bestimmten Gesetzen unterliegt.



PHOTO: I. STERNEN COBLENZ

**1866**  
Ernst Haeckel postuliert, dass der Zellkern Faktoren beinhaltet, die für die Übertragung erblicher Eigenschaften notwendig sind.



LESTER PHOTO / KARL DOBERG

**1869**  
Friedrich Miescher isoliert als Erster DNA.



MIT FRIEDRICH VON RALE DAHM

**1928**  
Laut Frederick Griffith überträgt ein »transformierendes Prinzip« Merkmale eines Bakterienstamms auf einen anderen.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / MEGANIM



STADTBIBLIOTHEK TÜBINGEN, FOTO: PAUL SINNER



STADTBIBLIOTHEK TÜBINGEN

feiner, grauer Niederschlag aus Zellkernen. Diesen schüttelt Miescher in Ether sowie erneut in warmem Alkohol, um die restlichen Lipide so weit wie möglich zu entfernen. Als Nächstes wäscht er das Präparat mit Laugen, etwa stark verdünntem Natriumkarbonat, und gibt dann einen Überschuss an Essig- oder Salzsäure hinzu. Eine flockige Masse fällt aus: das erste vergleichsweise reine DNA-Präparat. Damit kann sich der Forscher nun daranmachen, die chemische Zusammensetzung aufzuklären.

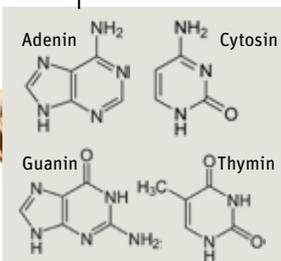
Zu dieser Zeit läuft eine Elementaranalyse wie folgt ab: Die unbekannte Substanz wird zusammen mit verschiedenen Chemikalien erhitzt, die jeweils nur mit einem der enthaltenen Elemente reagieren. Das Gewicht jedes Reaktionsprodukts lässt auf die Menge des entsprechenden Elements in der Probe rückschließen. Das Verfahren ist mühselig und Zeit raubend; Miescher bezeichnet es als »Fabrikarbeit«, lässt sich aber nicht beirren – und wird mit einem überraschenden Ergebnis belohnt: Neben Kohlenstoff, Wasserstoff und Stickstoff, die auch in Proteinen reichlich vorkommen, enthält sein

Molekül keinen Schwefel, dafür aber Phosphor, und das nicht zu knapp. Da damals noch praktisch kein anderes organisches Molekül bekannt ist, das nennenswerte Mengen an Phosphor enthält, ist Miescher jetzt endgültig überzeugt, eine völlig neue Substanz entdeckt zu haben.

Im Herbst 1869 schließt er seine Untersuchung des Nucleins vorläufig ab und kehrt für einen Kurzurlaub nach Basel zurück. Dort beginnt er, seine erste wissenschaftliche Veröffentlichung über die biochemische Zusammensetzung von Leukozyten und das Nuclein zu verfassen. In diesem Artikel betont Miescher auch die Bedeutung seiner Entdeckungen: Die neu isolierte Substanz werde sich als ebenso wichtig erweisen wie die Proteine, schreibt er. Nach dem Urlaub nimmt er seine Labortätigkeit wieder auf – jedoch nicht in Tübingen, sondern an der Universität Leipzig. Um seinen wissenschaftlichen Horizont zu erweitern, wendet er sich anderen Themen zu und erforscht rund ein Jahr lang im Labor des Physiologen Carl Ludwig (1816–1895) die Nervenbahnen, die an der Schmerzleitung im Rückenmark beteiligt sind. Doch entwi-

**Das Laboratorium Friedrich Mieschers befand sich in der ehemaligen Schlossküche (links). Es war spärlich ausgerüstet; der große Apparat im Hintergrund diente zum Destillieren von Wasser. Die zur Isolierung der DNA benötigten Zellen gewann Miescher aus eitergetränktem Verbandsmaterial des Tübinger Krankenhauses (rechts). Hygiene und Desinfektion gehörten damals nicht zum Standard, eitrige Verbände standen daher stets in großen Mengen zur Verfügung.**

**1929**  
Phoebus Levine identifiziert die Bausteine der DNA, einschließlich der vier Basen A, C, G und T.

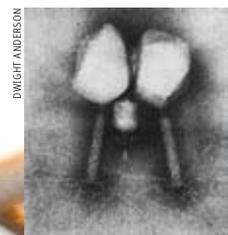


SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

**1944**  
Oswald T. Avery, Collin MacLeod und Maclyn McCarty zeigen, dass die DNA Griffiths »transformierendes Prinzip« ist.

**1949–1950**  
Erwin Chargaff beobachtet, dass sich die Basenzusammensetzung der DNA von Spezies zu Spezies unterscheidet, die Basen innerhalb einer Spezies aber stets in einem fixen Verhältnis vorhanden sind: A immer so oft wie T, C so oft wie G.

**1952**  
Alfred Hershey und Martha Chase bestätigen anhand von Viren, dass die DNA Träger der Erbsubstanz ist.



DWIGHT ANDERSON

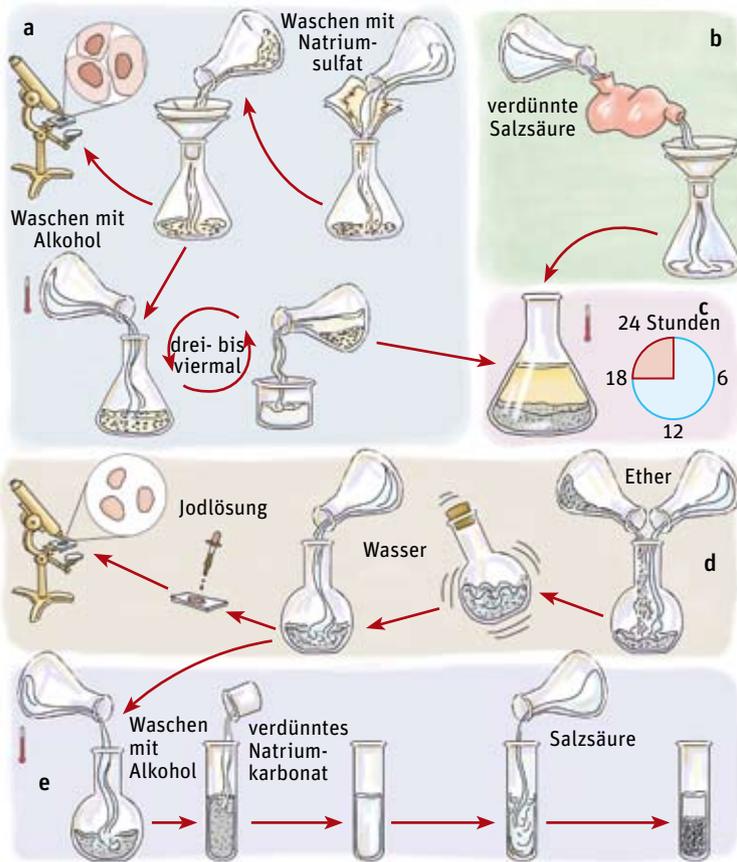
ckelt er dafür nicht den gleichen Enthusiasmus wie für sein Tübinger Projekt.

Nebenbei vollendet Miescher den Entwurf seiner ersten Publikation und schickt ihn zur Beurteilung an Hoppe-Seyler. Am 23. Dezember schreibt er in einem Brief an seine Eltern: »Auf meinem Tische liegt ein versiegeltes und adressiertes Paket. Es ist mein Manuscript, für dessen Aufgabe an die Packetpost ich bereits die nötigen Anordnungen getroffen habe. Ich

schicke es nun zu Hoppe-Seyler nach Tübingen. Also der erste Schritt in die Öffentlichkeit ist gethan, wenn Hoppe nicht refüsirt.«

Das tut Hoppe-Seyler auch nicht. Da er die außergewöhnlichen Studienresultate jedoch mit Skepsis betrachtet, will er sie vor der Veröffentlichung zunächst überprüfen. Schließlich fanden nicht lange zuvor in seinem Labor langwierige Diskussionen statt, ob eine angeblich aus Hirngewebe gewonnene phosphathal-

DAS ORIGINALPROTOKOLL: SO ISOLIERTE MIESCHER DIE DNA



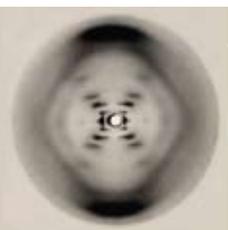
**Friedrich Miescher entwickelte** ein akribisches und langwieriges Verfahren zur Reinigung des Nucleins. Viele Schritte mussten bei unangenehm kalten Temperaturen durchgeführt werden, damit sich das Material nicht zersetzte. Zunächst wusch er eitergetränkte Binden mit einer verdünnten Natriumsulfatlösung aus, um die weißen Blutkörperchen zu extrahieren, die er dann durch ein grobes Baumwolltuch filterte. Nach einigen Stunden hatten sich die Zellen am Boden des Sammelgefäßes abgesetzt, und er untersuchte sie unter dem Mikroskop auf Unversehrtheit. Dann wusch er die Zellen mehrmals mit warmem Alkohol, der die Zellen aufbrach und einen Großteil der Lipide entfernte (a).

Um eine Lösung des proteinverdauenden Enzyms Pepsin zu gewinnen, wusch Miescher Schweinemägen mit verdünnter Salzsäure aus (b). Dieser Lösung setzte er die Zellen wiederholt für 18 bis 24 Stunden bei wärmeren Temperaturen aus. Es entstand ein graues, feinpudriges Sediment aus isolierten Zellkernen, die sich aus der schwach gelben Flüssigkeit absetzten (c). Um alle restlichen Lipidanteile zu entfernen, schüttelte er die Zellkerne mehrfach in Ether. Danach wusch er sie mit Wasser, gab Jodlösung hinzu und kontrollierte sie unter dem Mikroskop. Wenn sich die Kerne nicht anfärben ließen, waren die Proteine vollständig beseitigt (d).

Nach einer weiteren Reihe von Waschvorgängen mit warmem Alkohol war die Kernpräparation schließlich so sauber, dass Miescher mit seinen Untersuchungen beginnen konnte. Wenn er verdünntes Natriumkarbonat, also eine Lauge, zu den Kernen gab, quollen sie auf und wurden durchscheinend. Durch Hinzufügen von Säure erhielt er das Nuclein, einen unlöslichen, flockigen Niederschlag aus DNA (e).

1953

Rosalind Franklin und Maurice Wilkins schließen aus Röntgenanalysen, dass die Struktur der DNA einer regelmäßig wiederholten Helix entspricht.



ROSALIND FRANKLIN

1953

James Watson und Francis Crick entschlüsseln die molekulare Struktur der DNA: eine Doppelhelix, in der sich die Basen A und T sowie C und G gegenüberstehen.



COLD SPRING HARBOUR LABORATORY

1957

Francis Crick formuliert das zentrale Dogma, dass die Information der DNA über RNA in Proteine übersetzt wird, und vermutet, dass je drei Basen der DNA eine Aminosäure im Protein bestimmen.

1958

Matthew Meselson und Franklin Stahl beschreiben die Verdoppelung der DNA.

tige Substanz tatsächlich existiere oder nicht. Zudem soll Mieschers Arbeit in der Zeitschrift »Medicinish-chemische Untersuchungen« erscheinen, die Hoppe-Seyler selbst herausgibt. Man darf getrost davon ausgehen, dass er die hierfür vorgesehenen Manuskripte besonders streng prüft.

Miescher muss also Monate gespannten Wartens erdulden, bis Hoppe-Seyler seine Ergebnisse kontrolliert hat. Zusehends wird er unruhiger. Er möchte nämlich seine Habilitation an der Universität Basel einreichen, um dort eine Professur übernehmen zu können. Zudem befürchtet er, ein anderer Wissenschaftler würde das Nuclein ebenfalls entdecken und ihm mit der Veröffentlichung zuvorkommen.

**Ein Jahr gespannte Ungewissheit**

Wiederholt schreibt er an Hoppe-Seyler, um die Angelegenheit zu beschleunigen. Endlich, nach einem Jahr gespannter Ungewissheit, erreicht ihn im Oktober 1870 Hoppe-Seylers Antwort: Er könne Mieschers Ergebnisse zum Nuclein bestätigen und wolle dessen Artikel in der nächsten Ausgabe der Zeitschrift abdrucken. Der Brief beinhaltet auch Hoppe-Seylers eigene Forschungsergebnisse zum Nuclein, damit Miescher sie kommentieren kann.

Überraschenderweise schickt Miescher seine Anmerkungen umgehend an Hoppe-Seyler zurück. Einige Wochen später erhält er die Korrekturfahnen seiner ersten Veröffentlichung. Im Begleitbrief bemerkt Hoppe-Seyler, sie seien voller Druckfehler, da die Setzer Mieschers Handschrift kaum entziffern konnten. Anfang 1871 erscheint der Artikel schließlich, zusammen mit zwei weiteren: Ein anderer Student Hoppe-Seylers berichtet über den Nachweis von Nuclein in den – kernhaltigen – roten Blutkörperchen von Vögeln und Schlangen. Und der Meister selbst beschreibt seine Experimente, die Mieschers Forschungsergebnisse bestätigen.

Zu diesem Zeitpunkt lebt Miescher bereits wieder in seiner Heimatstadt Basel. Seine wissenschaftlichen Erfolge haben ihm den Ruf eines engagierten und fähigen Forschers eingebracht, so dass ihm die Baseler Universität eine Professur in Aussicht gestellt hat. Er reicht dort 1871 seine Habilitationsschrift ein und erhält im darauf folgenden Jahr, mit nur 28 Jahren, den Lehrstuhl für Physiologie. Miescher arbeitet in seiner neuen Position außergewöhnlich hart, oft bis an den Rand der Erschöpfung. Dabei treibt ihn nicht nur die Forscherleidenschaft an. Er möchte auch alle Gerüchte zerstreuen, er sei wegen seines familiären Hintergrunds berufen worden statt auf Grund wissenschaftlicher Leistungen.

In Basel nimmt Miescher auch die Erforschung des Nucleins wieder auf – nicht zuletzt deshalb, weil Hoppe-Seyler das zwar eigentlich gern selbst machen würde, Miescher jedoch den Vortritt lässt, sofern dieser wirklich weiter daran arbeitet. Miescher möchte jetzt das Nuclein noch genauer charakterisieren, doch die Arbeitsbedingungen in Basel sind sehr ungünstig, und er kommt nur langsam voran. In einem Brief an einen Freund klagt er: »Ich habe mich in den letzten 2 Jahren lebhaft nach den Fleischtöpfen des Tübinger Schlosslaboratoriums zurückgeseht, denn ich hatte gar kein Laboratorium und war (...) in einem kleinen Winkelchen des chemischen Laboratoriums geduldet, wo ich aber kaum mucksen konnte, da das kleine Zimmer mit Studenten schon mehr als überfüllt ist und zugleich der Professor der Chemie darin arbeitet.« Weiter schreibt er: »Sie können sich denken, was es heisst, durch die miserabelsten äusseren Umstände an der energischen Verfolgung von Sachen gehindert zu sein, die mir vielleicht nie mehr im Leben so schön unter die Finger kommen.«

Doch Miescher gibt nicht auf. Angeregt durch das Interesse seines Onkels an der Entwicklungsbiologie beginnt er, das Nuclein in



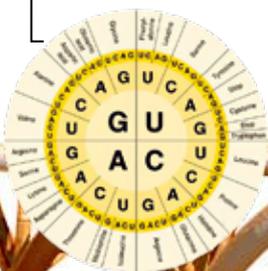
AG. FOCUS / SPL / LEONARD KINSBANK



MIT FOTOG. VON ALFONS RENZ, UNIVERSITÄT TÜBINGEN

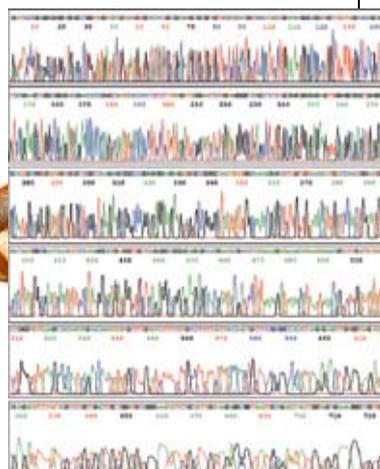
Die Universität Tübingen besitzt noch immer ein fast 140 Jahre altes Reagenzglas mit Nuclein (rechts), das Miescher während seiner Arbeiten an der Universität Basel aus Lachssperma isoliert hat. Moderne DNA-Isolate (links) bestehen aus langen, hellen Strängen.

**1961 – 1966**  
Der genetische Code wird geknackt.



**1983**  
Kary Mullis entwickelt die PCR (Polymerase Chain Reaction) zur Vervielfältigung von DNA im Reagenzglas.

**1990**  
Start der Sequenzierung des menschlichen Genoms



HUMAN GENOME PROGRAM, US DEPARTMENT OF ENERGY, OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY

**1995**  
Die vollständige DNA-Sequenz des Fadenwurms *C. elegans* wird veröffentlicht.



J. BERGER UND R. SOMMER, MPF FÜR ENTWICKLUNGSBIOLOGIE

MIT FREIL. GEN. VON RALF DÄHM



Der Titel von Mieschers erster Veröffentlichung »Ueber die chemische Zusammensetzung der Eiterzellen« lässt nicht erkennen, welch folgenreiche Entdeckung sie beschreibt (rechte Seite). Der Artikel erschien 1871 in Hoppe-Seylers Zeitschrift »Medicinisch-chemische Untersuchungen« (links). Miescher hatte erkannt, dass es sich bei der DNA um eine völlig neue Substanz handelte, und schrieb in seinem Artikel: »Wir haben vielmehr hier Körper sui generis, mit keiner jetzt bekannten Gruppe vergleichbar« (siehe hervorgehobener Text, rechts unten im Bild).

Eizellen und Spermien zu untersuchen. Schnell stellt er fest, dass sich aus Spermien, die überwiegend aus Zellkernen bestehen, große Mengen reinen Nucleins isolieren lassen. Und für dieses Unterfangen ist Basel geradezu perfekt: Die Stadt liegt am Rhein, in dem damals alljährlich große Lachsschwärme flussaufwärts zu ihren Laichgründen wandern – was Miescher Zugang zu frisch gefangenem Fisch in Hülle und Fülle verschafft. Seit Herbst 1871 gewinnt er daher sein Nuclein aus Lachssperma und entwickelt im Lauf der Zeit immer raffiniertere Reinigungsverfahren.

Wie in Tübingen muss Miescher bei niedrigen Temperaturen arbeiten, da das Molekül sonst zu zerfallen droht. Schließlich gibt es noch keine Kühlräume, und so kann er nur in den Wintermonaten Nuclein präparieren. Oft steht er mitten in der Nacht auf, fängt im Rhein Lachse und bringt sie ins Labor, woraufhin er während der frühen Morgenstunden die DNA bei weit offenen Fenstern und klirrender Kälte isoliert. So mühsam diese Arbeiten auch sind, sie verschaffen dem Forscher genügend hochreines Nuclein für seine Untersuchungen. Damit gelingt es ihm unter anderem, den Phosphorgehalt der Substanz beeindruckend präzise zu ermitteln.

**Rätsel Vererbung**

1874 veröffentlicht er seine Beobachtungen zum Nuclein im Sperma unterschiedlicher Wirbeltiere. Zu dieser Zeit bemühen sich viele Wissenschaftler herauszufinden, wie die Embryonalentwicklung abläuft und auf welchem Weg erbliche Merkmale weitergegeben werden. Miescher kommt in seinem Artikel den Zusammenhängen bereits sehr nahe: »Sofern wir überhaupt annehmen wollten, dass eine einzelne Substanz (...) die spezifische Ursache der Befruchtung sei, so müsste man ohne Zweifel vor Allem an das Nuclein denken.« Doch letztlich verwirft Miescher seine Idee wieder, weil er sich nicht vorstellen kann, dass ein und dieselbe Substanz eine solche Vielfalt von Tierarten hervorgebracht haben soll: »Unterschiede im chemischen Bau der Moleküle werden vorkommen, (...) aber nur in begrenzter Mannigfaltigkeit.« Nach Mieschers Meinung würden sie nicht einmal ausreichen, um die Unterschiede zwischen den Individuen einer Spezies zu erklären – ganz zu schweigen von der enormen Diversität verschiedener Arten. Stattdessen seien mechanische Reize durch die Spermienbewegung sowie elektrochemische Vorgänge, wie sie bei der Erregung von Nerven und Muskelfasern ablaufen, für die Entwicklung einer befruchteten Eizelle verantwortlich.

Immerhin entwickelt Miescher eine Hypothese zur Vererbung, die zwar im Detail nicht

zutrifft, dem tatsächlichen Speicherprinzip genetischer Informationen in der DNA jedoch durchaus ähnelt. Demnach stecke die Erbinformation in unterschiedlichen Versionen von Molekülen, bei denen bestimmte Atome räumlich anders angeordnet sind: den so genannten Stereoisomeren. Große organische Moleküle wie Proteine können eine enorme Zahl von Stereoisomeren bilden, denn sie enthalten viele »asymmetrische Kohlenstoffatome«, an denen jeweils vier verschiedene Atome oder Atomgruppen hängen. Bei Letzteren sind dadurch zwei räumliche Anordnungen möglich, die sich zueinander spiegelbildlich verhalten. Ein Molekül mit nur 40 asymmetrischen Kohlenstoffatomen besitzt bereits 2<sup>40</sup> mögliche Stereoisomere – also mehr als eine Billion. Damit müsste sich laut Miescher die Erbinformation für sämtliche Lebensformen kodieren lassen. Er spekuliert zudem, einzelne Fehler in den Erbmolekülen würden sich nicht auf die Entwicklung eines Embryos auswirken, weil die beiden bei der Befruchtung verschmelzenden Keimzellen fehlende Informationen gegenseitig ergänzten. Diese Idee nimmt eine heute allgemein bekannte Tatsache vorweg: dass die intakte Genkopie eines Elternteils Defekte in der anderen ererbten Kopie kompensieren kann.

Nach und nach wendet sich Miescher anderen Forschungsgebieten zu. Um 1875 beginnt er beispielsweise, die körperlichen Veränderungen der Lachse während ihrer Wanderung vom Meer zu den Laichgründen im Rhein zu studieren. Wieder steht Miescher den ganzen Winter über mitten in der Nacht auf, um in den frühen Morgenstunden Lachse zu fangen. Tausende bringt er ins Labor, vermisst und wiegt sie, untersucht ihre Muskulatur, ihre inneren Organe und ihr Blut. Besonders fasziniert ihn, dass die Geschlechtsorgane dieser Fische auf Kosten der Muskelmasse gewaltig wachsen, bis sie ein Viertel des Gesamtgewichts der Tiere ausmachen.

Auf Grund seiner Untersuchungen zum Stoffwechsel der Lachse beauftragt die Schweizer Regierung Miescher im August 1876, ein Gutachten über die Ernährung der Häftlinge des Baseler Gefängnisses zu verfassen. Er ist keineswegs erfreut über diese Aufgabe, die ihn mehrere Monate kostet, doch zeigen sich die Behörden so beeindruckt von seiner Arbeit, dass ähnliche Anfragen von weiteren Strafvollzugsanstalten kommen. Sein Onkel macht sich später darüber lustig: »Jedes Zuchthaus wollte seinen besonderen Speisezettel haben.« Damit nicht genug: Sowohl Bildungsinstitute als auch verschiedene mit Ernährungsfragen befasste Einrichtungen suchen Mieschers Rat, bis er die Nase voll hat: »Ich habe mich zu

**2001**

Die vollständige Sequenz des menschlichen Genoms wird veröffentlicht.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / MEGANIM

grün gemacht, jetzt fressen mich die Ziegen«, murrte er. »Enquête über schweizerische Volksernährung, Kochbuch für Arbeiter, Nährstofftafeln für die Landesausstellung, Controversen mit der Chamer Milk Company, kurz ich bin auf dem besten Wege, zum Zionswächter für die Mägen sämtlicher 3 Millionen Eidgenossen zu werden.«

### Tod in Davos

Da stellt sich Miescher doch lieber einer neuen wissenschaftlichen Herausforderung und gründet 1885 das erste anatomisch-physiologische Institut in Basel. Als erster Direktor des Instituts sorgt er für eine anregende Forschungsatmosphäre und gewinnt mehrere anerkannte Feinmechaniker als Mitarbeiter, die neue Apparate und Instrumente für physiologische Untersuchungen von bis dahin unerreichter Präzision entwerfen. Miescher untersucht hier die Veränderungen im Blut beim Aufenthalt in unterschiedlichen Höhenlagen und entdeckt, dass nicht etwa der Sauerstoffgehalt des Bluts die Atmungsfrequenz reguliert – sondern die Kohlendioxidkonzentration.

Doch die vielfältigen Verpflichtungen zehren mehr und mehr an dem Forscher. Arbeitsbesessenheit und Perfektionszwang erlauben ihm kaum noch, sich zu erholen. Er schläft immer weniger, vernachlässigt gesellschaftliche Aufgaben und arbeitet sogar in seinem Urlaub weiter. Erschöpft und ausgelaugt wird er körperlich zusehends schwächer und erkrankt schließlich in den frühen 1890er Jahren an Tuberkulose. Miescher muss seine Arbeit aufgeben und zieht in ein Sanatorium in Davos in den Schweizer Alpen. Dort versucht er ein letztes Mal, sein Lebenswerk einschließlich der Arbeiten zum Nuclein zusammenzufassen. Doch seine Kraft reicht nicht mehr aus, und Friedrich Miescher stirbt 1895 im Alter von nur 51 Jahren.

Wilhelm His veröffentlicht posthum die gesammelten Artikel seines Neffen. In der Einführung schreibt er: »Die Würdigung Miescher's und seiner Arbeiten wird mit der Zeit nicht abnehmen, sondern wachsen, und die von ihm gefundenen Thatsachen und gedachten Gedanken sind Keime, denen noch eine fruchtbringende Zukunft bevorsteht.« Wilhelm His ahnt nicht, wie sehr sich seine Worte eines Tages bewahrheiten sollten – zumindest die zweite Hälfte des Satzes.

Mieschers Name ist heute allerdings viel weniger geläufig, als die Bedeutung seiner Entdeckung erwarten ließe. Schon zu seinen Lebzeiten wird das Nuclein eher mit anderen Forschern in Verbindung gebracht. So ändert beispielsweise der deutsche Histologe Richard Altmann (1852–1900) 1889 die Bezeichnung

Nuclein in Nucleinsäure, worüber Miescher sich sehr ärgert, da er den sauren Charakter der Substanz immer ausdrücklich betont. Auch sorgt der introvertierte Miescher nicht dafür, dass seine Entdeckungen weithin bekannt werden. Er tauscht sich nur mit wenigen Kollegen aus und hat kaum eigene Studenten. Auf Grund seiner inneren Unsicherheit und Neigung zum Perfektionismus wiederholt er immer wieder Experimente und verzögert so die Veröffentlichung seiner Ergebnisse.

Die wesentlichste Ursache für die mangelnde Würdigung Mieschers dürfte jedoch die lange Zeit sein, die verging, bis die Bedeutung der von ihm entdeckten Substanz wirklich erkannt wurde. Noch knapp 50 Jahre nach Mieschers Tod glauben die meisten Wissenschaftler, dass die aus nur vier verschiedenen Bausteinen bestehende DNA zu simpel aufgebaut sei, um alle für die Vielfalt des Lebens notwendigen Informationen zu enthalten.

Erst 1944 weist der kanadische Mediziner Oswald T. Avery (1877–1955) zusammen mit seinen Kollegen Colin MacLeod (1909–1972) und Maclyn McCarty (1911–2005) nach, dass tatsächlich die DNA die Trägerin der Erbinformation ist. Experimente der amerikanischen Biologen Alfred Hershey (1908–1997) und Martha Chase (192–2003) bestätigen dies 1952. Ein Jahr darauf gelingt es dem Forscherduo Francis Crick (1916–2004) und James Watson (geboren 1928) auf Grundlage der Röntgenstrukturanalysen von Rosalind Franklin (1920–1958) und Maurice Wilkins (1916–2004), die Struktur des DNA-Moleküls zu entschlüsseln: Die Doppelhelix ist entdeckt.

Damit beginnen sich die Einzelteile des Puzzles »DNA« allmählich zu einem stimmigen Gesamtbild zusammenzufügen. Denn die Doppelhelixstruktur zeigt auch auf, wie vor jeder Zellteilung eine exakte Kopie der DNA entstehen kann und wie die Zelle die genetischen Informationen in die entsprechenden Proteine umsetzt. Mitte der 1960er Jahre schließlich knacken die Biochemiker Robert W. Holley (1922–1993), Har Gobind Khorana (geboren 1922) und Marshall W. Nirenberg (1927–2010) den genetischen Code – fast 100 Jahre nach Mieschers Experimenten.

Jetzt können Wissenschaftler endlich die Sprache lesen, in der die Erbinformation notiert ist. Diese Durchbrüche begründen ein völlig neues Fachgebiet, das in den folgenden Jahrzehnten die Biowissenschaften einschließlich der Medizin revolutioniert: die Molekulargenetik. Und auch heute noch, bald 150 Jahre nach Mieschers ersten Experimenten, bietet das Nuclein ein weites Betätigungsfeld für Forscher. ◀



MIT FRIEDRICH VON RALF DAHM

**Friedrich Miescher zusammen mit seiner Frau Maria Anna Rüscher (1856–1946), mit der er drei Kinder hatte**



**Ralf Dahm** ist promovierter Biochemiker und leitet das Wissensschäftsmanagement am spanischen Krebsforschungszentrum CNIO in Madrid. Daneben hat er eine Gastprofessur an der Universität in Padua inne. Schon zu seinen Studienzeiten in Tübingen faszinierte ihn dessen mittelalterliches Schloss, das eine wichtige Rolle in der Geschichte der Biowissenschaften spielte.

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

**Dahm, R.:** From Discovering to Understanding: Friedrich Miescher's Attempts to Uncover the Function of DNA. In: EMBO Reports 11(3), S. 153–160, 2010.

**Dahm, R.:** Discovering DNA: Friedrich Miescher and the Early Years of Nucleic Acid Research. In: Human Genetics 122, S. 565–581, 2008.

**Lagerkvist, U.:** DNA Pioneers and Their Legacy. Yale University Press, New Haven 1998.

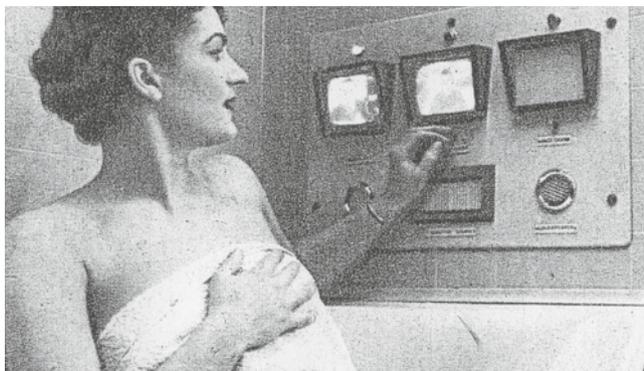
Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/1034792](http://www.spektrum.de/artikel/1034792).



## Kommandozentrale Badewanne

»Wer in der Badewanne sitzt, kann desungeachtet auf Vorder- und Hintertür aufpassen und dabei noch dem Fernseh-

programm zuschauen. Zwei Kontrollbildschirme zeigen ein Bild der Personen, die an der Vorder- oder Hintertür klingeln. Über einen Telefonverstärker kann sich der Badewannenbewohner auch mit den Gästen unterhalten. Er bleibt dabei inkognito. Auf dem dritten Bildschirm schließlich erscheint ein normales Fernsehprogramm.« *Populäre Mechanik*, 5. Jg., Bd. 10, Heft 7, Nr. 58, Juli 1960, S. 60



Volle Kontrolle dank Fernsehtechnik

## Enttäuschte Hoffnung

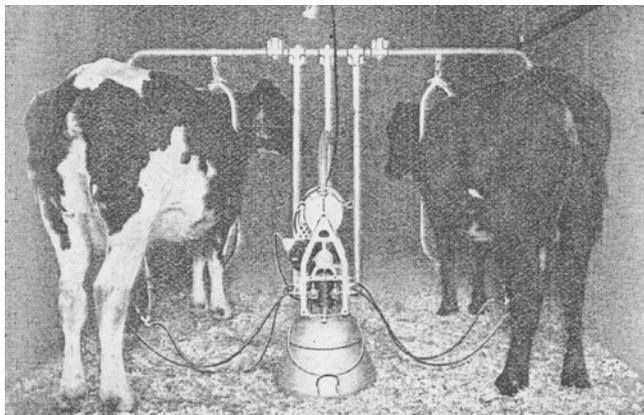
»Nachdem heute größere Erfahrungen vorliegen, kann man sagen: Ebenso wie die Antibiotika haben auch die Steroide (Corticoide) nicht die vereinfachende Sicherheit gebracht, die erwartet wurde. Übereinstimmend mit experimentellen Befunden steht die klinische Erfahrung, wonach das chronische Ekzem auf Steroidsalben weniger gut anspricht. Auch an der Haut besteht das Behandlungsprinzip darin, die entzündlichen Erscheinungen zu dämpfen und nicht in einer eigentlichen Heilung. Wenn die dämpfende Wirkung plötzlich entfällt, sind Rückfälle zu erwarten.« *Umschau*, Heft 13, Juli 1960, S. 403

## Brüder im All?

»Bedenken wir, wieviele Billionen von Fixsternen und Sonnen, die meist auch Planeten haben werden, existieren, so erscheint es wahrscheinlich, daß auch anderswo im Weltall Leben existiert. In den USA will man versuchen, mit eventuellen intelligenten Wesen in Verbindung zu treten, indem man auf einem Berg in West-Virginia mit Hilfe einer 25-m-Parabol-Antenne die elektromagnetischen Wellen aus dem Weltenraum nach Botschaften, also künstlich erzeugten Signalen, absucht. Zunächst stellt sich hier das Problem, die sicherlich sehr schwachen Signale vom allgemeinen »Geräusch« des Radiohimmels zu trennen. Auch ist die große Entfernung zu bedenken.« *Kosmos*, 56. Jg., Nr. 7, Juli 1960, S. 274

## Schöner Melken

»Die Liberty Cow-Milker Co. in Hammond fabriziert einen elektrisch betriebenen Kuhmelkapparat. Derselbe besteht aus einem Bottich, auf dessen abnehmbarem Deckel sich eine kleine elektrisch betriebene Luftpumpe befindet. Durch die Pumpe wird der abgeschlossene Raum des Bottichs, der durch mehrere an Schläuchen befestigte Saugmundstücke mit den Zitzen der Euter verbunden wird, evakuiert. Die Saugwirkung ist die gleiche wie beim Melken mit der Hand. Die Vorteile des Apparates liegen in zwei Richtungen: Bekanntlich leidet die Landwirtschaft an Leutenot. Ein weiterer Vorzug liegt auf dem Gebiet der Hygiene.« *Die Umschau*, 14. Jg., Nr. 31, 30. Juli 1910, S. 619



Eine Melkmaschine soll keimärmere Milch produzieren.

## Biotop Friedhof

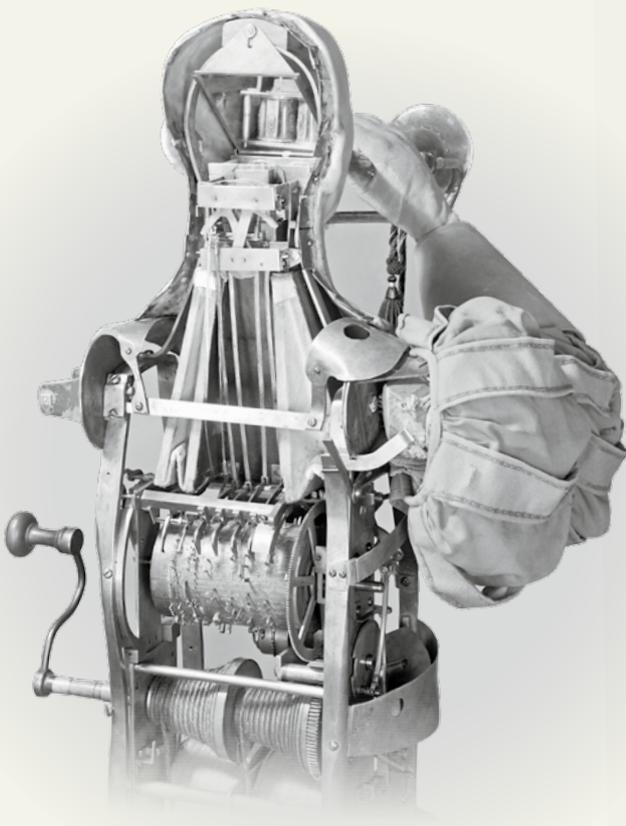
»Was ist das nicht für ein herrliches Blühen und Wachsen von Blumen und Kräutern auf alten, verfallenen Grabhügeln. Wie tönt das Schmettern der Vögel nicht durch die stillen Wege. Und dort kommt gar ein wildes Kaninchen aus seinem Bau in einem verfallenen Grabhügel. Wer kann wohl stumm bleiben angesichts dieser kleinen Welt. Und wer kann ruhig zusehen, wenn



man solch prächtige alte Kirchhöfe verwüstet, um Raum für neue Gräber zu schaffen. Für neue Friedhöfe finden sich schon andere Plätze. Aber erhaltet uns hastenden Menschen von heute jeden Ort, an dem Frieden noch seine Heimat hat.« *Kosmos*, 7. Jg., Heft 7, Juli 1910, S. 272

## Gift fürs Herz

»Die Digitalis, das wichtigste Herzmedikament, übt neben der Herzwirkung manchmal einen ungünstigen Einfluß auf die peripherischen Gefäße aus und hat auch noch den Nachteil, daß einzelne Patienten darauf mit Magenbeschwerden und Erbrechen reagieren. Bei Patienten, die das Digitalisin fus per os schlecht vertragen, wird man mit Vorteil Digitalisklismen (*Einläufe, Anm. d. Red.*) anwenden. Bei inkompenzierten Herzfehlern wird man auch eine bestimmte Diät vorschreiben, und vielfach hat sich eine strenge Kur mit Milch zur ausschließlichen Nahrungs- und Flüssigkeitsaufnahme bewährt.« *Deutsche Medizinische Wochenschrift*, Nr. 28, 14. Juli 1910, S. 1352



BEIDE FOTOS: DEUTSCHES MUSEUM

EXPONAT DES MONATS

## Die Geburt der Androiden

Vor 200 Jahren konstruierte der Dresdner Musikautomatenbauer Friedrich Kaufmann einen mechanischen Trompeter.

»Der Mechanikus Kaufmann hat eine Maschine, einen Trompeter verfertigt, der auf einer natürlichen Trompete, vermöge der künstlichen Vorrichtung der Mundstücke, nicht nur Fanfaren und dergl. bläst, sondern auch Doppeltöne erzeugt, und zwar so deutlich und gleich stark im Ton, dass man darauf schwören sollte zwei Trompeten zu hören.« Kein Geringerer als der Komponist Carl Maria von Weber äußerte sich derart lobend über die Fertigkeit des Musikautomatenbauers Friedrich Kaufmann (1785–1866), den er persönlich kannte.

Nicht minder beeindruckt waren sicher auch jene Zuschauer, die 1810 erlebten, wie die Figur eines hochgewachsenen Mannes eine Barocktrompete mit der rechten Hand langsam zum Mund führte und einige Töne darauf spielte. Dabei mag eine gehörige Portion Grusel das Vergnügen noch gesteigert haben, denn es war die hohe Zeit des Schauerromans (1818 veröffentlichte Mary Shelley

ihr Werk »Frankenstein oder Der moderne Prometheus«).

Kaufmann kombinierte die Technik der Spieluhr mit jener der Orgel: Mit zwei Handkurbeln wurden zwei Spiralfedern aufgezogen, die – wie die ganze Mechanik – unter dem leuchtenden Gewand des Androiden verborgen waren. Eine dieser Federn trieb zwei Stifwalzensysteme an, die wiederum die Melodie und den Rhythmus steuerten – vergleichbar den Walzen einer mechanischen Spieluhr. Die zweite Feder betrieb zwei Schöpfbälge, die einen konstanten Luftstrom erzeugten. Dieser Luftstrom wurde durch ein ausgeklügeltes, von der Stifwalze gesteuertes Ventilsystem so moduliert, dass er nacheinander zwölf metallene Zungen in unterschiedliche Schwingung versetzte (das Prinzip der Orgel). Aus dem Schalltrichter der Trompete erklangen entsprechende Töne.

Heute gilt der »mechanische Trompeter« als einer der bekanntesten Musik-

automaten und zudem als Vorläufer des Roboters. Seit 1988 gehört er deshalb zu den Paradestücken der Abteilung »Informatik« des Deutschen Museums. Seine Trompete erklingt allerdings schon lange nicht mehr: Das Leder der Bälge ist zu spröde geworden, um noch einen ausreichenden Luftstrom hervorzubringen. Der ehemalige Hauptabteilungsleiter Otto Krätz erinnert sich zwar daran, vor etwa 50 Jahren noch einige Töne gehört zu haben, doch die hätten schon damals nur noch recht kläglich geklungen. Sogar künstliche Menschen altern also – was ja irgendwie auch tröstlich ist.

Die Autorin **Sabrina Landes** ist Historikerin; sie leitet die Redaktion der Zeitschrift »Kultur & Technik«, die vom Deutschen Museum herausgegeben wird.

[www.deutsches-museum.de/information/publikationen/kultur-technik/](http://www.deutsches-museum.de/information/publikationen/kultur-technik/)



AKG BERLIN / WERNER FORMAN

In der Vorstellung der Ägypter fuhr die Sonne während der Nacht auf einer Barke durch die Unterwelt.

# Die zwei Gesichter der Zeit Nehheh und Djet

Anders als im Abendland nahm man die Zeit im Alten Ägypten nicht als eine gerichtete Größe wahr, die unablässig auf die Zukunft zuläuft, sondern als ein Phänomen, dem zwei Aspekte eigen sind: zyklische Wiederholung und ewige Dauer.

FOTOLIA / ANDRÉ KLAASSEN



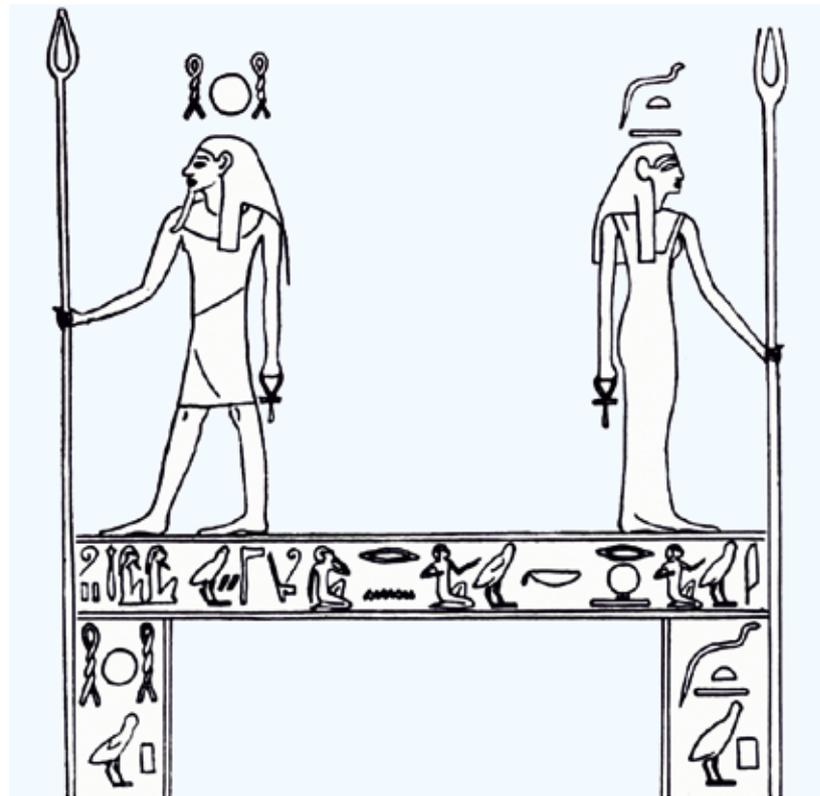
Periodische Phänomene wie der Wechsel zwischen Tag und Nacht und solche scheinbar ewiger Dauer prägten das dualistische Zeitverständnis Altägyptens; die Pyramiden symbolisierten Stein gewordene Zeit.

Von Jan Assmann

**D**as Heute ist morgen schon Vergangenheit. Der griechische Philosoph Heraklit formulierte deshalb im 5. Jahrhundert v. Chr.: »Wir steigen in denselben Fluss und doch nicht in denselben.« Vergänglichkeit gebiert Zeit, und diese hat offenbar eine Richtung. Weil wir uns an Vergangenes erinnern können, nicht aber an Zukünftiges, weil jedes Phänomen als Wirkung einer zurückliegenden Ursache in Erscheinung tritt, unterteilen wir die Zeit in Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft. Diese Gliederung ist bereits im Tempussystem der meisten indogermanischen Sprachen angelegt und erscheint uns so natürlich, dass wir sie gern für universal halten.

Einige Kulturen entwickelten aber durchaus andere Vorstellungen, darunter auch die des Alten Ägypten. Was in unserer Sprache die Dreiheit von Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft, das war in der ägyptischen die Zweiheit von Neheh (sprich »Nechech«) und Djet (»Dschet«). Diese bedeuteten nicht auseinander hervorgehende Phasen, sondern Aspekte, die gemeinsam die Zeit in ihrer Gesamtheit bezeichneten. Aspekte beziehen sich auf zeitliche Vorgänge beziehungsweise Zustände als abgeschlossene (»Perfektiv«) oder unabgeschlossene (»Imperfektiv«). Dem perfektiven Aspekt entsprach Djet als Zeit der unwandelbaren Dauer des Vollendeten. Wenn in der Bibel Gott mit den Worten gepriesen wird: »1000 Jahre sind vor Dir wie der Tag, der gestern vergangen ist«, dann lesen wir in zwei ägyptischen Hymnen: »Die Djet steht dir (Amun) vor Augen wie der Tag, der gestern vergangen ist.« Dem Imperfektiv entsprach Neheh, die Zeit als unabschließbare kreisläufige Bewegung immer wiederkehrender Tage, Monate, Jahreszeiten, Jahre und größerer Perioden bis hin zur Sothisperiode von 1460 Jahren (Spektrum der Wissenschaft 12/2008, S. 78).

Natürlich besitzt die Dreiteilung der Zeit in Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft eine gewisse natürliche Evidenz, unabhängig davon, ob sie im Tempussystem der Sprache, in der wir denken, angelegt ist oder nicht. Gleiches gilt auch für ihre Zweiteilung in die Aspekte »Verlauf« und »Vollendung«. Zu den wenigen indogermanischen Sprachen, die für den ersten Aspekt eine grammatische Form anbieten, gehört das Englische mit dem progressiven Verb: Dem *Im coming* entspräche im Deutschen ein nicht korrektes, allerdings umgangssprachlich nicht ungebräuchliches »Ich



SPÉKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: ALEXANDRE PIANOFF, »LES CHARPELLES DE TOUTANKH-AMON«, IN: MIFAO, Bd. 72

bin im Kommen«. Die altägyptische Sprache hingegen unterstreicht den Wert, den man der Aspektopposition beimaß, und legte ihn dem Verbalsystem zu Grunde. Für Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft behalf man sich mit Umschreibungen. So gab es ein Verb mit der Bedeutung »etwas in der Vergangenheit getan haben«, die Zukunft wurde mit Hilfe der Präposition »zu, nach, in Richtung auf« ausgedrückt: »Ich werde kommen« sprach sich dann als »Ich bin zum Kommen«.

## Personifikation des Werdens und Vergehens

Zum Verständnis ägyptischer Begriffe lohnt es sich oft, auf Wortbildung, Etymologie und vor allem Schreibung, also Etymografie, zu achten. Das ist besonders für Neheh aufschlussreich. Der Stamm des Wortes ist »h-h« und bezeichnet Begriffe wie »suchen«, »fluten« und »Millionen«. Auf den ersten Blick haben diese wenig miteinander und erst recht nicht mit der Zeit gemein, aber allen haftet die Vorstellung des Unendlichen und Unabsehbaren an. Von diesem Stamm sind auch die Namen Huh und Hauhet gebildet, Personifikationen des Chaos, der endlosen Noch-nicht-Zeit, von denen noch die Rede sein wird. Die Reduplikation des »h« assoziiert Iterativität und Reflexivität, verweist also auf eine in sich kreisende,

**Neheh (links) und Djet (rechts) stützen den Himmel – erst beide zusammen brachten gemäß der altägyptischen Kosmologie die Zeit und damit auch die Ordnung der Welt hervor (Umzeichnung eines Details auf dem goldenen Schrein Tutankhamuns; über den Köpfen stehen jeweils die Namenshieroglyphen).**

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

## SERIE: PHÄNOMEN ZEIT

### TEIL I: ZEITWAHRNEHMUNG IN ALTÄGYPTEN

- Teil II: Vergangenheitskult in Babylonien
- Teil III: Die Entdeckung des Fortschritts
- Teil IV: Die Zeit in den Naturwissenschaften

**NEITHS RÄTSEL**

»Ich bin alles, was da war, ist und sein wird.« Diese Inschrift trug ein Standbild der Göttin Neith in der Stadt Saïs. Entspricht das nicht abendländischen Zeitbegriffen? Des Rätsels Lösung: Die spätantiken griechischen Gelehrten Plutarch und Proklos haben diesen Text überliefert und dachten dabei in ihren Kategorien. Vermutlich lautete der Text eher: »Ich bin, was da ist und was da noch nicht ist« – diese Formel vom Seienden und Nichtseienden ist hundertfach belegt.

sich unaufhörlich wiederholende Bewegung. Neheh schrieb man zudem mit der Sonne als »Determinativ« (Determinative sind Zeichen, die sich nicht auf Laute, sondern Sinnklassen beziehen, im Fall der Sonne auf die Sinnklasse »Zeit«). Dieses Determinativ findet sich bei fast allen Zeitbegriffen Altägyptens, bei »Augenblick«, »Stunde«, »Tag«, »Jahreszeit«, »Jahr«, »Morgen«, »Gestern«. Diese Begriffe gehören zur Sinnklasse »Zeit«, genauer gesagt zur sich bewegenden Werdezeit Neheh. Und was wäre dafür als Determinativ geeigneter gewesen als die Sonne, glaubte man doch, dass ihr Auf- und Untergehen diese Art von Zeit erst hervorbrachte und alles Werden und Vergehen letztendlich vom Sonnenlauf abhing.

Diese zyklische Zeit manifestierte sich in den Augen der Ägypter tagtäglich und überall: im An- und Abschwellen des Nils, dem Wachsen und Welken aller Pflanzen, den Wanderungen der Zugvögel im Wechsel der Jahreszeiten, im Zyklus von Geburt und Tod, Reifen und Altern, am Firmament durch den Lauf der Gestirne, dem Zu- und Abnehmen des Mondes, an Begräbnis und Thronbesteigung des Königs. Kurz: Alles, was den ägyptischen Menschen umgab, ebenso wie die Bio-rhythmik seines eigenen Daseins offenbarte das Wirken des Neheh.

Das Wort Djet dagegen wurde mit einem ganz anderen Determinativ versehen: Es stand für Land und Erde als den Inbegriffen des Festen, Dauernden. Djet bezeichnete also eine Zeit, in der das Gewordene und Vollendete ruhte. Die beiden Begriffe ergänzten sich zu einem umfassenden Gesamtbegriff von Zeit oder Ewigkeit, auch hinsichtlich des Wortgeschlechts: Neheh, die bewegte Zeit, ist männlich, Djet, die Zeit der Dauer, ist weiblich.

Bei meinem ersten Besuch in Theben vor nunmehr 43 Jahren fand ich einen Hymnus in zwei Gräbern des 12. Jahrhunderts v. Chr., der die zwei Aspekte in den Kontext ägyptischer Kosmologie stellte.

*»Seid begrüßt, Neheh und Djet,  
die ihr den Himmel gründetet auf seinen  
Stützen,  
die ihr den Himmel schuft und ihn auf seinen  
Grenzen befestigtet,  
um die Ba's der Götter in ihn hineinzusetzen,*

*damit Re aufgehe und als Mond erglänze  
auf den Armen von Huh und Hauhet,  
auf deren Hand Neheh,  
in deren Faust Djet ist.*

*Neheh kommt verjüngt,  
den Nil heraufführend, aus seiner Höhle,  
um Menschen und Götter am Leben zu erhalten;  
der (Morgen für) Morgen früh aufsteht, um die  
Jahre zu gebären  
in Ewigkeit und Ewigkeit.  
(Theben) währ, indem es gegründet ist  
auf den Armen von Neheh und Djet.  
Re geht darin auf,  
seine Neunheit verwirklicht die Ma'at und  
vernichtet das Unrecht,  
(gibt Gottesopfer den Göttern)  
und Totenopfer den Verklärten.«*

Neheh und Djet stemmten den Himmel hoch empor über die Erde. Will heißen: Die Zeit erschuf den Raum. Das aber ermöglichte erst die Fahrt des Re, der den Himmel als Sonne und – in diesem Hymnus – interessanterweise auch als Mond überquert. So entstanden Tage, Monate, Jahreszeiten und Jahre, so wurde Zeit messbar. Das ägyptische Wort für »Jahr« heißt: »das sich verjüngende«, daher kam Neheh verjüngt, wenn er mit der Nilüberschwemmung ein neues Jahr aus sich entließ – in der Flussoase Ägypten markierte das Hochwasser den Beginn eines neuen Jahreszyklus. Die Trennung von Himmel und Erde legte aber auch eine Distanz zwischen Göttern und Menschen. Diese zwang dazu, Tempel zu bauen, Bilder zu schaffen, Riten zu entwickeln und Opfer darzubringen, um die Verbindung mit

Mit monumentalen Grabanlagen wie diesem Totentempel der Pharaonin Hatschepsut (15. Jahrhundert v. Chr.) versuchten die Herrscher Ägyptens Teil der Djet, der Ewigkeit, zu werden.





Das ägyptische Totenbuch zeigte im 17. Kapitel eine spezielle Variante, Neheh und Djet darzustellen: Zwei Löwen flankieren die Sonne, der eine blickt zum Gestern, der andere zum Morgen.

den fernen Göttern nicht abreißen zu lassen. Daher ist in der letzten Strophe vom Tempelkult die Rede. Und wie der Kosmos Merkmale der Djet aufwies, äußerte sie sich auch in der menschlichen Kultur. Steinernen Monumente realisierten die Djet als unwandelbare Dauer.

### Die Ordnung bewahren

Mit diesem Hymnus sind wir schon tief in die Frage nach der kulturellen Ausgestaltung der Zeit im Alten Ägypten eingedrungen, genauer gesagt: nach den religiösen Vorstellungen. Neheh, die zyklische Zeit, war die Zeit des Sonnengottes. Sie wurde mit dem Begriff des Werdens assoziiert, dessen Schriftzeichen ein Skarabäus war, das zentrale Heilssymbol der ägyptischen Theologie. Nicht das Sein, sondern das Werden stand im Zentrum des Denkens.

Neheh war daher auch die Zeit des Kults. Jedweder Ritus diente in allererster Linie der Konstruktion und Inanghaltung von Neheh-Zeit, jeder Kult hatte den Charakter eines ritualisierten Kalenders. Wie etwa in Mesopotamien auch beobachteten Spezialisten den Himmel, doch nicht um Auffälligkeiten zu entdecken, die als Zeichen verstanden wurden, aus denen sich die Zukunft vorhersagen und auf diese Weise bewältigen ließ. In Ägypten galt die auf den Kosmos gerichtete Aufmerksamkeit nicht den Ausnahmen, sondern den Regeln. In der Regelmäßigkeit seiner zyklischen Prozesse offenbarte sich dem Ägypter die Göttlichkeit des Kosmos. Kalender zum Sonnenjahr oder zu den Phasen des Mondes waren in allererster Linie Instrumente, um die Zeit zu ordnen und kultisch in Gang zu halten.

Ein schönes Beispiel dafür ist das Stundenritual, eine in allen Sonnenheiligtümern des Landes stündlich durchgeführte Lobpreisung des Sonnenlaufs. Dabei ging es darum, Re und alle beteiligten Götter in ihrem unausgesetzten Kampf gegen Stillstand und Auflösung zu unterstützen. Ohne solche Bemühung, so die Überzeugung, würde die Sonne nicht vorankommen.

Auch die Tagewählerei-Kalender (Hemero-logien) illustrieren den Neheh. Jeden Tag des Jahres verbanden sie mit einem mythischen Ereignis und assoziierten ihn so mit einer von drei Qualitäten: gut, neutral oder unheilvoll. Als immer währende Kalender waren sie aber nicht auf einmalige und unvorhergesehene Ereignisse eingerichtet – also auf das, was wir unter Geschichte verstehen würden. Als bedeutungsvoll und daher mit Zeichencharakter ausgestattet galt nur, was sich zyklisch wiederholte. Was hingegen aus dem Rahmen fiel – und in anderen Kulturen als Omen gelten mochte –, verlor aus Sicht des Ägypters jeden Sinn. Die kalendarische Zeit war also kein leeres Gefäß, in das unablässig Ereignisse einströmten, sondern ein bereits prall mit Sinn erfülltes Programm, das unablässig rituell vollzogen wurde, um den Zustrom der Ereignisse abzuwehren. Was sich dann trotzdem ereignete und was wir heute »Geschichte« nennen würden, hatte sich in diesen Rahmen einzufügen.

Man kann dieses Konzept »Gegenwartsbewältigung« nennen (im Unterschied zur mesopotamischen »Zukunftsbewältigung«, siehe auch den Beitrag im folgenden Heft). Um die Gegenwart zu bewältigen, musste eine heilige Ordnung Tag für Tag, Stunde für Stunde bewahrt werden.

Auch deshalb sucht man in altägyptischen Texten vergebens nach größeren Retrospektiven. Die Schreiber fixierten nur einzelne Ereignisse, erachteten dabei aber das Feiern eines Festes als ebenso würdig wie das Errichten von Bauwerken oder den Sieg über einen Feind. Alles schrieb sich in die Form des Kalenders ein, welche die Zeit rhythmisierte, Kontinuität stiftete, Ordnung bewahrte und einen Sinnhorizont bot, innerhalb dessen man sich orientieren und identifizieren konnte.

Eine als Buch der Himmelsgöttin Nut bekannte Kosmologie beschrieb den Sonnenaufgang folgendermaßen: »Er (der Sonnengott) entsteht, wie er entstand beim ersten Mal in der Erde des ersten Males.« Und deshalb bedeutete es nicht das Ende, wenn Re am Ende

Jedweder Ritus diente der **Konstruktion und Inanghaltung** von Neheh-Zeit, jeder Kult hatte den Charakter eines ritualisierten Kalenders

des Tageszyklus starb, weil er in die Erde einging, aus der er einst entstand, und so einen Zyklus vollendete, der nur der Übergang zu einem neuen sein konnte, zu einer weiteren Geburt. Dieser Vorgang bildete sozusagen die ägyptische Heilsgeschichte.

Deshalb waren der Vollzug der Riten und die rituelle Formung der Zeit so wichtig: Auch die menschliche Welt sollte sich in ihren staatlichen, gesellschaftlichen und persönlichen Abläufen immer wieder erneuern und in den Idealzustand des »ersten Mals« zurückkehren. Im Mysterium des allnächtlichen Sonnentods und der allmorgendlichen Neugeburt gründeten alle Jenseits- und Unsterblichkeitshoffnungen. Denn in der zyklischen Zeit durfte auch der Mensch auf Erneuerung hoffen – Sonnenuntergang und Lebensende entsprachen einan-

der. Gelingen bedeutete in der ägyptischen Vorstellung aus diesem Grund nicht Fortschritt, sondern Rückkehr: Rückkehr zum ersten Mal, zu den Vorbildern der Vergangenheit, zu den Normen der Vorfahren.

So viel zum Konzept des Neheh, der Zeit als zyklischer Bewegung. Wie wurde nun der komplementäre Aspekt der Zeit als unwandelbare Ausdauer, Djet, kulturell ausgedeutet und ausgestaltet?

Zum einen ganz offensichtlich im Errichten steinerner Monumente. Noch heute umweht den Besucher der Pyramiden oder der Totentempel im Tal der Könige der Hauch von Ewigkeit – allem Touristenrummel zum Trotz. Mit der Djet verlassen wir das Reich des Re und betreten das des Osiris, des Gottes der Toten, der selbst ein Toter ist und als solcher in unwandelbarer Vollkommenheit fortdauert. Das bringt auch sein Beinamen Wannafre – »Der in Vollendung Existierende« – zum Ausdruck. So wie die Neheh-Zeit mit dem Sonnengott und dem Werden, so war die Djet-Zeit mit Osiris und dem Sein verbunden.

Um Mitternacht, symbolisiert durch den Widderkopf, verschmolz der durch die Unterwelt reisende Sonnengott Re mit Osiris, dem Beherrscher der Toten. Er wurde dabei von den Göttinnen Nephthys (links) und Isis (rechts) beschützt.



### Füreinander eintreten – die moralische Seite der Zeit

Es war die Zeit der Rechenschaft und der Verantwortung. Dem lag eine moralische Konstruktion zu Grunde, die auf der Überzeugung basierte, dass jeder Mensch für sein Handeln und Unterlassen zur Rechenschaft gezogen wird. Hier erscheint die Zeit als ein Zusammenhang von Tat und Folge, der nach ägyptischer Vorstellung durch die Ma'at – der Begriff stand für Wahrheit, Gerechtigkeit, Ordnung – garantiert wurde. Die Menschen, so die Idee, müssen die Ma'at in ihrer Lebensführung verwirklichen, und zwar dadurch, dass sie aneinander denken und füreinander handeln. Ma'at war der Zentralbegriff einer kooperativen Ethik. Wenn alle aneinander denken, zum Beispiel empfangene Wohltaten und eingegangene Verpflichtungen nicht vergessen, und füreinander handeln, dann lohnt sich das Gute und rächt sich das Böse, dann entsteht der Sinnzusammenhang von Tun und Ergehen. Dieser wirkt nicht automatisch wie ein Naturgesetz, sondern nur im Raum der gegenseitigen Erinnerung und Aufmerksamkeit, des Aneinanderdenkens und Füreinanderhandelns. Sinn oder Nichtsinn der Welt waren also eine Frage des Eingedenkens oder der Vergessenheit. Wir können die moralische Konstruktion der Zeit daher als Gedächtniszeit bezeichnen.

Wer moralisch handelte, blieb der Nachwelt auf ewig im Gedächtnis. Mehr noch: Nur der Gerechte kam in den Genuss der Unsterblichkeit. Die Ägypter glaubten, nach dem Tod gegenüber Osiris und einem Totengericht



Nur wer ein Leben gemäß der Ma'at, der göttlichen Ordnung, geführt hatte, durfte auf ewige Dauer im Reich des Osiris hoffen. Darüber befand ein Totengericht, das als Test eine Feder als Symbol der Macht gegen das Herz des Verstorbenen wog.

Rechenschaft für ihre Lebensführung ablegen zu müssen. Während sie beteuerten, der Ma'at gemäß gelebt und eine lange Liste von Sünden nicht begangen zu haben, wurde ihr Herz auf eine Waage gelegt (siehe Bild oben). Mit jeder Lüge wäre es schwerer geworden, und schließlich hätte es ein Monstrum verschlungen. Wer aber als ohne Sünde befunden wurde, den nahm Osiris in sein Reich und damit in die Zeit ewiger Fortdauer auf.

Vollendung und ewige Dauer waren also nicht nur eine Sache des Steins, der Monumente, sondern vor allem der moralischen Vollkommenheit. Um im Raum der Djet-Zeit fortzudauern, bedurfte es dreierlei: der moralischen Vollkommenheit oder »Tugend«, der Schrift, um von ihr zu berichten, und des Steinmonuments als Träger dieser Schrift und als Ort der Erinnerung. Daher ist das ägyptische Monumentalgrab nicht nur ein Medium des Gedächtnisses, sondern auch, um mit Schiller zu reden, eine moralische Anstalt.

Das Besondere der ägyptischen Zeitkonstruktion war nun aber nicht nur die Unterscheidung, sondern vor allem die Verbindung der beiden Aspekte: Erst zusammen ergaben Neheh und Djet die Zeit. Viele Darstellungen des Sonnengottes zeigen ihn, wie er bei Tag den Himmel befährt und bei Nacht Osiris in der Unterwelt bestrahlt. Diese nächtliche Vereinigung von Re und Osiris entsprach einer Verbindung von Neheh und Djet.

Im Grab der Königin Nefertari (der Gemahlin Ramses' II., 13. Jahrhundert v. Chr.) findet sich die Darstellung einer widderköpfigen Mumie, eine Sonnenscheibe auf dem Kopf, die von den Göttinnen Isis und Nephthys flankiert und geschützt wird (siehe Bild links). Eine Beischrift zum Linken erklärt: »Das ist Osiris, der in Re ruht«, während die zur Rechten besagt: »Das ist Re, der in Osiris ruht.« Diese Vereinigung des Exponenten der ewig kreisenden kosmischen Zeit mit dem der unwandelbaren Fortdauer des Vollendeten ereignete sich der altägyptischen Mythologie zufolge zu Mitternacht. (Der Widderkopf bezog sich auf die Nachtgestalt des Sonnengottes und die Mumi-

enform auf Osiris. Zu Osiris gehörten auch Isis und Nephthys, die ihn beschützten, während die Sonnenscheibe wiederum auf Re verwies).

Im 17. Kapitel des so genannten Totenbuchs findet sich ein weiteres Bild für die Zeit (siehe Bild S. 65). Zwei nach außen gewandte Löwen flankieren die Hieroglyphe für das Wort Achet, die Bezeichnung für eine Stelle zwischen zwei Bergen, an der die Sonne auf- und untergeht (eine für uns schwer nachvollziehbare Vorstellung, bei der West- und Osthorizont zusammenfallen). Beim linken Löwen steht: »der morgige Tag«, beim rechten: »der gestrige Tag«. Der unter der Darstellung stehende Text lautet:

*»Ich bin das Gestern, ich kenne das Morgen.  
Was bedeutet das?  
Was gestern betrifft: Osiris ist es.  
Was morgen betrifft: Re ist es.«*

Im gleichen Text heißt es auch:

*»Was Neheh betrifft, das ist der Tag.  
Was Djet betrifft, das ist die Nacht.«*

Die beiden Löwen, die den Sonnenlauf flankieren und die für gestern und morgen oder auch Tag und Nacht und daher für Neheh und Djet stehen, symbolisierten also das Ganze der Zeit, das sich aus der Vereinigung dieser beiden Aspekte ergab.

Aber nicht nur der Kosmos, auch der Mensch lebte in beiden Zeiten zugleich. Im Vollzug der Riten, deren immer gleicher Ablauf die ewige Wiederkehr der kosmischen Zyklen im menschlichen Handeln abbildete, gewann er Anteil an Neheh, und durch die Errichtung der Monumente hoffte er sich in die Djet-Zeit stellen zu können. Nach dem Tod aber wollte er ganz in die kosmische Zeit in ihren beiden Aspekten eingehen – der Stern- und der Stein-Zeit. Während des Balsamierungsrituals sprach der Priester deshalb die Worte:

*Möge dein Ba existieren, indem er im Neheh lebt wie Orion im Leib der Himmelsgöttin; und indem dein Leichnam dauert in der Djet wie der Stein des Gebirges.* ◀



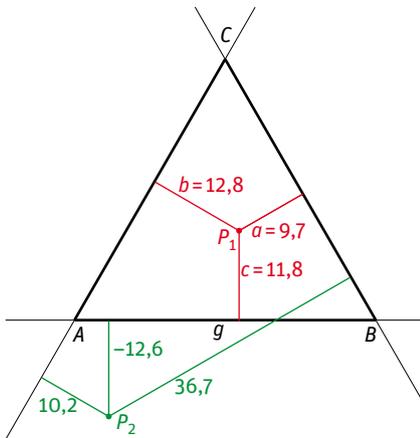
Der emeritierte Ägyptologe **Jan Assmann** lehrte von 1976 bis 2003 an der Universität Heidelberg; er ist seit 2005 als Honorarprofessor für allgemeine Kulturwissenschaft und Religionstheorie an der Universität Konstanz. Der Artikel basiert auf einem Vortrag, den er im Rahmen des Symposiums »Natürliche Zeit – kulturelle Zeit?« der Heidelberger Akademie der Wissenschaften im November 2009 gehalten hat.

**Assmann, J.:** Das Doppelgesicht der Zeit im altägyptischen Denken. In: Stein und Zeit. Mensch und Gesellschaft im Alten Ägypten. München 1991, S. 32–58.

## DREIECKSKOORDINATEN

# Durchblick dank Dreieck

Spezielle Koordinaten für Größen, deren Summe konstant ist, können systematische Lösungen für knifflige Aufgaben liefern und Raffinessen des Verhältniswahlrechts veranschaulichen.



Von Norbert Treitz

Zeichnen Sie bitte ein gleichseitiges Dreieck  $ABC$  der Seitenlänge  $g$  und in der gleichen Ebene irgendeinen Punkt  $P$  (Bild oben). Konstruieren Sie die Lote von  $P$  auf die drei Seiten  $BC$ ,  $CA$  und  $AB$ . Deren Längen  $a$ ,  $b$  und  $c$  verstehen wir mit dem positiven Vorzeichen, wenn  $P$  auf der gleichen Seite wie die restliche Ecke des Dreiecks liegt, andernfalls mit dem negativen. Für Punkte im Inneren sind somit alle drei positiv, für Punkte auf einer Seite oder ihrer Verlängerung ist ein Wert gleich null, für eine der drei Ecken sind es zwei, und der dritte ist dann gleich der Länge  $h$  der Höhe von  $ABC$ .

Der Satz von Viviani besagt nun in seiner erweiterten Form, die auch negative Werte zulässt, dass die Summe  $a + b + c$  nicht von der Wahl des Punktes abhängt, sondern stets gleich  $h$  ist.

Zum Beweis betrachten wir die Flächen der Dreiecke  $PAB$ ,  $PBC$  und  $PCA$  mit entsprechenden Vorzeichen als halbe Produkte aus  $g$  und den zugehörigen Loten und addieren sie auf. Für die Dreiecksfläche ergibt sich  $gh/2 = (a + b + c)g/2$ .

Der Satz lässt sich auf höhere Dimensionen verallgemeinern: Die Summe der  $n$  vorzeichenbehafteten Abstände eines Punktes von den Randpolytopen der

**Der Satz von Viviani:** Die Summe der Lote von einem Punkt auf die Seiten eines gleichseitigen Dreiecks, mit den richtigen Vorzeichen gerechnet, ist konstant.

Dimension  $n-1$  (für  $n=3$ : Flächen) in einem regulären Simplex der Dimension  $n$  (für  $n=3$ : einem regulären Tetraeder) ist gleich der Länge der Höhe dieses Simplex und somit von der Lage des Punktes unabhängig.

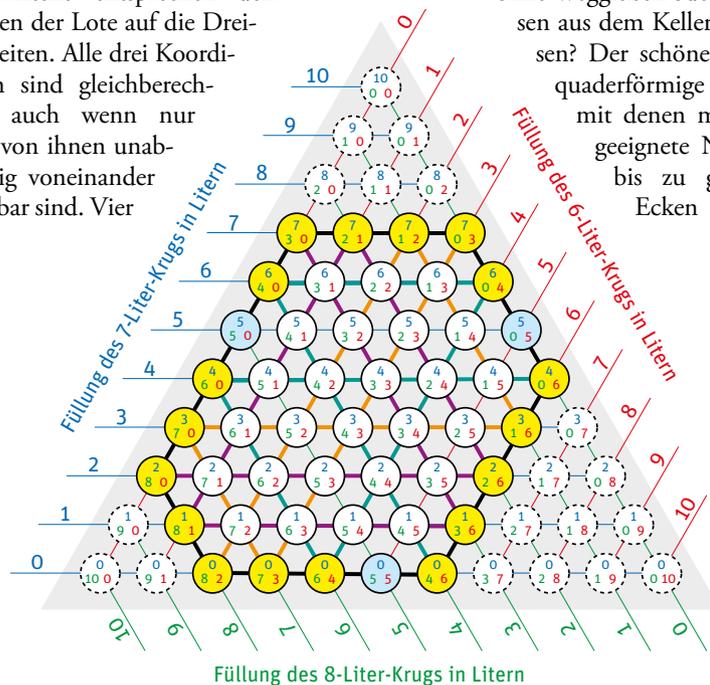
Dies ergibt eine sehr einleuchtende Darstellung für drei Größen, deren Summe festgelegt ist. Typisches Beispiel sind die Anteile der Komponenten in einer Legierung aus drei Metallen. Ein Punkt in einem gleichseitigen Dreieck kennzeichnet die Legierung, und die Anteile entsprechen den Längen der Lote auf die Dreiecksseiten. Alle drei Koordinaten sind gleichberechtigt, auch wenn nur zwei von ihnen unabhängig voneinander wählbar sind. Vier

Komponenten würden statt ebener Zeichnungen räumliche Modelle erfordern, und noch mehr lassen sich gar nicht mehr konkret ausführen.

Eine hübsche Anwendung finden Dreieckskoordinaten in den bekannten Umfüllaufgaben, die man normalerweise durch gedankliches Probieren löst.

### Vom Umfüllen der Krüge

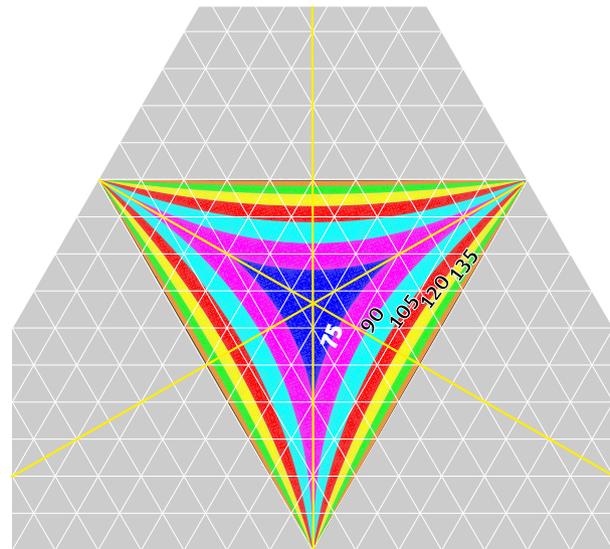
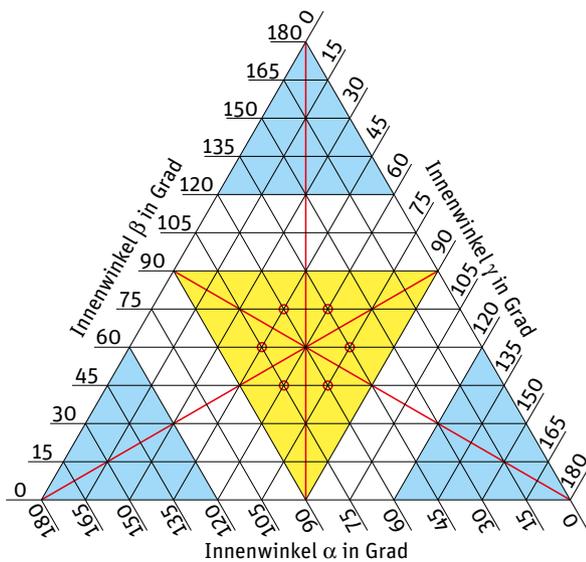
In drei Krügen mit 6, 7 und 8 Litern Fassungsvermögen sind insgesamt 10 Liter Wein; am Anfang ist ein Krug ganz voll und einer leer. Wie in solchen Aufgaben üblich, sind die Krüge unregelmäßig geformt und haben auch keine Skalen für Teilfüllungen. Welche Mengen von Wein kann man durch Umgießen mit diesen drei Krügen – ohne Weggießen oder Nachfassen aus dem Keller – abmessen? Der schöne Trick für quaderförmige Gefäße, mit denen man durch geeignete Neigungen bis zu geeigneten Ecken genau die



Jede Verteilung von 10 Litern Wein auf drei Krüge wird durch einen Punkt in diesem Dreieck dargestellt. Umgießen entspricht der Wanderung dieses Punktes entlang einer der dick farbig gezeichneten Strecken. Die unter den Bedingungen der Umfüllaufgabe erreichbaren Zustände sind gelb unterlegt; eine Füllung von 5 Litern ist unerreichbar (blau unterlegt).

ALLE ABILDUNGEN DES ARTIKELS: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: NORBERT TREITZ

## LANDKARTEN FÜR ALLE DREIECKE



**Unter der Voraussetzung, dass es auf die absolute Größe eines Dreiecks und seine Lage in der Ebene nicht ankommt, ist ein Dreieck durch seine drei Innenwinkel vollständig bestimmt.** Da deren Summe stets 180 Grad beträgt, bietet sich eine Darstellung in Dreieckskoordinaten an.

Jeder Punkt in dem Dreieck oben entspricht einem ganzen Dreieck, sogar einer Klasse von Dreiecken mit gleichen Winkeln. Die gelbe Fläche enthält die spitzen, die hellblauen die sehr stumpfen Dreiecke (größter Winkel über 120 Grad), die für den ersten Fermat-Torricelli-Punkt (Spektrum der Wissenschaft 3/2010, S. 74) von Bedeutung sind. Auf den drei (roten) Symmetrieachsen liegen die gleichschenkligen Dreiecke, in deren Schnitt-

punkt das (einzige) gleichseitige Dreieck. Die kleinen roten Kreise kennzeichnen das »pädagogische spitze Dreieck«: Damit die Schüler es nicht mit einem speziellen Dreieck verwechseln, tut der Lehrer gut daran, die Winkel 45, 60 und 75 Grad zu wählen.

Das rechte Bild ist wieder eine Landkarte aller Dreiecke, aber diesmal mit den auf Summe 1 normierten Seitenlängen als Koordinaten. Wieder wohnen die gleichschenkligen Vertreter auf den (hier gelben) Symmetrieachsen und der gleichseitige genau in der Mitte. Die Grenzlinie zwischen stumpfen und spitzen Dreiecken ist krumm; die Zahlen zeigen den größten Winkel in Grad an, der zur jeweiligen Grenzlinie gehört. Grau sind Tripel positiver Zahlen, die wegen der Dreiecksungleichung kein Dreieck liefern.

Hälfte oder ein Sechstel abfüllen kann, ist nicht zugelassen.

Hier bieten Dreieckskoordinaten eine elegante Darstellung. Jede Füllung der drei Krüge ist ein Punkt im gleichseitigen Dreieck (Bild links); diesmal sind allerdings nur ganzzahlige Werte zugelassen. Beim Umgießen von einem Krug in einen anderen wandert dieser Punkt parallel zu einer Seite des Koordinatendreiecks. Die maximalen Füllmengen der einzelnen Krüge schneiden drei Zipfel vom Dreieck ab und markieren ganzzahlige Werte auf den Seiten, die ein gleichwinkliges Sechseck umgeben.

Starten wir an einer solchen Ecke des Sechsecks entsprechend der Bedingung »ein Krug ganz voll, einer ganz leer« und laufen in ihm von einer Dreiecksseite zu der jeweils einzig möglichen anderen, so bekommen wir einen Polygonzug. Wenn wir das – nacheinander – von allen sechs Ecken aus machen, finden wir alle erreichbaren Kombinationen der Füllmen-

gen. Im Beispiel mit 6, 7 und 8 Litern und insgesamt 10 Litern stellt sich heraus, dass 5 Liter nicht erreichbar sind.

Das Verfahren ist beliebig auf ähnliche Krugaufgaben verallgemeinerbar. Finden Sie die beiden Weisen, auf die man mit Krügen von 8, 5 und 3 Litern die Hälfte von 8 Litern abmessen kann!

### Im Zoo der Dreiecke

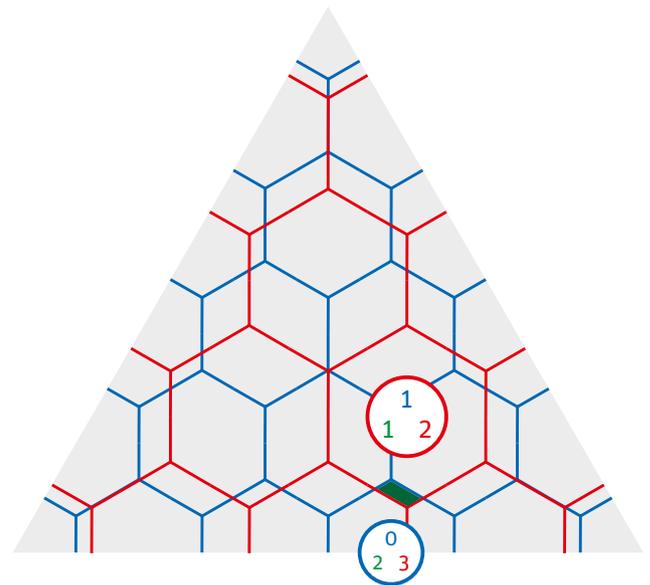
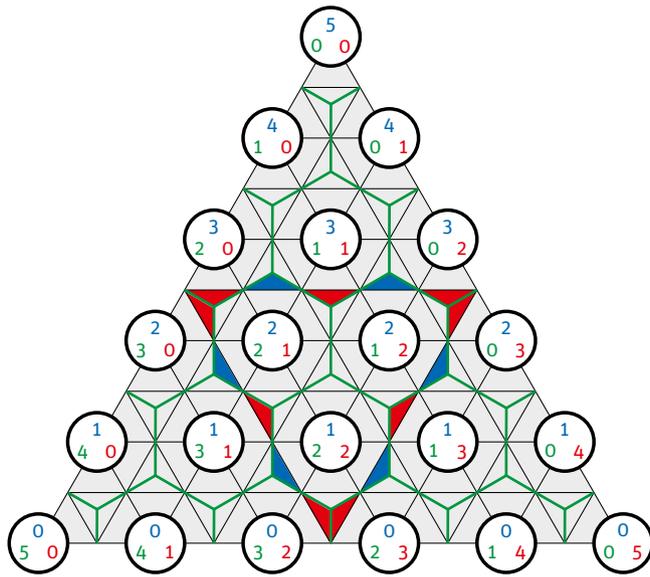
Es gibt in der Ebene nicht nur unendlich viele Dreiecke, sondern sogar überabzählbar viele: nicht nur so viele, wie es natürliche Zahlen gibt, sondern so viele, wie es reelle Zahlen gibt. Das gilt auch dann noch, wenn wir Dreiecke, die zueinander kongruent oder ähnlich sind, als ein einziges auffassen und damit jeweils überabzählbar viele Dreiecke in einen Topf werfen (korrekte Ausdrucksweise: »zu einer Klasse zusammenfassen«).

Rechtwinklige Dreiecke gibt es auch überabzählbar viele, aber »viel weniger« als Dreiecke überhaupt. Unter den Drei-

ecken sind die rechtwinkligen absolute Ausnahmefiguren. Georg Cantor (1845–1918) hat uns gezeigt, dass diese Qualifikation »viel weniger« mengentheoretisch unhaltbar ist. Es gibt in einem gewissen Sinn ebenso viele Punkte auf dem Rand eines Quadrats wie in seinem Inneren, denn man kann die Elemente beider Mengen umkehrbar eindeutig einander zuordnen. Auf dieselbe Weise kann man zeigen, dass es ebenso viele rechtwinklige Dreiecke gibt wie Dreiecke überhaupt.

Trotzdem werden wir den Verdacht nicht los, dass es zum Beispiel doppelt so viel ganze wie gerade Zahlen gibt, obgleich nach dem Argument mit der eindeutigen Zuordnung beide Mengen gleich groß sind. Eine Präzisierung solcher Aussagen kann man von geometrischen Wahrscheinlichkeiten erhoffen, dabei aber auch mühelos in Widersprüche stolpern.

In diesem Sinn wollen wir mit begrenztem Ernst zu klären versuchen, ob



Besetzung eines Ausschusses mit fünf Sitzen nach dem Hare-Niemeyer-Verfahren. Die Zahlen in den Kreisen bezeichnen die Anzahl der Sitze für die drei Parteien. Blau gekennzeichnet sind die Wahlergebnisse, bei denen die Partei mit der Mehrheit der Stimmen nicht die Mehrheit der Sitze erhält, rot die mit dem umgekehrten Fehler.

Das Alabama-Paradox: Nach dem Hare-Niemeyer-Verfahren bekommt die Partei, deren Koordinate von unten nach oben verläuft (oberste der drei Zahlen im Kreis), von insgesamt vier Sitzen einen (rote Linien), von fünf Sitzen aber gar keinen (blaue Linien), wenn das Wahlergebnis im dunkelgrün markierten Bereich liegt.

es mehr stumpfe oder mehr spitze Dreiecke gibt, das heißt mit dem größten Innenwinkel über oder unter 90 Grad.

Sortieren wir alle Dreiecke nach ihrem größten Winkel, so haben die spitzen Werte zwischen 60 und 90 Grad und die stumpfen zwischen 90 und 180. Demnach gäbe es dreimal so viele stumpfe wie spitze Dreiecke? Merkwürdig.

Da die Winkelsumme im Dreieck eine Konstante, nämlich 180 Grad, ist, eignen sich die Innenwinkel eines Dreiecks als, nun ja, Dreieckskoordinaten (Kasten S. 69). Wieder nehmen die stumpfen Dreiecke dreimal so viel Fläche ein wie die spitzen, und die rechtwinkligen leben auf der unendlich dünnen Grenze dazwischen.

Das ist keineswegs die einzige Darstellungsmöglichkeit. Man kann Dreiecke auch durch ihre Seitenlängen festlegen. Dabei normieren wir die Summe der Seitenlängen auf 1, was möglich und sinnvoll ist, da es wieder nur um Ähnlichkeitsklassen geht. Die Anteile der Seiten am Umfang tragen wir in Dreieckskoordinaten auf und sparen eine Menge Platz (Bild S. 69 unten): Die äußeren drei Viertel bleiben frei, alles tummelt sich im mittleren Vierteldreieck. Der Grund ist einfach die Dreiecksungleichung: Die längste Seite darf nicht länger sein als die Summe der anderen.

Auch hier bilden die rechtwinkligen Dreiecke wieder eine Grenze zwischen

den spitzen und den stumpfen, aber diese Grenzlinie ist jetzt keine Gerade, sondern ähnelt einer Deltoide, also einem Dreieck aus (sehr kreisnah) nach innen gebogenen Seiten. Das Flächenverhältnis zwischen den Plätzen der spitzen und denen der stumpfen Dreiecke ist hier etwa 40 zu 60 Prozent, also deutlich kleiner als die (genau) 25 zu 75 Prozent bei der Darstellung durch die Winkel.

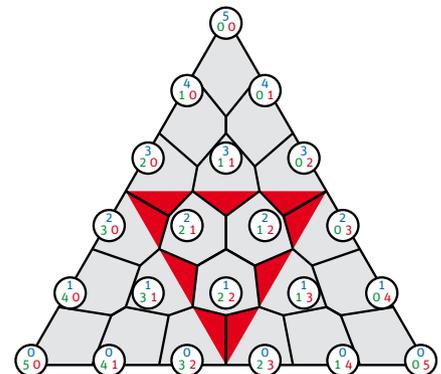
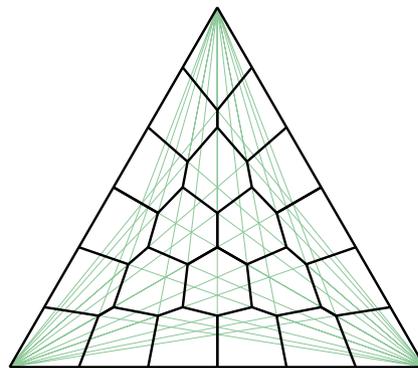
Die Frage, welcher Anteil der Dreiecke spitzwinklig sei, ist also nicht auf eine einzig sinnvolle Weise zu beantworten, sondern lässt eine gewisse Willkür zu, wie auch andere Probleme der geometrischen Wahrscheinlichkeit. Unsere drei relativ sinnvollen Anläufe sehen aber

immerhin die stumpfwinkligen in deutlicher Überzahl.

Verlassen wir nun die hübschen und nutzlosen Spielereien und wenden uns dem Ernst des politischen Lebens zu – in Dreieckskoordinaten.

### Sitzuteilungen

Nehmen wir an, es stünden nur drei politische Parteien zur Wahl – nicht weil das der Realität besonders nahe käme, sondern weil wir mit unseren Dreieckskoordinaten nur zwei Dimensionen zum Zeichnen zur Verfügung haben. Die Stimmenanteile der drei Parteien – Enthaltungen und ungültige Stimmen nicht mitgerechnet – addieren sich zu 100



Konstruktion der Waben für das Verfahren von Jefferson, d'Hondt und Hagenbach-Bischoff (links). Eine Stimmenmehrheit (rechts; der Bereich außerhalb der roten Flächen) führt stets zu einer Sitzmehrheit.

Prozent, also ist ein Wahlergebnis als Punkt in unserem Dreieck darstellbar.

Wie kann ein solches Wahlergebnis möglichst gerecht in die Besetzung eines Parlaments oder, noch schwieriger, eines Ausschusses mit wenigen Sitzen umgesetzt werden (Spektrum der Wissenschaft 9/2002, S. 80, und 9/2009, S. 16)? Seltsamerweise werden heutzutage immer feste Größen dieser Gremien angestrebt – und dann doch wegen der Überhangmandate nicht eingehalten, ein Thema, das hier zu weit führt, obwohl es wichtiger wäre als einige hier behandelte Feinheiten (Spektrum der Wissenschaft 2/1999, S. 70).

Am einfachsten ist das Verfahren von Alexander Hamilton und Horst Friedrich Niemeyer zu verstehen, das auch nach Thomas Hare (gesprochen wie der englische Hase) benannt ist. Man berechnet die Sitzzahlen einfach proportional zunächst als reelle Zahlen und teilt diese in einen Teil vor und einen nach dem Komma auf. Die ganzzahligen Teile kann man sofort zuteilen, die verbleibenden Sitze werden dann in der Reihenfolge absteigender Nachkommawerte zugeteilt, solange der Vorrat reicht (Bild S. 70 links oben).

Das Diagramm ist sehr regelmäßig: Es ist ein Ausschnitt aus einer Parkettierung mit regulären Sechsecken. Deren Seiten und somit Trennlinien liegen rechtwinklig zu den Seiten des symbolischen Dreiecks. Man kann sich ihr Überschreiten dadurch vorstellen, dass ein Wähler von einer Partei zu einer anderen wechselt, was die unbeteiligte nicht beeinflusst. Das gilt aber nur, wenn er nicht vom oder zum Nichtwähler wechselt.

So einfach das aussieht, es hat Schönheitsfehler und sogar einen ernsthaften Nachteil, der gerade in Deutschland, wo man absolute Mehrheiten für die Regierungen haben möchte, zu Legitimitätsproblemen führen kann. Man kann nämlich nicht sicher sein, dass eine Mehrheit der Stimmen auch zur Mehrheit der Sitze führt. Im Bild S. 70 links oben sind die Bereiche blau gefärbt, in denen genau das bei Hamilton/Hare nicht der Fall ist. In den roten bekommt man umgekehrt ohne Stimmenmehrheit eine Sitzmehrheit. Aber der Fehler ist leicht zu beheben: Man gibt den ersten »Nachkommarsitz« der größten Partei, und allen ist geholfen.

In den USA schlug Alexander Hamilton das Verfahren zur Aufteilung des

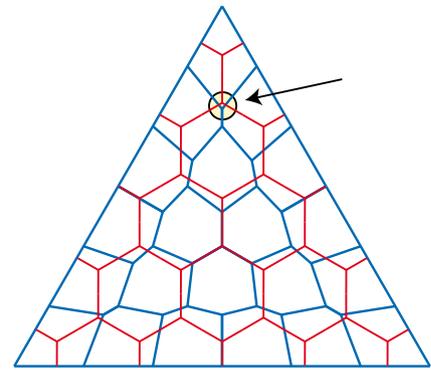
Repräsentantenhauses (der Wählerkammer im Gegensatz zum Senat, der Länderkammer) nach den Zahlen der (wohl gemerkt weißen männlichen) Einwohner vor. Als sich herausstellte, dass von insgesamt 299 Sitzen Alabama acht bekommen würde, von 300 aber nur sieben, wurde das als so paradox empfunden, dass George Washington 1791 das erste Veto eines Präsidenten überhaupt dazu einsetzte, das schon beschlossene Hamilton-Verfahren zu kippen. Das Bild S. 70 oben rechts zeigt den Alabama-Effekt an einem Gremium mit insgesamt vier oder fünf Sitzen.

Hamiltons Methode wurde in den USA dann durch die von Thomas Jefferson ersetzt, die auch die Namen von Victor d'Hondt (gesprochen Dont) und Eduard Hagenbach-Bischoff trägt. Auf den ersten Blick sieht das Verfahren sehr seltsam aus. Wenn sich die Stimmenzahlen wie  $a:b:c \dots$  verhalten, schreibt man hinreichend viele der Zahlen  $a, b, c, \dots, a/2, b/2, c/2, \dots, a/3, b/3, c/3, \dots$ , also mit den positiven ganzen Zahlen als Nenner, auf und sortiert sie absteigend nach der Größe. Sind  $n$  Sitze zu besetzen, so kommen die  $n$  größten dieser Zahlen zum Zug: Jede Zahl gibt ihrer Partei einen Sitz.

Dass das zu einer näherungsweise proportionalen Besetzung führt, jedenfalls bei großen Sitzzahlen, will nicht unmittelbar einleuchten. Man kann es aber einsehen, wenn man an die zuletzt belegten Sitze kurz vor Nummer  $n$  denkt: Für sie müssen die Brüche ungefähr gleich sein, die jeweils verwendeten Nenner sich also wie die Stimmenzahlen verhalten.

Das Diagramm zeigt gleich große, aber scheinbar sehr ungleichmäßig geformte Waben. Wie findet man sie? Man verbinde eine Ecke des Dreiecks mit den Punkten, welche die gegenüberliegende Seite in  $n+1$  Teile zerlegen, wenn es um die Belegung von  $n$  Sitzen geht. Entsprechende Verbindungslinien ziehe man für die kleineren Dreiecke, die mit dem großen diese Ecke gemeinsam haben, aber für kleinere Sitzzahlen gelten (Bild S. 70 unten links). Eine Stimmenmehrheit führt in jedem Fall ohne Weiteres zu einer Sitzmehrheit (rechts).

Allgemein begünstigt d'Hondt die größeren Parteien. Das kann man als mangelnden Minderheitenschutz beklagen, aber auch im Sinn klarer Entscheidungen begrüßen. In Gremien mit klei-



Ein Ausschuss mit fünf Sitzen erhält bei einem Wahlergebnis von 73,2, 13,4 und 13,4 Prozent (kleine Fläche im Kreis mit Pfeil) nach Hamilton/Hare/Niemeyer (rot) die Besetzung 3:1:1, nach Jefferson/d'Hondt (blau) jedoch 5:0:0. Für die größte Partei macht also das Besetzungsverfahren den Unterschied zwischen totaler Dominanz und Verfehlen der eigentlich erreichten Zweidrittelmehrheit aus.

nen Sitzzahlen kann das Verfahren groteske Verzerrungen verursachen. Einen besonders krassen Fall zeigt das Bild oben.

Der Deutsche Bundestag wurde von 1949 bis 1983 nach d'Hondt, von 1987 bis 2005 nach Hamilton gewählt. Seit 2009 wird für den Bundestag und einige Landtage, für Ausschüsse auch schon länger, ein Zuteilungsverfahren angewendet, das bisher wenig beachtet wurde, obwohl es schon lange bekannt ist: das Verfahren von Daniel Webster, André Sainte-Laguë und Hans Schepers. Es unterscheidet sich von d'Hondt darin, dass man nicht durch die ganzen Zahlen, sondern nur durch die ungeraden teilt. Damit werden die Randwaben kleiner, ähnlich wie bei Hamilton. Die bei d'Hondt typische Benachteiligung kleiner Parteien verschwindet, ohne dass »Alabama« oder andere Schönheitsfehler von Hamilton/Hare auftauchen. ◁



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

**Coxeter, H. S. M., Greitzer, S.:** *Geometry Revisited*. Mathematical Association of America, Washington 1996.

**Stewart, I.:** *Electoral Dysfunction*. In: *New Scientist* 206(2758), S. 28–31, 1. Mai 2010.

# Der Milliardenbetrug und die Rentenversicherung

Alte Anleger werden mit dem Geld der neuen ausgezahlt: Das ist das betrügerische Prinzip der Ponzi-Pyramide, die über kurz oder lang scheitern muss. Aber hinreichend abstrakt betrachtet arbeitet die staatliche Rentenversicherung nicht grundsätzlich anders.

## In Kürze

- ▶ Das System des Milliardenbetrügers Bernard Madoff ist eine **Ponzi-Pyramide**: Das Geld der Neuanleger wird dazu verwendet, die alten auszuzahlen.
- ▶ Eine Ponzi-Pyramide ist, ebenso wie ein Kettenbriefsystem, auf den exponentiell **wachsenden Zulauf neuer Anleger** angewiesen und bricht daher über kurz oder lang zusammen.
- ▶ Die Frage, wie die **Konkursmasse** einer zusammengebrochenen Ponzi-Pyramide aufzuteilen ist, wirft schwierige Abgrenzungsprobleme auf.
- ▶ Die klassische **Rentenversicherung** weist typische Merkmale einer Ponzi-Pyramide auf und ist daher bei einer stagnierenden oder schrumpfenden Bevölkerung vom Zusammenbruch bedroht.

Von Jean-Paul Delahaye

**W**enn die Schadenssumme der Maßstab ist, dann heißt der größte Betrüger der Weltgeschichte wahrscheinlich Bernard Madoff. Seine Geschädigten beklagen einen Verlust zwischen 10 und 65 Milliarden Dollar; mit diesem Geld hätte man ungefähr 10 000 bis 65 000 Teilnehmer der deutschen Fernsehlotterie mit Traumhäusern ausstatten können. Dass man die Schadenshöhe nicht genauer beziffern kann, liegt an den Besonderheiten dieser Betrugsform; wir kommen darauf zurück.

Madoffs Schwindel beruhte auf einer so genannten Ponzi-Pyramide. Das Prinzip ist einfach und hat eine gewisse Verwandtschaft mit dem der Kettenbriefe. Bei der genaueren Analyse zeigen sich jedoch Überraschungen. So kann es selbst dann rational sein, sein Geld einer Institution anzuvertrauen, wenn man weiß, dass diese nach einem Ponzi-Schema arbeitet.

### Der Klassiker: Charles Ponzi

Die Grundidee ist schnell erzählt. Der Betrüger verspricht eine Rendite weit oberhalb des Marktüblichen, sagen wir 30 Prozent pro Jahr, während andere Anbieter allenfalls 10 Prozent versprechen. Anstatt das ihm anvertraute Geld anzulegen, zahlt er damit diejenigen Anleger aus, die das System verlassen wollen: Die Neueinsteiger bezahlen die Aussteiger. Selbstverständlich bedient sich der Betreiber aus der Kasse auch zu seinem eigenen Nutzen!

Im Jahr 1920 inszenierte der Italiener Charles Ponzi (1882–1949) einen derartigen Schwindel in den USA. Er versprach seinen Anlegern, ihnen ihr Geld nach 45 Tagen mit einem Profit von 50 Prozent oder nach 90 Tagen mit 100 Prozent zurückzuzahlen. (Es scheint damals nicht weiter aufgefallen zu sein, dass das zweite Angebot verglichen mit dem ersten sehr ungünstig war: Wer bei Ponzi 100 Dollar auf 45 Tage anlegte und die so erwirtschafteten 150 Dollar auf weitere 45 Tage, hätte nach insgesamt 90 Tagen nicht nur 200, sondern 225 Dollar ausbezahlt bekommen müssen.)

Ponzi gab vor, seine abenteuerlichen Gewinne mit internationalen Antwortscheinen der Postverwaltungen zu erzielen. Die Geschäftsidee war nicht von vornherein als absurd zu erkennen, denn wegen der damals einsetzenden Inflation konnte man in Europa erworbene Antwortscheine in den USA für ein Vielfaches des Kaufpreises einlösen. Da Ponzi denjenigen, die ihr Geld zurückverlangten, die versprochene Rendite ausbezahlte, verbreitete sich das Gerücht, sein Unternehmen sei seriös. Einen Tag, nachdem die »Boston Post« einen positiven Artikel über ihn gedruckt hatte, strömten Tausende Bostoner Bürger zu seinem Büro, um dort ihr Geld anzulegen.

Dann allerdings bemerkte ein Analyst, dass das Volumen der Geldgeschäfte Ponzis einen Umlauf von 160 Millionen Antwortscheinen erforderte; in Wirklichkeit gab es aber davon weniger als 30 000. Die Pyramide brach zusammen, und Ponzi fand sich im Gefängnis

wieder. Nach seiner Entlassung versuchte er neue Betrügereien. Das führte ihn erneut ins Gefängnis, von wo er 1934 nach Italien ausgewiesen wurde. Selbst nach genauer Prüfung seiner Bücher ließ sich nicht klären, wohin das ihm anvertraute Geld geflossen war; seine Geldgeber bekamen nur ein Drittel ihrer Einlagen zurück.

Auch wenn diese Form des Betrugs heute mit dem Namen Ponzi verknüpft ist – Ponzi war keineswegs der Erste, der sie praktizierte. Bereits 1857 beschrieb Charles Dickens das Prinzip in seinem Fortsetzungsroman »Little Dorrit«. Dutzende von Geschäften dieses Typs waren in aller Welt betrieben worden, bevor Bernard Madoff den Rekord aufstellte, der ihm am 29. Juni 2009 eine Gefängnisstrafe von 150 Jahren einbrachte. Der Website des amerikanischen Justizministeriums ist zu entnehmen, dass seine Entlassung für den 14. November 2139 vorgesehen ist. Dabei ist ein Straferlass von immerhin 20 Jahren wegen guter Führung bereits eingerechnet.

### Exponentielles Wachstum ist noch nicht kriminell

Theoretisch kann eine Ponzi-Pyramide unbegrenzt weiter existieren – solange die Geldgeber ihr Guthaben nicht zurückverlangen, sondern sich mit dem erfreulichen Anblick des regelmäßig und in eindrucksvolle Höhen anwachsenden Betrags auf dem jährlichen Kontoauszug begnügen. Beträgt beispielsweise die zugesagte Rendite 30 Prozent, so ist das Guthaben nach  $n$  Jahren gleich  $(1,30)^n$  mal der ursprünglichen Einlage.

Dieses exponentielle Wachstum ist an sich nichts Ungewöhnliches; es ist bei jeder Bank der Welt zu haben, die Sparbriefe mit einem festgelegten Zinssatz anbietet. Beträgt dieser  $x$  Prozent, so multipliziert sich das Kapital jedes Jahr mit dem Faktor  $(1 + x/100)$ . Das Problem der Ponzi-Pyramide liegt nicht darin, dass der Betreiber exponentielles Wachstum verspricht, sondern darin, dass er dieses Versprechen nicht halten kann, weil er das eingezahlte Geld nicht oder nur zu einem niedrigeren Zinssatz als dem zugesagten anlegt. Eine gut funktionierende Bank dagegen verdient mit dem eingezahlten Geld mehr, als sie dem Kunden versprochen hat, und kann ihn deswegen ohne Weiteres auszahlen.

Wenn alle Kunden einer Pyramide nach einem bestimmten mittleren Zeitraum (sagen wir drei Jahre) ihr Geld wieder abziehen, so ist nicht nur ihr Guthaben exponentiell gewachsen – was nicht bemerkenswert ist –, sondern

auch der Geldbetrag, den neue Anleger einzahlen müssen, damit die Aussteiger bezahlt werden können. Folglich muss auch die Zahl der Neuanwerbungen exponentiell wachsen. Das ist ab einem gewissen Zeitpunkt nicht mehr möglich, und die Pyramide bricht zusammen (Kasten S. 74/75). In aller Regel greifen die Behörden kurz vor der endgültigen Katastrophe ein, indem sie den Betreiber inhaftieren – und werden dann von den Geschädigten beschuldigt, dadurch erst den Verlust ihrer Einlagen herbeigeführt zu haben!

Um den wahren Charakter seines Systems zu verheimlichen, lässt der Betreiber verlauten, er verfüge über besondere, mehr oder minder geheime Methoden, mit denen er die versprochene Rendite am Markt erzielen könne. Häufig gelingt ihm das sogar anfangs, zum Beispiel durch einen glücklichen Zufall. Erst allmählich, nachdem seine Methode, die er vielleicht selbst für unfehlbar hielt, gescheitert ist, setzt der Betrüger seine Pyramide in Gang.

Ein zunächst bescheidenes Loch in der Kasse will mit frischem Geld gestopft werden. Dadurch wächst die Ponzi-Pyramide gewissermaßen gegen den Willen ihres Betreibers weiter an. Das Anwerben neuer Kunden erfordert immer mehr kriminelle Akte wie falsche Angaben über die Methoden und Verschleierung von Transaktionen, welche den Betreiber früher oder später hinter Gitter bringen.

Wenn die Anleger ihr Geld nicht abrufen, muss ihr Betreiber auch nicht unbedingt neues Geld auftreiben, um den Betrug aufrechtzuerhalten. Allerdings ist er dann darauf angewiesen, dass die Anleger ihr Geld in der Pyramide lassen. Das nötigt ihn, entsprechende Überzeugungsarbeit zu leisten, etwa indem er eine Mindestanlagedauer vorschreibt oder die Geduld der Langfristanleger mit noch höheren Zinsen zu belohnen verspricht.

Betrachten wir nun eine Pyramide in dem Augenblick, in dem sie zusammenbricht, sei es, weil die Behörden eingreifen, weil ihr Betreiber verschwindet oder weil er sich der Polizei stellt. In dieser Situation stellt sich unweigerlich die Frage: Wo ist das Geld? Es kann ja nicht verschwunden sein, aber in wessen Taschen ist es gelandet? Selbst Bernard Madoff mit seiner fürstlichen Lebensweise hätte es nicht fertiggebracht, den Gegenwert von 65 000 Traumhäusern einfach ohne verwertbare Reste zu verprassen.

Das Problem ist, dass es einen Teil des Geldes, das zum Beispiel Madoff seinen Anlegern schuldig war, nie gegeben hat. Die amerikanischen Richter, die den Fall zu bearbei-



Im Vergleich zu seinen modernen Nachfolgern ist Charles Ponzi eher als Kleinkrimineller einzustufen, auch wenn die millionenschweren Bargeldbündel in seinem Büro damals einen anderen Eindruck erweckt haben dürften. Immerhin gelang es Ponzi mehrfach, nach einem Gefängnisaufenthalt seine kriminelle Karriere fortzusetzen, mit bemerkenswerten Erfolgen.

PONZI-PYRAMIDEN

In diesem Beispiel beträgt der versprochene jährliche Zinssatz 30 Prozent, während der »normale« von Banken gewährte Zinssatz bei 10 Prozent liegt. Wir gehen davon aus, dass der Betreiber der Pyramide das Geld, über das er verfügt, zu diesen 10 Prozent anlegt. Jeder Anleger lässt sich sein Guthaben nach drei Jahren auszahlen. Weiter stellen wir uns vor, dass die Pyramide jährlich einen neuen Anleger gewinnt, der am 1. Januar 100 000 Euro anlegt.

In der Darstellung unten lagert eine Pyramide jedes Jahr eine Schicht nach unten an und wird dadurch zugleich höher und breiter.

In den ersten Jahren wird die Pyramide reicher, da neue Anleger hinzukommen, die ihr Geld einbringen, und niemand sich Geld auszahlen lässt. Ab dem dritten Jahr, wenn die ersten Anleger beginnen, ihr Geld zusammen mit den horrenden Zinsen abzuziehen, beginnt das angelegte Vermögen abzunehmen. Wenn eine derartige Pyramide überleben soll, müsste die Anzahl der Anleger exponentiell wachsen, was unrealistisch ist. Ab dem sechsten Jahr kann die Pyramide das Geld, das sie den ausscheidenden Anlegern schuldet, nicht mehr aufbringen; sie bricht zusammen.



ten haben, sprechen von fiktiven Profiten (*fictitious profits*). Angenommen, ein Betrüger vom Ponzi-Typ verspricht eine Rendite von 100 Prozent jährlich, Herr Meier legt 1000 Euro bei ihm an, und nach zwei Jahren bricht die Pyramide zusammen. Wie viel Geld hat Herr Meier verloren:

- (a) seine Einlage von 1000 Euro;
- (b) sein Guthaben von 4000 Euro; oder
- (c) 1000 Euro plus die Zinsen, die diese Anlage zu einem marktüblichen Zinssatz von  $x$  Prozent eingebracht hätte, insgesamt also  $1000 \cdot (1+x/100)^2$  Euro?

Die vernünftigste Antwort ist (c), so bitter das für jeden ist, der von (b) geträumt hat. In der Tat ist es abwegig, die versprochene Rendite zu Grunde zu legen. Wenn Ihnen ein Betrüger ein Gemälde für 4000 Euro aufschwätzt mit der Behauptung, Sie könnten es morgen für das Doppelte weiterverkaufen, und das stellt sich als falsch heraus, dann haben Sie offensichtlich nicht 8000 Euro verloren, sondern nur 4000. Das gilt auch für Ponzi-Pyramiden. Also schuldet ihr Betreiber seinen Gläubigern den Betrag (c), und das ist auch das Geld, für das die Frage »Wo ist es geblieben?« überhaupt Sinn macht. (Für die Berechnung der Ansprüche an die Konkurs-

masse wird allerdings meistens (a) zu Grunde gelegt.)

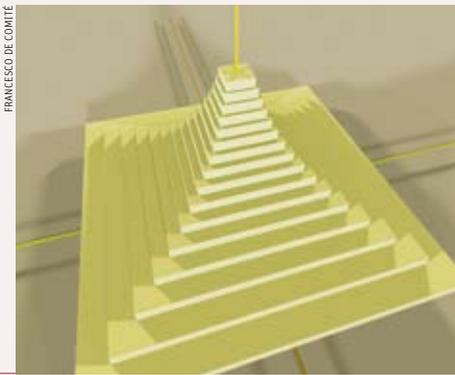
Im Fall Madoff handelt es sich bei den 65 Milliarden Dollar, von denen die Rede ist, um das fiktive Geld (b). Das tatsächlich verlorene Geld (a) oder (c) ist erheblich weniger. Nach vorsichtigen und sicherlich unvollständigen Berechnungen, die im Lauf des Prozesses bekannt wurden, liegt der Betrag (a) in der Größenordnung von 10 Milliarden Dollar. Es ist nicht unwahrscheinlich, dass wie schon bei Ponzi eine genaue Berechnung von (a), (b) und (c) unmöglich sein wird. Immerhin erstreckt sich die Geschichte auf einen Zeitraum von über 30 Jahren!

Die verschwundene Summe (c) setzt sich aus vier Anteilen zusammen.

Anteil 1: Geld, das sich der Betrüger und seine Komplizen als Gehälter, als Gebühren und als Provisionen auf die fiktiven Erträge des Fonds aus dessen Kasse ausgezahlt haben. Dieses Geld gehört den Anlegern und ist ihnen zurückzuerstatten.

Im Vergleich zu den verschwundenen Summen sind diese Beträge in der Regel gering. Aber es sind die einzigen, auf deren Erstattung die Geschädigten überhaupt hoffen dürfen.

**Eine gewöhnliche Pyramide** (mit ebenen Seitenflächen) gibt ein irreführend harmloses Bild einer Ponzi-Pyramide ab; denn bei ihr ist die neu angelagerte unterste Schicht zwar breiter als alle vorigen Schichten, aber ihre Kantenlänge wächst nur proportional zur Zeit (und ihre Fläche quadratisch). Eine Ponzi-Pyramide dagegen wächst exponentiell: Jede Schicht ist  $c$ -mal so groß wie ihre Vorgängerin, mit einem gewissen Faktor  $c > 1$ . Das ist der Gesamtbetrag, den sie ihren Anlegern schuldet und der im Auszahlungsfall von den jeweils neuen Beteiligten aufzubringen ist. Der Zeitpunkt ist dann nicht allzu fern, an dem die neue Schicht die ganze Erde bedeckt.



FRANCESCO DE COMITÉ

Anteil 2: Beträchtliche Summen wurden aufgewendet, um die Pyramide am Funktionieren zu erhalten: Gehälter der Angestellten des Fonds, Büromieten, verschiedene Provisionen, Ausgaben für Werbung, Reisekosten, Steuern und anderes.

Dieses Geld ist uneinbringlich verloren. Die Angestellten, soweit sie keine Mitwisser waren, müssen ihre Gehälter und Provisionen nicht zurückzahlen: Sie haben die Arbeit geleistet, für die sie bezahlt wurden. Dass ihr Arbeitgeber das Geld für ihre Gehälter gestohlen hat, kann man ihnen nicht zur Last legen. Ähnliches gilt für Mieten und andere Betriebsausgaben, für die der Zahlungsempfänger eine Leistung erbracht hat.

### Staatliche Hehlerei

Nur bei den Steuern, die der Betreiber der Pyramide gezahlt hat, ist die Sachlage nicht so eindeutig. Im Prinzip hat der Staat, indem er diese Steuern einnahm, einen Vorteil aus einer Straftat erlangt und müsste diesen eigentlich wieder herausgeben. Aber es ist äußerst unwahrscheinlich, dass dies geschieht: Der Staat wird sich an das klassische Sprichwort »Geld stinkt nicht« halten und jede Rückerstattung verweigern.

Die Grenze zwischen den Anteilen 1 und 2 ist manchmal fließend. Was ist mit den Provisionen der Anlageberater, die Anteile an Madoff-Fonds verkauften? Handelt es sich um Mitwisser, so sind ihre Provisionen Teil des gestohlenen Geldes. Sind es aber einfache ehrliche und geschickte Vermittler, dann dürfen sie ihre Provisionen behalten, denn sie gehören zu Anteil 2. Im Gerichtsverfahren gegen Madoff trat die ganze Bandbreite an »Tätertypen« zu Tage, von den wohl informierten Komplizen bis hin zu den Ahnungslosen, die oft genug ihre soeben verdienten Provisionen selbst in die Pyramide einzahlten!

Anteil 3: Da der Betrüger seinen Kunden auch den Inflationsausgleich vorenthalten hat, den eine Anlage zu marktüblichen Zinsen erbracht hätte, trifft die Kunden auch der Verlust durch Geldentwertung, den derjenige erleidet, der sein Geld im Sparstrumpf aufbewahrt. Nutznießer dieses Inflationsverlustes (der Differenz zwischen (c) und (a)) ist letztlich die Staatskasse; aber natürlich wird sie auch diese Summen nicht zurückzahlen.

Die Anteile 2 und 3 sind vergleichbar dem Verlust eines Anlegers, der in eine Firma investiert hat, die Insolvenz anmelden musste.

Anteil 4. Ein Teil des Geldes, das in die Ponzi-Pyramide floss, wurde an jene Anleger ausbezahlt, die beizeiten ihr Guthaben nebst der versprochenen hohen Rendite abriefen. Je länger die Pyramide besteht, desto größer wird dieser Anteil am verschwundenen Geld. Einige französische Anlagefonds haben in Madoffs Pyramide eingezahlt und sich rechtzeitig – mit Zinsen – auszahlen lassen, weil ein Analyst einer Bank misstrauisch wurde. Damit sind etliche französische Kleinanleger unwissentlich zu Nutznießern der Madoff-Pyramide geworden.

Im Prinzip muss man dieses Geld zurückfordern, was im Fall Madoff auch teilweise geschehen ist. Wussten aber diese Kunden nichts von dem Betrug (andernfalls wären sie Komplizen), so kann man ihnen nicht vorwerfen, dass sie sich, sei es wegen dunkler Vorahnung oder einfach durch glücklichen Zufall, ihr Geld beizeiten zurückzahlen ließen. Auch die Zinsen kann man ihnen schwerlich streitig machen. Hohe Zinsen sind üblicherweise der Lohn für erhöhtes Risiko. Dass diese Anlage riskant war, ist mittlerweile offensichtlich; warum also sollte man den Anlegern den Lohn dafür vorenthalten?

Juristisch ist nach deutschem Recht der Nutznießer einer Ponzi-Pyramide vergleichbar einem Hehler ohne Wissen. Denn er hat sich eine Sache verschafft, die ein anderer (der Betreiber der Pyramide) durch eine gegen fremdes Vermögen gerichtete Tat (den Betrug an

**Die Entlassung von Bernard Madoff aus dem Gefängnis ist für den 14. November 2139 vorgesehen – bei guter Führung**

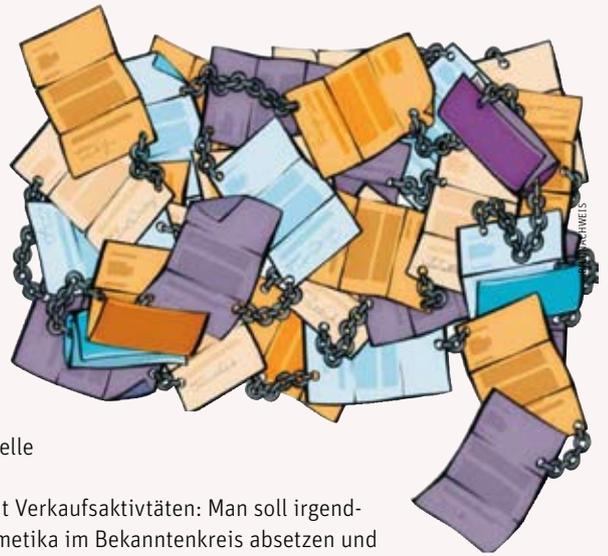
## SCHNEEBALLSYSTEME UND KETTENBRIEFE

**Gewisse Betrügereien** sind Ponzi-Pyramiden insofern ähnlich, als die Beteiligten von ihnen profitieren, indem sie neue Beteiligte anwerben – bis keine neuen Beteiligte mehr zu finden sind und das System zusammenbricht.

In Kettenbriefen wird der Empfänger aufgefordert, einen Geldbetrag an die oberste Adresse aus einer Liste zu senden und dann denselben Kettenbrief weiterzusenden, wobei er die Adresse des Geldempfängers löschen, alle anderen Adressen einen Platz hochrücken und die eigene Adresse an die unterste Stelle schreiben soll.

Raffinierter sind die Verknüpfungen mit Verkaufsaktivitäten: Man soll irgendwelche überbewerteten Putzmittel oder Kosmetika im Bekanntenkreis absetzen und diese Bekannten gegen Provision als Unterverkäufer gewinnen. Auch dieses »Multi-Level-Marketing« bringt seinen Beteiligten nur so lange etwas ein, wie sich genügend Dumme finden, die das Spiel mitspielen.

In Deutschland sind solche Aktivitäten im Gesetz gegen den unlauteren Wettbewerb ausdrücklich verboten (Kasten rechts unten).



POUR LA SCIENCE

seinen Anlegern) erlangt hat, um sich damit zu bereichern, und erfüllt damit den Tatbestand des Paragraphen 259 im Strafgesetzbuch (Kasten links unten). Der deutsche Gesetzestext sagt es zwar – im Gegensatz zum Beispiel zum französischen – nicht ausdrücklich, aber für die Strafbarkeit ist zwingend erforderlich, dass der Hehler von der Strafbarkeit der Vortat wusste oder wissen musste.

An dieser Stelle setzt das Argument des Insolvenzverwalters an, der für die Geschädigten möglichst viel vom Volumen der zusammengebrochenen Pyramide zu retten hat: Die versprochenen Zinsen waren so exorbitant, dass sie auf ehrlichem Wege unmöglich zu erzielen waren. Folglich musste der Anleger zu dem Schluss kommen, dass er sein Geld einem Kriminellen anvertraute.

Gerade im Fall Madoff ist diese Argumentation jedoch schwer durchzuhalten. Erstens sammelte Madoff sein Geld nicht direkt ein, sondern über eine Kette von Vermögensverwaltern, die mit zunehmender Entfernung vom Zentrum immer schlechter informiert waren. Deswegen richten aktuell viele Geschädigte ihre Klage nicht gegen Madoff selbst, sondern gegen das ihnen nächstliegende Glied in der Kette. Zweitens waren die Zinsen, die Madoff versprach, nicht astronomisch; allein die Tatsache, dass sie in erstaunlich gleichmäßiger Höhe, in guten wie in schlechten

Zeiten, ausgezahlt oder zumindest gutgeschrieben wurden, hätte professionelle Vermögensverwalter stutzig machen müssen. Drittens haben die Behörden nicht eingegriffen, obgleich, wie inzwischen bekannt ist, zahlreiche Verdachtsmomente vorlagen, und damit den Begünstigten einen guten Grund geliefert, ein möglicherweise angesagtes Misstrauen hintanzustellen. Die Untätigkeit des Staates spielt eine Schlüsselrolle beim Verschwinden des Anteils 4.

Insofern wäre der Staat für diesen Teil des Geldes, der den Opfern abgenommen wurde, haftbar. Aber zahlen wird er nicht, im Gegenteil: Er hat an den Gewinnen der Gewinner – in Form von Steuern – verdient und weigert sich zusätzlich, sich an den Verlusten der Verlierer, für die er mitverantwortlich ist, zu beteiligen. Mit gewissen Ausnahmen: Im Fall Madoff wurde einigen Betroffenen das Recht zugestanden, einen Teil ihrer Verluste von der Steuer abzusetzen.

Insgesamt findet sich ein Nutznießer in einer paradoxen Situation wieder. Je stärker sein Verdacht, dass er sein Geld einer kriminellen Vereinigung anvertraut, desto höher ist sein Risiko und desto eher sind hohe Zinsen als Prämie für dieses Risiko gerechtfertigt. Andererseits: Je stärker dieser Verdacht, desto näher kommt der Anleger einem Hehler, und desto eher muss er eben diese Prämie herausgeben.

## STRAFGESETZBUCH

## § 259: Hehlerei

(1) Wer eine Sache, die ein anderer gestohlen oder sonst durch eine gegen fremdes Vermögen gerichtete rechtswidrige Tat erlangt hat, ankauft oder sonst sich oder einem Dritten verschafft, sie absetzt oder absetzen hilft, um sich oder einen Dritten zu bereichern, wird mit Freiheitsstrafe bis zu fünf Jahren oder mit Geldstrafe bestraft.

...

Letztendlich kann nur der Anteil 1 wiedererlangt und den Opfern zurückgegeben werden. Diese haben nicht nur die – beträchtliche – Differenz zwischen den erträumten und dem realistisch erzielbaren Einnahmen zu beweinen, sondern auch den Verlust der Anteile 2, 3 und 4. Das ist bitter.

Führen wir unsere Überlegungen weiter. Stellen wir uns eine idyllische (eine »philanthropische«) Ponzi-Pyramide vor, deren Betreiber kein Geld für sich nimmt, keine Unkosten hat, keine Steuern zahlt und das Geld seiner Anleger zu marktüblichen Bedingungen investiert. Wenn diese Pyramide zusammenbricht, sind die Anteile 1, 2 und 3 am verlorenen Geld gleich null; nur Anteil 4 spielt noch eine Rolle. Alle Teilnehmer sind vergleichbar, einige haben in einem fairen Spiel das gewonnen, was andere verloren haben, wie bei einer Lotterie, bei der das eingesetzte Geld vollständig wieder ausgezahlt wird. Einen Unterschied gibt es allerdings: Die Anleger wissen nicht, dass sie an einer Lotterie teilnehmen.

Das Ganze ist also nichts anderes als ein Glücksspiel. Die Teilnehmer haben sich freiwillig zur Teilnahme entschieden, geblendet von den Gewinnaussichten und überzeugt, dass sie von einer nur ihnen zugänglichen Gelegenheit profitierten. (Madoff machte seine Kunden glauben, es sei ein besonderes Privileg, bei ihm investieren zu dürfen.)

### Gibt es seriöse Ponzi-Pyramiden?

Es stellt sich nun die Frage: Kann es unter gewissen Umständen rational sein, wissentlich einer Ponzi-Pyramide beizutreten?

Diese Frage wurde mehrfach analysiert im Zusammenhang mit dem Sozialversicherungssystem, insbesondere der Rentenversicherung. In der Tat hat diese etliches mit Ponzi-Pyramiden gemeinsam: Die Neueinsteiger bezahlen die Altinvestoren; und sie verspricht zumindest manchmal eine Rendite weit über dem Marktüblichen. Diese Versprechungen werden gegenwärtig gerade in Deutschland allmählich zurückgenommen; aber zu Zeiten starken Bevölkerungswachstums waren mit der Rentenversicherung traumhafte Renditen zu erzielen.

Muss man daraus schließen, dass die Rentenversicherung ebenso zusammenbrechen wird wie Madoffs Betrugsmasche? Nicht unbedingt. Solange die Bevölkerung exponentiell wächst, darf die Pyramide mit derselben Rate mitwachsen, ohne zusammenzubrechen. Für einen gewissen Zeitraum, nämlich den des Bevölkerungswachstums, sind Rentenversicherungen in der Tat Ponzi-Pyramiden. Und das kann Jahrzehnte oder gar Jahrhunderte dauern.

Beim Übergang von einer wachsenden zu einer stagnierenden oder abnehmenden Bevölkerung kann man, genügend Weitsichtigkeit vorausgesetzt, die Parameter des Systems langsam und vorsichtig verändern mit dem Effekt, dass das bisherige Ponzi-Schema in ein stabiles System überführt wird. Dies geschieht gegenwärtig in vielen Ländern. In eine solche Ponzi-Pyramide einzutreten ist – abgesehen davon, dass man kaum eine andere Wahl hat – in keiner Weise irrational.

Halten wir fest: Auch wenn man weiß, dass der Fonds von Herrn X eine Ponzi-Pyramide ist, die in naher Zukunft nicht zusammenbrechen wird, ist es rational, in diese für einen gewissen Zeitraum sein Geld zu investieren. Allerdings sollte man es sich zusammen mit den hohen Zinsen rechtzeitig wieder auszahlen lassen, so dass man im Moment des Zusammenbruchs nicht mehr dazu gehört.

Utpal Bhattacharya von der Indiana University in Bloomington hat eine andere, zunächst absurd erscheinende Frage gestellt. Kann es rational sein, kurz vor dem Zusammenbruch in eine Ponzi-Pyramide einzutreten?

Die erstaunliche Antwort ist »ja« – wenn Hoffnung besteht, dass die Opfer nach dem Zusammenbruch entschädigt werden. Dann nämlich ist die Entschädigung eine Auszahlung an die Spieler durch Nichtspieler. Erstere kommen plötzlich in den Genuss eines positiven Erwartungswertes einfach dadurch, dass sie mitspielen. Es ist so, als ob der Anleger an einer subventionierten Lotterie teilnähme, die mehr Geld ausschüttet, als sie durch den Verkauf der Lose einnimmt.

Bhattacharya merkt in seinem bereits 2003 publizierten Artikel an, dass einige Invest-

**Eine Rentenversicherung ist auch nur eine Ponzi-Pyramide: Die Neueinsteiger bezahlen die Altinvestoren**

## GESETZ GEGEN DEN UNLAUTEREN WETTBEWERB

### § 3 Verbot unlauterer geschäftlicher Handlungen

(1) Unlautere geschäftliche Handlungen sind unzulässig, wenn sie geeignet sind, die Interessen von Mitbewerbern, Verbrauchern oder sonstigen Marktteilnehmern spürbar zu beeinträchtigen.

...

(3) Die im Anhang dieses Gesetzes aufgeführten geschäftlichen Handlungen gegenüber Verbrauchern sind stets unzulässig.

#### ANHANG (ZU § 3 ABSATZ 3)

Unzulässige geschäftliche Handlungen im Sinne des § 3 Absatz 3 sind ...

14. die Einführung, der Betrieb oder die Förderung eines Systems zur Verkaufsförderung, das den Eindruck vermittelt, allein oder hauptsächlich durch die Einführung weiterer Teilnehmer in das System könne eine Vergütung erlangt werden (Schneeball- oder Pyramidensystem), ...

## EINZELHEITEN DES FALLS MADOFF

**Nach dem Zusammenbruch einer Ponzi-Pyramide** beginnt das große Aufräumen einschließlich der Entscheidung darüber, welchem der Beteiligten wie viel von dem noch greifbaren Geld zu steht. Das wirft im Fall Madoff höchst schwierige Fragen auf.

► Die Leute, die Madoff zu nahe standen, werden als Mittäter beschuldigt und müssen ihr Vermögen ganz oder teilweise herausgeben. Das gilt für seine Familie, für diejenigen seiner Freunde, die nach Lage der Dinge über die wahre Natur seiner Geschäfte informiert gewesen sein müssen, sowie andere, denen man vorhält, sie hätten bei den wunderlichen Renditen, die Madoff versprach, und den astronomischen Provisionen, die er für die Gewinnung neuer Anleger zahlte, stutzig werden müssen.

► Von denen, die sich kurz vor dem Zusammenbruch große Geldbeträge auszahlen ließen, wird ein Teil dieser Beträge zurückgefordert. Der zuständige Insolvenzverwalter beschuldigt diese Personen nicht der Mittäterschaft, ist jedoch nicht bereit, die ausgezahlten Beträge, zumindest jene der jüngsten Vergangenheit, als deren Eigentum anzuerkennen.

► Manche Leute haben ungewöhnlich hohe Erträge aus Einlagen in Investmentfonds erzielt, die ihrerseits das Geld bei Madoff anlegten, häufig ohne die Anleger darüber zu informieren.

Diese können schwerlich haftbar gemacht werden. Das gilt umso mehr, als ihnen manchmal versichert wurde, ihr Geld sei in amerikanische Staatsanleihen investiert worden.

Die verwirrende Vielzahl der Konten und Transaktionen der Madoff-Fonds macht eine genaue Klärung unmöglich; eine gerechte Regelung dieser Angelegenheit ist nicht mehr zu erreichen. Selbst auf einfache Fragen gibt es keine gute Antwort:

► Müssen wohlätige Organisationen die Geldspenden, die sie von Madoff erhalten haben, zurückgeben, zumindest die der jüngsten Vergangenheit?

► Was soll mit den Vermittlern geschehen, die beträchtliche Provisionen kassierten, aber von der Seriosität Madoffs überzeugt waren und bei ihm auch einen Teil ihres eigenen Geldes anlegten? Letztlich haben sie damit ein Vermögen verdient. Müssen sie zurückzahlen, was ihnen davon geblieben ist? Müssen sie die Wohnungen, die sie mit Geld aus der Pyramide gekauft haben, wieder verkaufen?

► Die »New York Times« berichtete, dass die zionistische Frauenorganisation Hadassah bei Madoff 90 Millionen Dollar verloren habe. Als aber die Ermittler deren Konten ab der Eröffnung 1987 untersuchten, stellten sie fest, dass die Organisation im Lauf der Jahre 37 Millionen Dollar investiert hatte (hauptsächlich durch zwei Einzahlungen auf Grund von Spenden). Dem standen Auszahlungen bis 2008 in Höhe von insgesamt 130 Millionen Dollar gegenüber. Somit hat diese Organisation bei Madoff 90 Millionen Dollar nicht verloren, sondern kassiert. Die eigentliche Nachricht bestand darin, dass diese Einnahmen nunmehr als *fictional profits* gelten und möglicherweise teilweise vom Insolvenzverwalter zurückgefordert werden. Andere Organisationen hingegen, die erst kurz vor dem Zusammenbruch investierten, haben sehr negative Bilanzen bis hin zum Totalverlust zu beklagen.



DPA / EPA, JUSTIN LANEY



**Jean-Paul Delahaye** ist Professor für Informatik an der Universität Lille 1; er forscht dort am Laboratoire d'informatique fondamentale.

**Artzrouni, M.:** The Mathematics of Ponzi Schemes. In: *Mathematical Social Sciences* 58(2), S. 190–201, 2009. Online unter [mpra.ub.uni-muenchen.de/14420/1/MPRA\\_paper\\_14420.pdf](http://mpra.ub.uni-muenchen.de/14420/1/MPRA_paper_14420.pdf).

**Bhattacharya, U.:** The Optimal Design of Ponzi Schemes in Finite Economies. In: *Journal of Financial Intermediation* 12, S. 2–24, 2003.

**Gubert, R., Saint-Martin, E.:** Et surtout n'en parlez pas à personne. Au coeur du gang Madoff. Albin Michel, Paris 2009.

**Páscoa, M. R., Seghir, A.:** Harsh Default Penalties Lead to Ponzi Schemes. In: *Games and Economic Behavior* 65(1), S. 270–286, 2009. Online unter [staff.aub.edu.lb/~webifeco/downloads/series1\\_2006.pdf](http://staff.aub.edu.lb/~webifeco/downloads/series1_2006.pdf).

**Zuckoff, M.:** *Ponzi's Scheme: The True Story of a Financial Legend.* Random House, New York 2005.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/1034794](http://www.spektrum.de/artikel/1034794).

mentfonds Ponzi-Pyramiden ähneln. Wenn man damit rechnen kann, dass die Opfer des Zusammenbruchs eines derartigen Fonds mit Staatsgeld entschädigt werden, dann ist es lukrativ, Ponzi-Pyramiden einzurichten, die rasch und zuverlässig zusammenbrechen.

Nach dem partiellen Zusammenbruch des internationalen Banken- und Finanzwesens im Jahr 2008 und der Entscheidung vieler Regierungen, den Steuerzahler zur Rettung von gefährdeten Unternehmen heranzuziehen, stellt sich die legitime Frage, ob nicht zumindest einige Akteure der von Bhattacharya vorgelegten

Argumentation gefolgt sind. Demnach wäre das ganze Finanzsystem eine große Ponzi-Pyramide, und die Geschädigten sind nicht die Teilnehmer, sondern alle anderen; die machen nämlich mit viel Geld ein System wieder flott, von dem andere profitiert haben. Recht und billig wäre es gewesen, den Akteuren des in Not geratenen Finanzsystems die Hilfe zu verweigern. Immerhin müssen sie, im Gegensatz zu Madoff und seinen Komplizen, nicht um das viele Geld in Form von Gehältern, Prämien, Provisionen und Boni fürchten, das sie in guten Zeiten eingenommen haben. ◀

# Ist Plexiglas wirklich ein Glas?

»Spektrum der Wissenschaft« fragte den Chemiker und Wissenschaftsjournalisten Klaus Jopp nach dem Werkstoff, aus dem die Rückleuchten sind.

Polymethylmethacrylat (PMMA), besser bekannt als Acryl- oder Plexiglas (Letzteres ist tatsächlich ein Markenname des Unternehmens Evonik Industries), ist ein Polymer, das durch Verkettung von Methymethacrylat-Bausteinen synthetisiert wird. Ein Kunststoff also, kein aus Silikaten hergestelltes anorganisches Glas. Fällt Licht darauf, lässt er aber bis zu 92 Prozent davon passieren. Denn genau wie beim herkömmlichen Glas handelt es sich um einen nicht-kristallinen Festkörper. Diese Struktur und die daraus folgenden physikalischen Eigenschaften sind für die hohe Transparenz verantwortlich.

Witterungs- und alterungsbeständig, hart und kratzfest wie sein anorganisches Pendant, ist Acrylglas aber weit weniger zerbrechlich. Es ist mit gängigen Verfahren der chemischen Industrie herzustellen und weiterzuverarbeiten, deshalb erfreut sich der Werkstoff insbesondere bei Produkten für den Massenmarkt großer Beliebtheit, beispielsweise im Automobilbau, wo daraus Rückleuchten, Tachoabdeckungen und Blinker entstehen.

Als Entdecker gilt Otto Röhm, der 1927 auf der Suche nach einem neuen Dichtungsmaterial Acrylkunststoff zwischen zwei Glasscheiben goss. Das Ergebnis war das erste Verbundsicherheitsglas, Lugglas genannt. Eines Tages ging die Prozedur aber schief, und die Scheiben lösten sich ab – Röhm hielt die erste PMMA-Platte in Händen. Angeblich rief er: »Jetzt bin ich aber perplex« und prägte so den Namen. 1933 kam der Werkstoff auf den Markt.

Er ist unglaublich vielseitig. Einer der spektakulärsten Einsätze war das aus Tausenden von Plexiglasen bestehende 74 800 Quadratmeter große Dach des Münchner Olympiaparks, das im Jahr 1972 der deutsche Architekt Frei Otto zu den Sommerspielen konstruiert hat und Stadion, Olympia- sowie Schwimmhalle überspannt.

## Haben auch Sie eine Frage zur Wissenschaft im Alltag?

Schreiben Sie an [redaktion@spektrum.com](mailto:redaktion@spektrum.com)

Aber seine Stärken liegen primär im Massenmarkt. Die chemische Industrie produziert Methymethacrylat aus Vorstufen und in mehreren Arbeitsprozessen. Man lässt das sirupartige Polymer dann entweder zwischen Glasplatten aushärten oder bringt es über Extruder genannte Maschinen als Strang aus, der, außen schon fest, innen aber noch weich, zu Granulat zerschnitten wird. Dieses Zwischenprodukt kann man dann wieder mit Extrudern aufschmelzen und durch speziell geformte Düsen pressen, um durchsichtige Stäbe, Rohre, Platten oder Folien zu produzieren. So entstehen etwa Verglasungen für Gewächshäuser und Möbelfronten, die Leuchtelemente von Verkehrsleitsystemen ebenso wie die Windabweiser entlang von Autobahnbrücken.

truder genannte Maschinen als Strang aus, der, außen schon fest, innen aber noch weich, zu Granulat zerschnitten wird. Dieses Zwischenprodukt kann man dann wieder mit Extrudern aufschmelzen und durch speziell geformte Düsen pressen, um durchsichtige Stäbe, Rohre, Platten oder Folien zu produzieren. So entstehen etwa Verglasungen für Gewächshäuser und Möbelfronten, die Leuchtelemente von Verkehrsleitsystemen ebenso wie die Windabweiser entlang von Autobahnbrücken.

## Zukunft in der Nanotechnik

Eine weitere Möglichkeit der Weiterverarbeitung ist der Spritzguss, bei dem das aufgeschmolzene und homogenisierte Granulat unter Druck in ein Formwerkzeug – eine Schablone des gewünschten Produkts – eingespritzt wird und darin erstarrt. So entstehen die erwähnten Rückleuchten. Mit dem Spritzblasen produziert man dagegen Hohlkörper: Eine kleinere und noch nicht erstarrte Acrylglasvorform wird im Werkzeug auf die Dimensionen des gewünschten Produkts aufgeblasen. Das Verfahren wird derzeit überwiegend für große Leuchtkörper verwendet.

Große Bedeutung könnte das Spritzprägen erlangen, das über das Formwerkzeug winzige Strukturen im Nanometermaßstab in das Plexiglas einprägt: insbesondere für anspruchsvolle optische Anwendungen eine interessante Entwicklung, etwa um Handys oder Kameras mit Displays auszustatten, die dank feinsten Oberflächenstrukturen weniger Reflexionen aufweisen, oder um Fresnellinsen zu fertigen, die Sonnenlicht auf Solarzellen bündeln.



Plexiglas ermöglichte die kühne Dachkonstruktion des Münchner Olympiaparks (links). Meist aber kommt dieser Kunststoff bei Massenprodukten zum Einsatz wie etwa beim Fahrzeugrücklicht (unten).





# Klimawandel im FREILANDEXPERIMENT

Wie wird sich das kommende Treibhausklima auf die Biosphäre auswirken?  
Mit Freilandversuchen messen Forscher die Effekte von veränderten Niederschlägen, Temperaturen oder Kohlendioxidkonzentrationen auf Pflanzen – und finden teils Überraschendes.

Von Stan D. Wullschleger und Maya Strahl

Die Erde erlebe gerade ein riesiges, unkontrolliertes Experiment – das äußerte vor 30 Jahren Charles F. Baes, Jr. Der Chemiker vom Oak Ridge National Laboratory (in Tennessee) des amerikanischen Energieministeriums warnte, die Folgen der zunehmenden Treibhausgase würden wir bald weltweit zu spüren bekommen. Inzwischen erkennen die Wissenschaftler, dass Waldrodung, Landverbrauch und die Nutzung fossiler Brennstoffe zur Erwärmung dieses Planeten beitragen. Doch wir wissen nicht genau, wie sich der Klimawandel auf Wälder oder Graslandschaften auswirken wird, auch nicht, welche Folgen dies für uns als Nutznießer der Ressourcen und Dienste der Natur hätte.

Vieles, was man hierzu hört oder liest, beruht allein auf Beobachtungen, jedoch nicht auf Experimenten. Wissenschaftler verfolgen inzwischen genau, wie sich die arktische Eisdecke oder die Gletscher verändern. Sie zeichnen akribisch die Verschiebungen auf, wann die Bäume im Frühjahr ausschlagen und dergleichen. Solche Daten sind zweifelsohne sehr wichtig. Doch mit dem Klimawandel befasste Biologen möchten die langsamen Veränderungen in der Tier- und Pflanzenwelt nicht einfach nur abwarten, sondern auch Vorhersagen für die Biosphäre treffen können. Deswegen konzipieren sie Feldstudien von oft recht großen Ausmaßen. So testen sie gezielt, was mehr – oder weniger – Regen,

mehr Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) oder steigende Temperaturen bewirken. Die Ergebnisse brauchen wir, um klar zu erkennen, wie die Ökosysteme unter dem Einfluss des Klimawandels in 10, 50 oder 100 Jahren aussehen werden. Die Tests zeigen auch Rückkopplungseffekte, die beobachtete Veränderungen noch verstärken. Auf die Weise lassen sich bloße Annahmen von Tatsachen trennen, was der emotionsgeladenen Klimadebatte zugutekommt.

Jahrelang pflegten Forscher für Klimastudien etwa das Verhalten von Einzelpflanzen zu untersuchen. Zumeist hielten sie ihre Versuchsobjekte über einige Monate in einem klimakontrollierten Raum. Diese experimentelle Ebene ist notwendig zum Verständnis von grundlegenden Mechanismen. Aber wir müssen die Pflanzen auch in ihrem natürlichen Umfeld testen, das heißt als Mitglieder von Ökosystemen. Viele Menschen wissen nicht, dass teils schon seit über zehn Jahren etliche groß angelegte Freilandexperimente laufen (auch in Deutschland), die veränderte Niederschläge oder höhere CO<sub>2</sub>-Konzentrationen simulieren, darunter die im Folgenden beschriebenen Versuche. Auch Temperaturexperimente haben angefangen. Mittlerweile fließen Daten aus solchen Studien in Modelle für zukünftige Klima- und Vegetationsveränderungen ein – und lassen genauer abschätzen, was veränderte Niederschlagsmuster und mehr Kohlendioxid auf der immer wärmeren Erde für Wälder, Prärien oder auch Agrarpflanzen bedeuten.

## In Kürze

- ▶ Auf kleinen Flächen von Wäldern, Gras- und bebautem Agrarland verändern Wissenschaftler die Temperatur, den Kohlendioxidgehalt der Luft oder die Niederschlagsmenge; dann beobachten sie **die Reaktion der Pflanzen**.
- ▶ Höhere Temperaturen und mehr Kohlendioxid bewirken zwar meist ein **stärkeres Blattwachstum** und **höhere Ernteerträge**. Allerdings kann das den Insektenbefall verstärken sowie die Abwehrkräfte der Pflanze gegenüber Schädlingen und Krankheiten schwächen.



Durch den Klimawandel könnte der Kohlendioxidgehalt der Luft deutlich ansteigen. Wie wird die Pflanzenwelt darauf reagieren? Forscher wollen es in Experimenten herausfinden.

## EXPERIMENTE MIT WASSERMENGEN

**PROBLEM:** Ein weltweiter Temperatur- und Kohlendioxidanstieg verändert auch die Niederschläge, aber von Ort zu Ort ganz verschieden. In manchen Gebieten dürften sie zu-, in anderen abnehmen.

**EXPERIMENT:** Verschiedenste Konstruktionen, die einen Teil der Niederschläge auffangen und umleiten, vermindern beziehungsweise erhöhen die den Pflanzen in einer definierten Parzelle verfügbare Wassermenge. Dergleichen erproben Forscher in Gras- und Waldgebieten, in der (baumlosen) Tundra des Nordens sowie auf Agrarflächen. Meistens verwenden sie dafür Trog- oder Rinnenkonstruktionen oder entsprechend geformte Überdachungen, die teils veränderbar sind. Das aufgefangene Wasser wird entweder ganz fortgeleitet oder einer anderen Fläche zugeführt, wo es für zusätzliche Nässe sorgt. Gräben oder Barrieren im Boden können verhindern, dass Wasser von außen zufließt oder Wurzelwerk über die Parzelle hinauswächst.

Bei einer Studie in einem Wald bei Oak Ridge in Tennessee fangen ausgeklügelte Vorrichtungen das Wasser auf Höhe der Stämme auf und leiten es zu anderen Parzellen (siehe Bilder). So lassen sich Flächen von Fußballfeldgröße künstlich trockener halten oder nässen. Ähnlich manipulieren Forscher an anderen Orten locker stehende Bäume, etwa in New Mexico Kiefern-Wachholder-Bestände (*Pinus edulis* – *Juniperus monosperma*). Dort untersucht Nathan McDowell vom Los Alamos National Laboratory, wie sich Trockenheit und Insektenbefall auf das Sterben von Bäumen auswirken.

**ERGEBNISSE:** Die Effekte sind keineswegs überall gleich. Um Modelle zu Klimafolgen zu entwickeln, müssen Forscher die oft komplexen lokalen Bedingungen und Wechselwirkungen berücksichtigen.



Nur ein Teil des Niederschlags erreicht den Boden. Viel wird aufgefangen und weggeleitet.

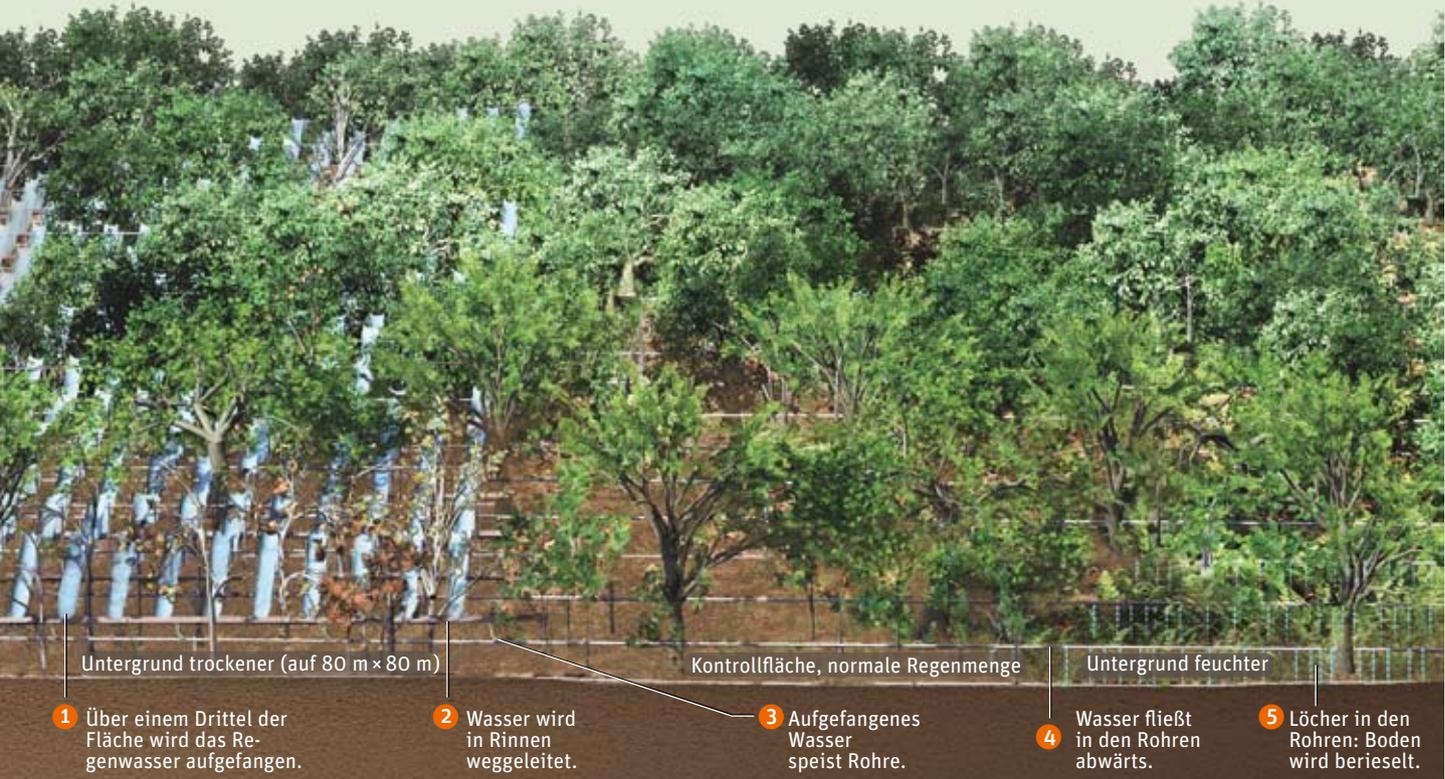
OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY

Eine Studie der Kansas State University in der Konza-Prärie ergab, dass manche Gräser Wassermangel besser aushalten als andere. Die Konkurrenz von Pflanzen um die Ressource Wasser dürfte zunehmen, wenn die Welt wärmer wird.

In gemäßigten Wäldern verkraften herangewachsene Bäume, die schon tief genug wurzeln, anhaltend verminderten Niederschlag. Das zeigte etwa Paul Hanson in einem 13 Jahre währenden Projekt. Dagegen überstanden von den jungen Bäumen und Keimlingen viele den Eingriff nicht. Am meisten litt der Wald bei Wasserknappheit im zeitigen Frühjahr, wenn der Stammdurchmesser wächst. Wasserentzug nach dem Ende der Wachstumsphase schadete kaum – solange sich die Bodenreserven vor der nächsten Wachstumsphase wieder auffüllten. Ganz anders im Amazonasregenwald: Dort beobachteten Forscher vom Woods Hole Research Center in Massachusetts, dass einige große Bäume im vierten künstlich trockeneren Jahr eingingen, hingegen jüngere Exemplare und Schösslinge dadurch weniger litten. Bei nur 40 Prozent des normalen Niederschlags fielen in diesem Regenwald tiefere Schichten des Untergrunds trocken, während die oberen Schichten feucht genug blieben. In gemäßigten Wäldern war es gerade umgekehrt.

## KÜNSTLICH MEHR ODER WENIGER REGEN

25 Meter hohe Eichen



DAVID FLEISCHER

## CO<sub>2</sub>-EXPERIMENTE: MEHR WACHSTUM – MANCHMAL

**PROBLEM:** Nach Einschätzung von Forschern nehmen die Ozeane und terrestrischen Ökosysteme mindestens die Hälfte des von fossilen Brennstoffen freigesetzten Kohlendioxids auf. Pflanzen nutzen es bei der Fotosynthese zum Aufbau von Kohlenhydraten. Aber werden höhere CO<sub>2</sub>-Konzentrationen diese Produktion verstärken? Und wird mehr CO<sub>2</sub> Art oder Zusammensetzung von aufgebauten Stoffen verändern, etwa von Abwehrsubstanzen – und sich damit auf Nutz- wie Schadinsekten und Krankheitserreger auswirken?

**EXPERIMENT:** Beim Oak Ridge National Laboratory läuft seit über zehn Jahren unter Leitung von Richard Norby das Experiment FACE (Free-Air CO<sub>2</sub> Enrichment). Auf vier Flächen des Versuchsgebiets strömt aus einem Kreis aufragender Rohre zusätzliches Kohlendioxid zu den Bäumen in der Mitte (Bilder). Die Menge wird genau gesteuert. Ähnliche Langzeitversuche erfolgen weltweit an fast 35 weiteren, teils natürlichen, teils vom Menschen gelenkten Ökosystemen. Die kleinsten Parzellen in Sümpfen haben einen Meter Durchmesser; manche auf Ackerflächen betragen 23, die größten in Forstwäldern 30 Meter.

**ERGEBNISSE:** Die Daten bestätigen es: Mehr CO<sub>2</sub> verstärkt die Fotosynthese, so dass die Pflanzen mehr Kohlenstoff in Geweben fixieren, also mehr Biomasse bilden. Diese gesteigerte Nettoprimärproduktion erhalten sie über mehrere Vegetationsperioden aufrecht. Waldexperimente in Wisconsin, North Carolina, Tennessee und Italien ergaben bei einem CO<sub>2</sub>-Gehalt von 550 ppm (millionstel) eine im Jahr um 23 Prozent erhöhte Biomasseproduktion; normal sind derzeit etwa 388 ppm (gegenüber

unter 300 ppm vor 150 und 360 ppm vor rund zehn Jahren). Innerhalb der nächsten 100 Jahre könnte die Konzentration auf den untersuchten Wert anwachsen, sofern wir die Emissionen nicht drosseln. Neueren Modellierungen zufolge würden die Pflanzen auf die höheren CO<sub>2</sub>-Werte günstig reagieren, zumindest dort, wo die Böden genügend Nährstoffe bieten, etwa Stickstoff.

Bei all diesen Studien stieg die Produktion etwa in gleichem Maß. Das zeigt allerdings nur an, wie viel Kohlenstoff eine Pflanze zusätzlich fixiert, nicht dessen späteren Verbleib. Die Weihrauchkieferwälder North Carolinas speichern ihn vor allem in Stämmen und Ästen, ein Platz für Jahrzehnte. Dagegen landet in Wäldern des Amerikanischen Amberbaums in Tennessee das meiste in feinen, neuen Wurzeln. Natürlich nutzt auch das dem Baum, doch die Würzelchen leben nur Wochen bis höchstens ein Jahr. Später werden sie von Mikroben zersetzt, und viel von diesem Kohlenstoff gelangt wieder in die Atmosphäre. Über den Grund für solche Unterschiede hoffen Forscher in nächster Zeit einiges zu erfahren, denn an verschiedenen Versuchsorten steht an, Bäume für Studienzwecke zu fällen und Bodenproben zu nehmen.

Schon jetzt zahlen sich die CO<sub>2</sub>-Experimente aus. Mitarbeiter verschiedener Forschungsstätten, darunter James Randerson von der University of California in Irvine, bewerten und verbessern mit den gewonnenen Daten eine der großen globalen Klimamodellierungen, das Community Climate System Model (CCSM). Es simuliert die physikalischen, chemischen und biologischen Prozesse, die das Klimasystem der Erde steuern.

### DAS FACE-EXPERIMENT



OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY

Kreisförmige Parzellen werden über aufragende Rohre kontrolliert mit CO<sub>2</sub> begast.



DAVID FIEBSTEIN

## TEMPERATUREXPERIMENTE: NOCH VERBESSERUNGSBEDARF

**PROBLEM:** Die Erderwärmung wird einzelne geografische Gegenden unterschiedlich stark treffen. Bis 2100 steigt die Temperatur in Nordamerika im Winter um 3,8 bis 5,9 Grad, im Sommer um 2,8 bis 3,3 Grad. Das wirkt sich auf den Stoffwechsel von Pflanzen aus, auf die Verfügbarkeit von Wasser und Nährstoffen aus dem Boden, auf die Konkurrenz zwischen Pflanzen sowie die Bedrohung durch Pflanzenfresser, Insekten und Krankheitserreger.

**EXPERIMENT:** Um die Temperatur zu erhöhen, erproben Forscher an recht kleinen Parzellen verschiedene Verfahren – etwa Infrarot-Wärmelampen; elektrische Heizbänder im Boden; große, durchsichtige, oben offene Plastikzylinder, in die Warmluft bläst. Diese Verfahren haben Vor-, aber auch Nachteile. Bei den meisten können nur kleine Flächen oder nur Ausschnitte des Ökosystems manipuliert werden. Manche erwärmen den Boden im Verhältnis zu stark. Passiv funktionierende Wärmekammern sind von der

Tages- und Jahreszeit abhängig; Regen, Wind und Sonne wirken dann anders, was die Dateninterpretation erschwert.

**ERGEBNISSE:** Besonders empfindlich reagieren arktische Ökosysteme und die unmittelbar angrenzenden kaltgemäßigten Waldgebiete auf Temperaturänderungen. Beim International Tundra

Experiment unter Greg Henry von der University of British Columbia in Vancouver (Kanada) verwenden die Forscher in verschiedenen Ländern an über einem Dutzend Standorten passive Wärmekammern, um kleinen Flächen Wärme zuzuführen. Soweit sich das bisher sagen lässt, bewirken ein bis drei Grad Erwärmung, dass Sträucher und Gräser auf Kosten von Moosen und Flechten besser wachsen und mehr Bodenfläche einnehmen – passend zur These, dass die Biodiversität hoher Breiten unter der Erwärmung leiden wird. Bei mehr Gehölzen und weniger krautigen Pflanzen hielte die Erde zudem mehr Energie zurück,



Solche oben offenen Kammern bieten Setzlingen und jungen Bäumen das ganze Jahr über kontrolliert wärmere Bedingungen.

Sojapflanzen wuchsen bei mehr CO<sub>2</sub> und Ozon zwar stärker in die Höhe, litten aber auch mehr unter Schadinsekten – hier Japankäfern, mittlerweile in den USA eine Plage.



Experimentelle Studien an den verschiedensten Orten weltweit zeigen ein bemerkenswertes Potenzial von Pflanzen und Ökosystemen, sich an neue Verhältnisse anzupassen. Allerdings erwarten Biologen Grenzwerte, die nicht überschritten werden dürfen. Ansonsten drohen krasse, sogar katastrophale Folgen. Die Erforschung der Schwellenwerte wird noch manche Überraschung bringen, doch so viel lesen die Experten aus den Freilandstudien schon heraus.

### Die wichtigsten Befunde bisher

➤ Höhere CO<sub>2</sub>-Konzentrationen können zwar die Erträge etwa von Weizen, Reis, Gerste, Soja oder Baumwolle steigern; andererseits wirkt eine Klimaerwärmung, und mancherorts eine hohe Ozonbelastung, dem »Düngeeffekt« entgegen, bis hin zu dessen Aufhebung. Der Klimawandel wird auch die Beziehungen zwischen Nutzpflanzen, Unkräutern, Krankheitserregern und Insekten verändern. Meist tragen dann die Schädlinge den Sieg davon.

➤ Die Laubwälder im Osten der USA sind gegen Trockenheiten eher unempfindlich. Dort speichern tiefere Bodenschichten genug Wasser, so dass große Bäume über das Jahr wachsen. Doch die oberen Schichten halten

nicht genug Wasser und trocknen schnell aus. Schösslinge und junge Bäume – unsere Wälder der Zukunft – überstehen das oft nicht.

➤ Ein stärkeres Wurzelwachstum durch einen höheren CO<sub>2</sub>-Gehalt in der Luft könnte die Nährstoffversorgung der Pflanzen verbessern und somit die Produktivität junger Wälder steigern. Für Ökosysteme in trockenen und ariden Lagen wäre eine vermehrte Wurzelbildung in der Tiefe von Vorteil, weil die Pflanzen das im Boden gespeicherte Wasser besser nutzen könnten.

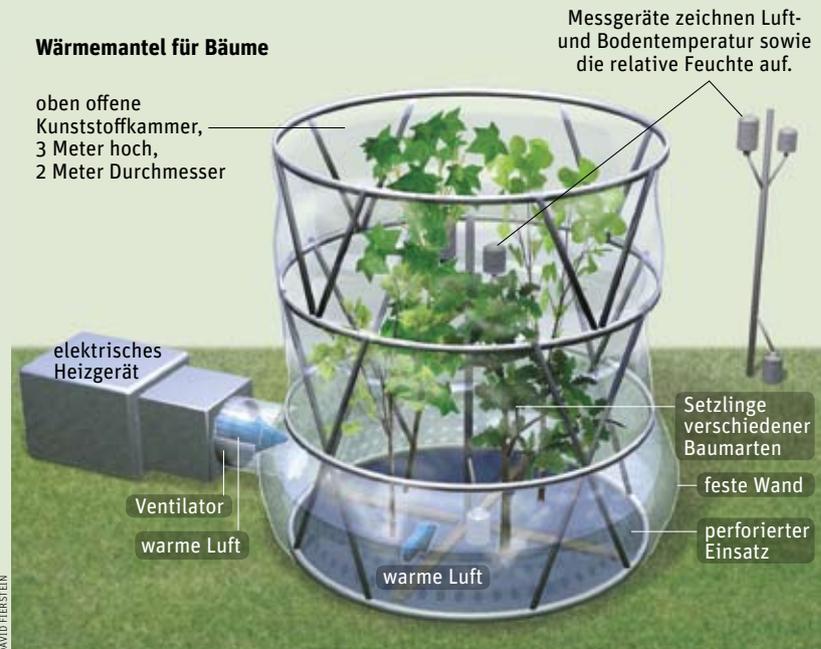
➤ In der Landwirtschaft könnten eine globale Erwärmung und steigende CO<sub>2</sub>-Konzentrationen die Ausbreitung vieler Unkräuter fördern, etwa Disteln, und somit die Ernteerträge mindern oder mehr Herbizide erfordern. Auch Exoten würden sich dann leichter breitmachen. Die Dach-Trespe etwa, ein Süßgras aus der Alten Welt, ist heute weltweit eine Plage. Bei einem CO<sub>2</sub>-Test in der Mojave-Wüste im Südwesten der USA von Stan Smith von der University of Nevada in Las Vegas verbreitete sich dieses Gras in einem besonders regenreichen Jahr bei erhöhtem CO<sub>2</sub>-Angebot stark. Die Pflanzenvielfalt litt darunter, die normale Nahrungskette war gestört, und die Brandgefahr wuchs.

die sonst in den Weltraum abstrahlt. Das würde die globale Temperatur weiter erhöhen.

Ähnliche Eingriffe, die in anderen Breiten stattfanden, lassen befürchten, dass Organismen mancherorts aussterben, abwandern und Artenzusammensetzungen sich verändern. Carla Gunderson vom Oak Ridge National Laboratory hat das Verhalten von vier Laubbaumarten untersucht, wenn die Temperatur um bis zu vier Grad steigt (Bilder). Die Keimlinge und Schösslinge konnten sich daran anpassen. Zumeist wuchsen sie stärker. Im Frühjahr schlugen die Bäume ein bis zwei Wochen früher aus, im Herbst behielten sie ihre Blätter länger, im Ganzen eine Verlängerung der Wachstumsphase um bis zu drei Wochen. Ob die Pflanzen nun mehr unter Spätfrösten leiden, weil sie früher »aufwachen«, bleibt abzuwarten.

Die bisherigen Ergebnisse sind zwar brauchbar, jedoch schwer auf Ökosysteme übertragbar. Nötig wäre es, größere Gebiete zu manipulieren. Diente als Wärmequelle bisher hauptsächlich Elektrizität, so eignet sich für abgelegene Orte vielleicht Erdgas oder Erdwärme besser.

## JUNGE BÄUME UNTER KÜNSTLICHEM ANPASSUNGSDRUCK



► Dass Gehölze in den letzten 200 Jahren zunehmend in Grasgebiete vorgedrungen sind, geht zwar hauptsächlich auf Überweidung und Brandbekämpfung zurück. Allerdings dürfte in den amerikanischen Prärien auch der CO<sub>2</sub>-Anstieg weiterhin dazu beitragen.

► Auf dem Weg über Pflanzen könnte der CO<sub>2</sub>-Anstieg unsere Gesundheit beeinträchtigen, zum Beispiel weil Pollenaufkommen ansteigen und mehr Allergien auftreten. Oder man denke an den hochallergenen Giftefeu, der sich in Nordamerika immer mehr ausbreitet und bei den meisten Menschen schwere Hautreaktionen verursacht.

### Endlich datengestützte Prognosen

Die meisten solchen Studien liefen bisher in mittleren Breiten, zudem hauptsächlich in Europa und den USA. Für Prognosen, was der Klimawandel in tropischen Ökosystemen, Tundren und Nadelwäldern der kalgemäßigten Zone anrichten wird, müssen Freilandexperimente auch diese Breiten abdecken. Wegen der in der Regel schwierigen Durchführung und der abgelegenen Standorte erfordert jedes einzelne Experiment jahrelange Vorbereitungen. Nur ein erhebliches Maß an technischer Planung stellt sicher, dass die Be-

dingungen bei einem Versuch einheitlich sind und die Vorrichtungen über Jahre halten.

In zukünftigen Projekten sollen nicht nur Einzelfaktoren manipuliert, sondern CO<sub>2</sub>, Temperatur und Niederschlag zugleich verändert werden. Hiermit steht die Forschung erst am Anfang. In der Nähe von Cheyenne in Wyoming begann jetzt eine Studie in einer nördlichen Prärie, die erfasst, wie die verschiedenen Gräser mit gleichzeitigen Temperatur- und CO<sub>2</sub>-Veränderungen zurechtkommen. Schon im ersten Jahr des Versuchs fand Jack Morgan vom Agrarforschungsdienst des US-Agrarministeriums Anzeichen dafür, dass wärmere Bedingungen zusammen mit einem CO<sub>2</sub>-Anstieg Sommergräser zunehmen lassen, die auch bei Trockenheit wachsen, auf Kosten von Gräsern, die im Frühjahr und Herbst sprießen und im Sommer ruhen.

Wie man am besten vorgeht, um eine Anzahl von Umweltfaktoren zugleich zu verändern, und wie das samt möglichen Rückkopplungen in Modelle einfließen kann, wirft komplexe Fragen auf. Trotzdem benötigen wir dringend experimentelle Belege, damit die Gesellschaft weiß, was sie angesichts des Klimawandels erwartet, der sich bereits vollzieht, und wie sie damit umgehen sollte. ◀



**Stan D. Wullschleger** ist Biologe und leitet am Oak Ridge National Laboratory (Tennessee) die Forschungsgruppe Plant Systems Biology. **Maya Strahl** arbeitet am Cold Spring Harbor Laboratory in New York.

**Ainsworth, E. A. et al.:** Next Generation of Elevated [CO<sub>2</sub>] Experiments with Crops: A Critical Investment for Feeding the Future World. In: Plant, Cell and Environment 31, S. 1317–1324, 2008.

**Ziska, L. H. et al.:** Rising CO<sub>2</sub>, Climate Change, and Public Health: Exploring the Links to Plant Biology. In: Environmental Health Perspectives 117(2), S. 155–158, Februar 2009.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/1034795](http://www.spektrum.de/artikel/1034795).

TELEFONIE

# GRENZENLOSE



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

# KOMMUNIKATION

Drahtlosnetze ohne feste Infrastruktur können jederzeit und überall für Verbindung sorgen. Allerdings wirft ihre Realisierung noch logistische Probleme auf.

Von Michelle Effros, Andrea Goldsmith und Muriel Médard

In unserer von Facebook, Twitter und dem iPhone geprägten Zeit halten wir es für selbstverständlich, stets Verbindung zur ganzen Welt aufnehmen zu können. Doch nicht immer und überall existiert die dafür nötige Infrastruktur. In Haiti etwa waren nach dem Erdbeben Anfang des Jahres die von Hilfsorganisationen bereitgestellten Satellitentelefone in den betroffenen Gebieten tagelang das einzige Kommunikationsmittel. Aber auch etwas so Gewöhnliches wie ein Stromausfall kann, wenn er mehrere Stunden dauert, die Infrastruktur der Mobilfunknetze lahmlegen; ein Notruf per Handy ist dann nicht mehr möglich.

Einen Ausweg in solchen Situationen, der immer mehr an Bedeutung gewinnt, bieten so genannte Ad-hoc-Netze. Sie entstehen selbstständig, sobald sich entsprechend programmierte Handys oder andere Kommunikationsmittel nah genug kommen. Dabei fungiert jedes beteiligte Gerät nicht nur als Sender und Empfänger, sondern zugleich als Vermittlungsstelle oder Transmitter für alle anderen innerhalb seiner Reichweite. Auch eine Kommunikation zwischen weiter entfernten Handys ist dadurch möglich, sofern diese über Zwischen-

glieder miteinander verbunden sind: Nachrichten werden dann wie das Wasser in einer Eimerkette von Telefon zu Telefon weitergeleitet. Jedes Gerät bildet dabei als Knoten des Netzwerks einen Bestandteil der Infrastruktur für die Kommunikation aller anderen.

Katastrophenhilfe ist nur ein mögliches Einsatzgebiet für Ad-hoc-Netze. Sie bieten sich überall da an, wo der Aufbau einer festen Infrastruktur zu lange dauert, zu schwierig ist oder zu viel kostet. Zum Beispiel hat das Militär schon viel Geld in die Entwicklung solcher Systeme für den Kampfeinsatz gesteckt.

Aber auch im Haushalt könnten sich die verschiedenen elektronischen Geräte selbstständig zu einem Ad-hoc-Netz verbinden und automatisch in Kontakt treten; dann wäre endgültig Schluss mit dem leidigen Kabelgewirr. An abgelegenen Orten und in strukturschwachen Regionen ohne Breitbandinfrastruktur ließe sich auf diese Weise ein Hochgeschwindigkeitszugang zum Internet einrichten. Schließlich könnten Wissenschaftler, die schwer zugängliche Kleinmilieus wie Baumkronen von Urwaldriesen oder heiße Quellen am Meeresgrund untersuchen, dort einfach Sensoren verteilen, ohne sich darum kümmern zu müssen, welche Geräte Kontakt miteinander haben werden oder wie die Daten zum Rechner gelangen.

## In Kürze

► **Drahtlose Ad-hoc-Netze** benötigen keine feste Infrastruktur. Sie übertragen die Informationen unmittelbar von Gerät zu Gerät und bilden dabei ein **Geflecht aus direkten Verbindungen**.

► Einsatzgebiete liegen dort, wo der Aufbau eines herkömmlichen Mobilfunknetzes zu umständlich oder zu teuer wäre – zum Beispiel **in abgelegenen Regionen** oder Kriegsgebieten.

► Weil sich Ad-hoc-Netze ständig verändern, erfordern sie neuartige Methoden, um **Datenverluste zu vermeiden** und Störungen zu minimieren.



GETTY IMAGES / AP / JODY ANNET

**Katastrophen wie das Erdbeben in Haiti zerstören die Kommunikationsinfrastruktur oft gerade dann, wenn sie am nötigsten gebraucht wird. Ad-hoc-Netze ermöglichen auch in solchen Situationen einen Kontakt zwischen Opfern und Helfern sowie mit der Außenwelt.**

**Ad-hoc-Netze passen sich automatisch an, wenn Geräte ausscheiden oder neue hinzukommen**



Seit mehr als drei Jahrzehnten wird schon über solche Netze geforscht, aber erst in den letzten Jahren haben Fortschritte in der Netzwerktheorie ihren praktischen Einsatz in großem Stil in greifbare Nähe gerückt. Ein Beispiel ist das Projekt »Free the Net« des Startup-Unternehmens Meraki Networks, das inzwischen 400 000 Einwohnern San Franciscos Zugang zum Internet bietet. Eine spezielle Software verbindet dabei Handys, Spielcomputer und Laptops über Bluetooth zu einem kabellosen Ad-hoc-Netz, das keine explizite Konfiguration erfordert. Auf analoge Weise sammeln auch Forscher schon vielfach in abgelegenen oder unbewohnbaren Gegenden mit drahtlosen Niedrigenergie-Sensoren wissenschaftliche Daten. Allerdings bleiben noch etliche Probleme zu lösen, bevor die Technik überall einsetzbar ist.

### Vergleich mit dem Mobilfunknetz

Die Schwierigkeiten, die der Verbreitung von Ad-hoc-Netzen entgegenstehen, lassen sich am besten durch den Vergleich mit anderen drahtlosen Technologien wie Mobiltelefonen und Wi-Fi illustrieren. Ruft man mit einem normalen Handy einen Freund an, erfolgen nur die Übertragungen zwischen den beiden Handys und der Antenne der jeweiligen Funkzelle drahtlos. Die Antennen sind dagegen fest montiert und leiten die Signale über Drähte und Kabel weiter. Lokale drahtlose Netzwerke (WLANs) wie Wi-Fi nutzen ebenfalls fest installierte Router oder Hotspots, die dann per Kabel die Verbindung zum Internet herstellen.

Das hat Vor- und Nachteile. Für die Informationsübertragung wird Strom gebraucht.

Klassische Drahtlosnetze gehen sparsam mit der Energie der batteriebetriebenen Geräte wie Handys und Laptops um, indem sie so viel wie möglich von der Kommunikationslast auf die stationäre Infrastruktur übertragen, die ja am Stromnetz hängt.

Auch die Bandbreite der drahtlosen Übertragung ist eine unveränderliche, begrenzte Ressource. Um sie zu schonen, übertragen herkömmliche Systeme die große Masse der Daten per Kabel. Mit einer festen Infrastruktur lassen sich folglich große, weitgehend zuverlässige Telefon- und Wi-Fi-Kommunikationssysteme in Gebieten mit hohem Bedarf einrichten.

Gerade diese feste Infrastruktur macht solche Netzwerke aber auch verwundbar: Lang anhaltende Stromausfälle, die sich mit Notstromaggregaten nicht mehr überbrücken lassen, oder andere Störungen in den zentralen Einrichtungen können das komplette Kommunikationssystem lahmlegen, obwohl die Handys und Laptops selbst noch funktionieren. Ad-hoc-Netze sind gegen solche Störungen immun. Sie passen sich automatisch an, wenn Geräte ausscheiden oder neue hinzukommen. Hat ein Handy keinen Strom mehr oder wird es ausgeschaltet, modifizieren die übrigen Komponenten das Netzwerk, um den Ausfall weitestgehend auszugleichen.

Diese Fähigkeit zur Selbstheilung hat aber ihren Preis. Das Netzwerk muss die Information in einer Form weiterleiten, dass sich eine Nachricht selbst dann noch rekonstruieren lässt, wenn einige der Stationen zwischen Sender und Empfänger während der Übertragung ausfallen. Das System muss außerdem den besten Weg zum Adressaten finden, obwohl das sendende Gerät keine Möglichkeit hat, den Standort des Empfängers zu bestimmen. Schließlich muss das Netz mit dem allgegenwärtigen Rauschen fertigwerden, das die Vielzahl gleichzeitig sender und empfangender Geräte verursacht.

Diese Anforderungen sind schwer zu erfüllen. Ein traditionelles Mobilfunk- oder anderes Netz kann dank seiner festen Infrastruktur ständig die Position jedes einzelnen Geräts feststellen und so die Nachricht vom Absender direkt an den Empfänger weiterleiten. In einem Ad-hoc-Netz dagegen muss jede Komponente selbst bestimmen, welches der beste Weg für die Übermittlung einer Information ist. Rechenkapazität, nutzbarer Speicherplatz und Kommunikationsmöglichkeiten der Einzelgeräte sind ziemlich begrenzt. Deshalb ist keines allein im Stande, alle Informationen, über die der Zentralcomputer eines herkömmlichen Kabelnetzes verfügt, zu sammeln und zu verarbeiten.

Um sich ein Bild von den Anforderungen zu machen, können Sie sich vorstellen, Sie befänden sich in einer Metropole wie London und wollten Ihren Freund anrufen, der sich irgendwo am anderen Ende der Stadt aufhält. Nehmen wir an, die kleinen, mobilen Transmitter wären auf den Dächern von Taxis angebracht und hätten Reichweiten von maximal einem Kilometer. Ihre Nachricht muss dann von Fahrzeug zu Fahrzeug weitergeleitet werden.

Die Taxis bewegen sich kreuz und quer durch die Stadt. Jedes stellt mit seiner Antenne Kontakt zu allen anderen in seiner Nähe her; viele dieser Verbindungen brechen aber eine unbestimmte Zeit später wieder ab. Ihr Anruf muss in diesem sich ständig verändernden Netzwerk also von einem Transmitter zum nächsten hüpfen und dabei ohne Kenntnis des Standorts Ihres Freundes den Weg zu ihm finden.

### Raffinierte Übermittlungsstrategien

Selbst für eine einzelne Nachricht, die sich durch ein kleines Netz bewegt, ist das reichlich kompliziert; mit zunehmender Anzahl an Geräten und Nachrichten wird die Aufgabe aber immer schwieriger. Und für einen breiten Einsatz im Alltag muss das Verfahren un-

abhängig von der Größe des Netzwerks effizient funktionieren.

Techniker haben viele Methoden zur Lösung dieses Problems erdacht. Alle beruhen im Kern auf einer Vielzahl von Erkundigungen. Eine Vermittlungsstelle fragt ihre Nachbarn, welche Handys sich in deren Reichweite befinden; die Nachbarn wollen das Gleiche von anderen Transmittern in ihrer Umgebung wissen und so weiter, bis das Handy Ihres Freundes gefunden ist. Dann wird die Nachricht an ihn übermittelt. Dessen Antwort kann denselben Weg zurück nehmen oder sich auch einen anderen suchen.

Im Endeffekt erstellt jeder Transmitter also eine Liste aller verfügbaren Wege zwischen Ihnen und Ihrem Freund. Mit Hilfe dieser Listen kommt die Nachricht ans Ziel, auch wenn Ihr eigenes Gerät gar nicht weiß, wo es sich befindet. Weil sich das Netzwerk ständig verändert, müssen alle Transmitter die Prozedur aus Abfrage und Rückmeldung ständig wiederholen, damit die Karte der verfügbaren Verbindungen auf dem aktuellen Stand bleibt.

Außerdem empfiehlt es sich, parallel verschiedene Wege für die Übertragung zu nutzen; das erhöht die Chance, dass die Nachricht wirklich bei Ihrem Freund ankommt. Allerdings fragt sich, wie viel Redundanz nö-

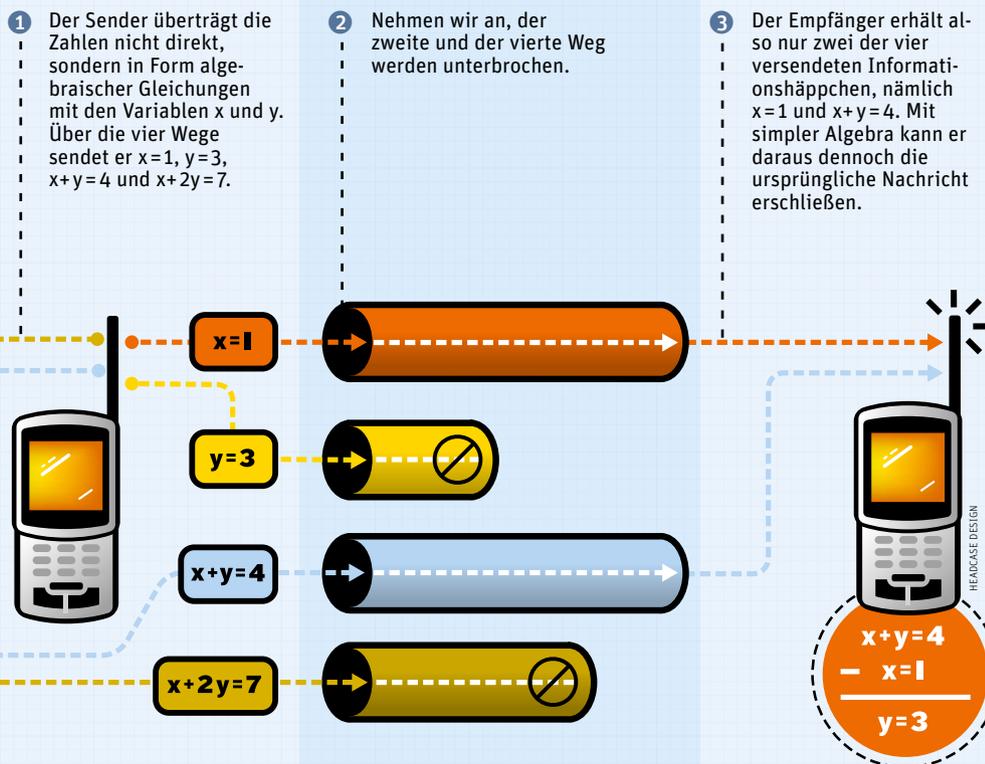
Ein Anruf muss in einem ständig wechselnden Netzwerk den Weg zum Empfänger finden, ohne dass dessen Standort bekannt ist



## GESCHICKTE ABSICHERUNG GEGEN DATENVERLUST

### In einem drahtlosen Ad-hoc-Netz

kann der Weg, den eine Nachricht nimmt, jederzeit unterbrochen werden. Wie erreicht man, dass sie trotzdem ankommt? Die gängige Methode ist, sie vor dem Absenden so zu zerlegen und zu kodieren, dass sie sich nach dem Empfang auch dann noch rekonstruieren lässt, wenn Teile verloren gehen. Im hier gezeigten einfachen Beispiel besteht die Nachricht aus den Zahlen 1 und 3. Es gibt vier mögliche Übertragungswege mit einer Ausfallwahrscheinlichkeit von 50 Prozent. Verfährt man nach der naiven Methode, die Ziffern jeweils einzeln über zwei unterschiedliche Wege zu senden, könnte es passieren, dass genau die beiden Verbindungen ausfallen, auf denen die gleiche Zahl übertragen wird. Diese geht dann verloren. Ein raffinierteres Verfahren garantiert auch beim Versagen von zwei der vier Verbindungen die vollständige Übertragung.



tig ist. Um ganz sicherzugehen, könnte man die gesamte Nachricht gleichzeitig auf allen Wegen übertragen. Das maximiert zwar die Wahrscheinlichkeit, dass sie ans Ziel gelangt, würde das Netz aber schnell überlasten. Das andere Extrem wäre, sie in viele Häppchen aufzuteilen und jedes auf einem anderen Weg zu verschicken. So würden deutlich weniger Netzressourcen beansprucht; allerdings könnten einzelne Häppchen unterwegs verloren gehen, so dass die Nachricht verstümmelt beim Empfänger ankäme.

**Literaturhinweise**

**Culler, D. E., Mulder, H.:** Kollektive Intelligenz der Kleinstcomputer. In: Spektrum der Wissenschaft 10/2004, S. 86–93.

**Effros, M., Koetter, R., Médard, M.:** Staufrei fahren auf der Datenautobahn. In: Spektrum der Wissenschaft 3/2008, S. 88–95.

**Koetter, R., Effros, M., Médard, M.:** On a Theory of Network Equivalence. IEEE Information Theory Workshop on Networking and Information Theory, Volos, Griechenland. S. 326–330, 2009.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/1034796](http://www.spektrum.de/artikel/1034796).

Die üblicherweise angewandte Methode der Netzkodierung bewegt sich in der Mitte zwischen beiden Extremen. Dabei wird die Nachricht ebenfalls in Häppchen zerlegt, von jedem Abschnitt aber eine Zusatzinformation ermittelt und auf getrenntem Weg versendet. So lässt sich die ursprüngliche Botschaft selbst dann noch rekonstruieren, wenn Teile den Empfänger nicht erreichen (Kasten auf S. 89).

Des Weiteren fragt sich, wie viele Wege eine Nachricht nehmen sollte. Je mehr es sind, desto geringer ist der Schaden beim Ausfall einer Route. Dafür aber steigt die Anzahl der an einem Anruf beteiligten Geräte. Einerseits verteilt sich die Last der Übertragung auf mehrere Teilnehmer, was deren Stromverbrauch verringert; andererseits erhöht sich der Aufwand für die Koordination.

Wenn mehrere Geräte gleichzeitig Daten übertragen – die zu einem einzigen oder auch zu verschiedenen Gesprächen gehören –, wächst außerdem die Gefahr gegenseitiger Störungen. So schwer es für uns ist, etwas zu verstehen, wenn viele Leute durcheinanderreden, so schwer fällt es einem Handy, übertragene Informationshäppchen zusammensetzen, wenn gleichzeitig andere Signale eingeht. Für ein drahtloses Ad-hoc-Netz ist dieses Problem noch gravierender, weil ihm die Zentrale fehlt, die alle Aktivitäten der Teilnehmer koordiniert.

Es gibt zwei Möglichkeiten, dem abzuwehren. Die eine besteht in der Konfliktvermeidung. Wenn Übertragungen selten sind, sollten sie sich kaum je zufällig überschneiden. Aus diesem Grund zerlegt jedes Gerät die Nachrichten in kleine Häppchen, die es in kurzen Pulsen mit langen Pausen dazwischen weiterleitet. Sofern benachbarte Sender dasselbe tun, ist eine gleichzeitige Übertragung unwahrscheinlich. Deshalb bleibt die gegenseitige Störung geringer, als wenn alle Geräte Informationen in einem langsamen, stetigen Strom übermitteln. Der am weitesten verbreitete Standard für Drahtlosnetzwerke von PCs nutzt dieses Pulsverfahren.

Bei der zweiten Methode dürfen zwei Sender zwar gleichzeitig Informationen an einen

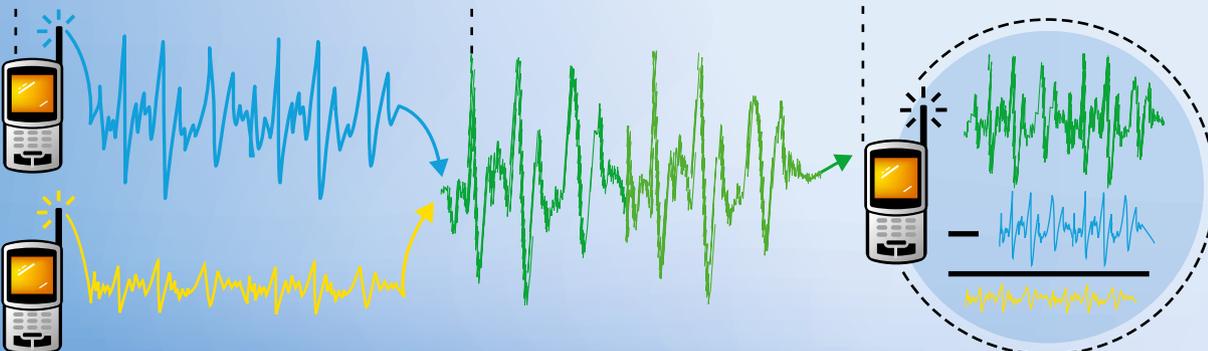
**SIGNALTRENnung DANK UNTERSCHIEDLICHER LAUTSTÄRKE**

**Überlagerungen von Nachrichten** sind ein ernstes Problem für drahtlose Ad-hoc-Netze. Wenn viele Geräte gleichzeitig senden, kann es schwierig sein, die einzelnen Datenströme auseinanderzuhalten. Ein möglicher Ausweg ist das Übertragen mit unterschiedlichen Intensitäten. Die Methode funktioniert gut bei zwei Sendern und einem Empfänger; sie auf komplexere Netzwerke anzuwenden, ist Gegenstand aktueller Untersuchungen.

1 Zwei Sender übertragen Informationen; der eine ist auf laut gestellt, der andere auf leise.

2 Das aus beiden kombinierte Signal hat große Ähnlichkeit mit dem lauten.

3 Der Empfänger erkennt direkt, was laut übertragen wurde. Anschließend zieht er dieses Signal vom kombinierten ab und filtert dadurch die leise gesendete Nachricht heraus.



Empfänger schicken, aber einer muss »leiser« sein als der andere. Wenn Ihr Gesprächspartner laut redet, während eine zweite Person flüstert, können Sie ihn trotzdem gut verstehen. Haben Sie eine Aufzeichnung gemacht, müssen Sie anschließend nur das Gehörte vom Gesamtgeräusch subtrahieren, um die leise Mitteilung herauszufiltern.

Bei einem Netzwerk aus zwei Sendern und einem Empfänger funktioniert diese Vorgehensweise sehr gut (siehe Kasten links unten). Doch mit zunehmender Anzahl der Beteiligten wachsen die Schwierigkeiten. Dann muss das System festlegen, wer wann in welcher Lautstärke überträgt. Das erfordert zusätzliche Kommunikation. Je mehr Aufwand aber für Koordinationsaufgaben zu treiben ist, desto weniger Bandbreite bleibt für die eigentliche Nachricht übrig. Über die Frage der besten Strategie unter den verschiedenen Bedingungen wird immer noch intensiv geforscht.

### Hilfe bei Katastrophen

In vielen Situationen haben Ad-hoc-Netze sicher große Vorteile. Dennoch fällt es schwer, ihre Leistungsfähigkeit exakt zu bestimmen. Selbst einfache Fragen lassen sich nicht ohne Weiteres beantworten. Wie hängt die Übertragungsgeschwindigkeit von der Anzahl der Netzteilnehmer und ihrer gegenseitigen Störung ab? Was geschieht, wenn sich alle Geräte bewegen? Welcher Zusammenhang besteht zwischen der Übertragungsgeschwindigkeit, Verzögerungen zur Vermeidung von Interferenzen und der Robustheit des Gesamtsystems?

Antworten darauf böten Netzwerkdesignern Anhaltspunkte zur Verbesserung ihrer Entwürfe und gäben Hinweise, welche Änderungen an bestehenden Netzen die größten positiven Effekte hätten. Außerdem könnten Entwickler leichter den optimalen Kompromiss zwischen konkurrierenden Anforderungen wie hoher Übertragungsgeschwindigkeit, geringer Interferenz und minimalem Datenverlustrisiko finden. Verzögerungen in der Übertragung stören Telefongespräche und Videokonferenzen erheblich: Ständiges Warten auf die Antwort oder mangelnde Synchronisation zwischen Bild und Ton macht die Kommunikation schwierig oder sogar unmöglich. Erst wenn die Entwickler die Struktur des jeweiligen Netzes bis ins Kleinste durchschauen, können sie bei der Programmierung von Anwendungen die richtigen Prioritäten setzen – zum Beispiel für eine geringe Verzögerung bei Telefongesprächen und für hohe Zuverlässigkeit bei der Übertragung wichtiger Dokumente sorgen.

Solche Informationen lassen sich bei Ad-hoc-Netzen schwer gewinnen, weil diese sich



ständig verändern. Um die Grenzen ihrer Leistungsfähigkeit zu bestimmen, reicht es nicht, einfach zu messen, wie gut die Übertragung momentan funktioniert – man muss ihre Qualität in allen möglichen Konfigurationen ermitteln.

Wir haben einen neuartigen Lösungsansatz für dieses Problem entwickelt. Dabei bilden wir drahtlose Ad-hoc-Netze auf etwas ab, was wir sehr viel besser verstehen: gewöhnliche Kabelnetze. Deren Informationsfluss lässt sich mit einem Arsenal an Methoden untersuchen, das Informatiker seit mehr als sechs Jahrzehnten stetig erweitert und verfeinert haben. In solchen Netzen gibt es keine Probleme mit Interferenzen, und ihre Knoten wandern auch nicht umher. Zur Untersuchung eines bestimmten Drahtlosnetzes erstellen wir deshalb zunächst ein Modell seines verdrahteten Gegenstücks, das einige seiner wichtigsten Eigenschaften erfasst. Die an dem Doppelgänger gewonnenen Ergebnisse ziehen wir dann zur Orientierung heran, um die Leistungsgrenzen des Originals zu ermitteln.

Das hilft uns, bessere Netze zu entwerfen, weil uns die Konsequenzen bestimmter Entscheidungen klarer werden. Außerdem erkennen wir so leichter, wo die Stärken und Schwächen unserer jeweiligen Entwürfe liegen. Trotzdem ist unserer Ansicht nach nicht zu erwarten, dass Ad-hoc-Netze irgendwann die bestehende Mobilfunk-Infrastruktur ablösen werden. In kritischen Situationen jedoch – etwa bei einer Naturkatastrophe, welche die Stromversorgung oder die Kabelverbindungen unterbricht – können sie ein entscheidendes Kommunikationsmittel sein. Dann kommt es darauf an, ihre Leistungsgrenzen voll auszureizen. ◀



**Michelle Effros** (links oben), **Andrea Goldsmith** (links unten) und **Muriel Médard** (rechts) verbindet eine langjährige Zusammenarbeit und persönliche Freundschaft. Effros lehrt Elektrotechnik am California Institute of Technology in Pasadena. Goldsmith unterrichtet das gleiche Fach an der Stanford University. Sie hat die Firma Quantenna Communications gegründet, die Technologien für Drahtlosnetze entwickelt. Médard ist Fakultätsmitglied an der Abteilung Elektrotechnik und Computerwissenschaft des Massachusetts Institute of Technology in Cambridge.

JUGEND FORSCHT 2010

## Sinn und Sinnlichkeit

Vom 13. bis 16. Mai fand in Essen der Bundeswettbewerb »Jugend forscht« statt. Die Teilnehmer präsentierten ein eindrucksvolles Spektrum an Ideen – von der Modellierung von Fischeschwärmen über Klimastudien an Flechten bis hin zum computergesteuerten Cocktailmixer.

ALLE FOTOS DES ARTIKELS: STEFANIE REINBERGER



Von Stefanie Reinberger

Bei »Jugend forscht« denkt mancher zunächst an Brillen tragende Streber, die mit den Interessen Gleichaltriger wenig anfangen können und sich stattdessen lieber im stillen Kämmerlein mit abstrakten Fragestellungen beschäftigen. Beim diesjährigen Bundeswettbewerb der Stiftung in Essen wurde man da aber schnell eines Besseren belehrt. Und zwar nicht nur in der »Chill-out-Ecke«, in der sich die Jungforscher beim Tischfußball oder mit Computerspielen entspannten. So erwiesen sich die Themen der Teilnehmer oft als höchst alltagsnah – und sprachen manchmal sogar ganz unmittelbar die Sinne an.

### Design-Desserts

Gleich nach Betreten der Essener Messehalle fand man sich etwa unversehens vor einem Stand wieder, an dem Mousse au Chocolat und zarte Schäume mit Orangengeschmack gereicht wurden. Nein, ich hatte mich nicht verlaufen. Vielmehr wagten sich Jonas Schmidt (18), Joana Wiebach (19) und Sascha Wustrow (18) von der Humboldt-Ober-



Neue Nachtschkeaktionen gab es bei Jonas Schmidt, Joana Wiebach und Sascha Wustrow zu kosten (oben). Flora Kahlhöfer, Mareike Dörr und Anna Rosmanitz stellten Energiesparlampen auf den Prüfstand (unten).



Die Teilnehmer des Bundeswettbewerbs »Jugend forscht« präsentierten ihre Projekte aus Wissenschaft und Technik in der Messehalle Essen.

schule in Berlin an das Thema »molekulare Küche« heran. Dieser kulinarische Trend kreierte auf der Basis physikalischer und chemischer Erkenntnisse neue Speisen mit veränderter Textur oder alternativen Zutaten. Die Schüler fragten sich, ob sich luftige Desserts wie die berühmte französische Schokoladencreme auch ohne Ei herstellen lassen. »Das würde vor allem Allergikern nutzen sowie Menschen, die Angst haben, sich mit Salmonellen zu infizieren«, begründet Jungforscherin Wiebach. So experimentierten die drei mit Methylzellulose, Xanthan und Wasser und stellten daraus eine schaumige Substanz her, die als würdiger Ersatz für Eischnee dient. Das Ergebnis – am Stand durfte man auch probieren – konnte sich sehen und vor allem schmecken lassen.

### Kaugummi auf den Zahn gefühlt

Wer nach solchen Schlemmereien gern zu Zahnpflegekaugummi greift, sah sich beim Besuch des Fachbereichs Biologie einiger Illusionen beraubt. Marianne Schulz, Thao Duong Tran und Lisa Ehrlich von der Goetheschule Ilmenau nahmen deren versprochene kariesprophylaktische Wirkung unter die Lupe. Die 18-jährigen Schülerinnen ließen Probanden unterschiedlich lange kauen und prüften danach die Zahl der Bakterien *Streptococcus mutans* und *Lactobacillus* in Speichelproben. Doch leider wirkten sich die Spezialkaugummi nicht signifi-

kant auf die Menge dieser Kariesverursacher aus. Allein der pH-Wert des Speichels verbesserte sich ein wenig: Zumindest zu Beginn des Kauens lag er etwas mehr im basischen Bereich, was einen gewissen Schutz vor Löchern im Zahnschmelz bietet. Dennoch lautete das Fazit der jungen Thüringerinnen: Kaugummikauen hat keinen Einfluss auf das Kariesrisiko. Wer hier richtig vorbeugen will, sollte besser zur Zahnbürste greifen.

### Strahlende Zukunft?

Bei Flora Kahlhöfer (18), Mareike Dörr (18) und Anna Rosmanitz (15) von der Main-Taunus-Schule in Hofheim kamen Energiesparlampen auf den Prüfstand. Die Schülerinnen wollten herausfinden, wie sinnvoll die neuen Leuchten wirklich sind – und kamen ebenfalls zu desillusionierenden Resultaten. Der Quecksilbergehalt der Lampen war dabei nicht der einzige Kritikpunkt. So erreichte die elektromagnetische Strahlung bei den Leuchten bis zum 50-Fachen des TCO-Richtwerts für Computerarbeitsplätze. »Wir fordern eine bessere Aufklärung der Käufer und dass die Entsorgung strenger reglementiert wird«, so Mareike Dörr selbstbewusst. Außerdem folgerten die Schülerinnen aus ihren ökonomischen und ökologischen Analysen, dass sich Energiesparlampen allenfalls als Übergangslösung eignen. Das Leuchtmittel der Zukunft sehen sie in Leuchtdioden (LEDs und OLEDs).

### Superflieger mit Punktlandung

So interessant und alltagsrelevant diese Ideen waren – die begehrten Preise erhielten andere. Im Bereich Technik etwa fuhr Simon Schuldt den Bundessieg ein: Der 18-jährige Schüler überzeugte die Jury mit seinem Modell eines sogenannten Delta-Nurflüglers. Flugzeuge dieser Art bestehen im Wesentlichen aus einer einzigen großen Tragfläche. Im Vergleich zu herkömmlichen Konstruktionen ist der Abtrieb reduziert, was zu einem geringeren Treibstoffverbrauch führt. Schuldt arbeitete daran, seinem Modell zu mehr Flugstabilität zu verhelfen, damit sich eines Tages dieser Typ auch in der zivilen Luftfahrt einsetzen lässt. Er optimierte seinen Nurflügler so weit, dass er unter anderem in der Lage war, eine senkrechte Punktlandung hinzulegen.

### Origineller Schiffsantrieb

Frank Radke und Felix Winkler vom Heinrich-Hertz-Gymnasium in Berlin beschäftigten sich mit einer Technologie aus den 1920er Jahren: dem Flettner-Rotor. Statt mit Segeln stattete der deutsche Erfinder Anton Flettner (1885–1961) Schiffe mit Rotoren aus, die ein wenig an überdimensionierte Litfassäulen erinnern. Dabei versetzen Motoren die Säulen in Drehung, wodurch sie im Wind einen regelrechten Tragflügel-Effekt entwickeln und das Schiff antreiben. Die beiden jungen Tüftler analysierten die

Luftwirbel am Zylinder, um den Antrieb effektiver zu gestalten. Inspiriert von der Gestalt des Erbmoleküls DNA verpassten sie ihrem Rotor außerdem eine helixartig verdrehte Form, die sich geschickt zusammenfalten lässt. Das erlaubt, die sperrigen Antriebssäulen einfach einzuklappen, wodurch die Schiffe auch in Hafenanlagen einlaufen können, in denen Ladekräne die erlaubte Höhe begrenzen. Für ihren optimierten Flettner-Rotor wurden die beiden 19-Jährigen mit einem Sonderpreis der Deutschen Physikalischen Gesellschaft ausgezeichnet.

### Virtuelle Schwärme I

Die Erstplatzierten im Fach Biologie beobachteten Fischschwärme – sowohl im Wasser als auch im Computermodell. Florian Schreier (20), Thomas Irion (18) und Lukas Dieterle (20) wollten wissen, wie sich die Tiere verhalten und woran sie sich orientieren. Fast nebenbei revolutionierten sie mit ihrer Arbeit die Verhaltensforschung unter Wasser: Während Wissenschaftler nach gängiger Lehrmeinung davon ausgehen, dass sich Fische am Abstand zum Nachbarn orientieren, fragten sich die drei Jungforscher aus Baden-Württemberg, ob nicht vielmehr das einzelne Tier eine bestimmte Fläche für sich beansprucht. Daher legten sie als Privatsphäre für jedes Individuum im Schwarm eine so genannte Voronoi-Zelle fest. Die Grenzen zwischen den einzelnen »Revieren« verlaufen dabei jeweils exakt in der Mitte zwischen den Individuen (siehe auch Spektrum der Wissenschaft 11/2007, S. 36). Und tatsächlich: Zumindest bei den untersuchten Sumatrabarben schien die Sache aufzugehen.

Das Konzept der Jungforscher erklärte das Verhalten der Tiere im Aquarium wie in der Simulation wesentlich besser als die etablierte Vorstellung.

### Virtuelle Schwärme II

Auch Informatiker fasziniert das Phänomen, dass in Fisch- und Vogelschwärmen die Tiere blitzschnell ihre Richtung ändern können, ohne aneinanderzustoßen. Diese Schwarmintelligenz spannte Andreas Lang aus Chemnitz für einen ganz anderen Zweck ein: Der 19-Jährige entwickelte ein Computerprogramm, mit dem sich Gesichter auf einem Videofilm erkennen und verfolgen lassen – selbst dann, wenn sie sich entfernen oder drehen. Lang definierte hierfür bestimmte Gesichtsregionen als virtuellen Schwarm. Von der Jury gab es dafür den ersten Preis im Fachgebiet Mathematik/Informatik.

### Aids im Modell

Mit einer anderen Computersimulation lässt sich die Ausbreitung der HIV-Epidemie im südlichen Afrika verfolgen und der zukünftige Verlauf vorhersagen. Die Brüder Christoph und Klaus-Peter Becker aus Mannheim haben damit ein Werkzeug geschaffen, mit dem beispielsweise Hilfsorganisationen ihre Präventionsmaßnahmen gezielter planen können. Dafür erhielten sie den dritten Platz in den Geo- und Raumwissenschaften – und nicht nur das: »Wir haben Kontakt zur Universität von Gaborone in Botswana aufgenommen und sehr positive Rückmeldung bekommen«, berichtet Klaus-Peter Becker stolz. »Vielleicht kommt unser Modell dort sogar wirklich zum Einsatz.«

### Lebensfreundlich? Fünf, setzen!

Peter Falke vom Humboldt-Gymnasium in Solingen hilft während seiner Freizeit gern in der ortsansässigen Sternwarte aus. »Immer wieder fragen Besucher danach, ob es Leben auf anderen Planeten außerhalb unseres Sonnensystems geben könnte«, erzählt der 18-Jährige. Daher stellte er einen Kriterienkatalog für die Lebensfreundlichkeit von Planeten auf, der etwa den Bahnverlauf und die Masse des Himmelskörpers enthält sowie die Masse des Sterns, um den er kreist. Auch die Häufigkeit von Metallen, die sich zumindest grob abschätzen lässt, fand Eingang in den Katalog. Nicht interessiert hat den Schüler dagegen das Wasservorkommen. »Das kann mit heutigen Methoden niemand messen«, erklärt er. »Ich wollte nur mit Kriterien arbeiten, die sich wirklich erfassen lassen.« Auf dieser Grundlage entwickelte der Schüler ein Bewertungssystem, mit dem sich Planeten in Kategorien einteilen lassen: von eins wie »lebensfreundlich« bis fünf für »kein Leben möglich«. Die Erde bekommt nach diesem System übrigens »nur« eine Zwei, und keiner der bislang bekannten Exoplaneten scheint sich demnach besonders für die Entstehung von Leben zu eignen. Die Besucher der Solinger Sternwarte dürften sich über die klare Antwort freuen – und die Jury von »Jugend forscht« vergab dafür Platz vier in der Sparte Geo- und Raumwissenschaften.

### Flechten als Klimaarchiv

Den Bundessieg in dieser Disziplin fuhr allerdings der 18-jährige Florian Schober vom Johannes-Gutenberg-Gymnasium



Aus Antarktiseis gewonnene Bohrkerne geben laut Stefanie Tuchtenhagen Aufschluss über den Klimawandel – anhand der Menge des darin enthaltenen Staubs (links). Lutz Brozios Farben-Töne-Übersetzer macht Blinden den Farbumschlag von pH-Indikatoren zugänglich (rechts).

Alexander Herms hat Laborhandschuhe entwickelt, die den Benutzer vor Verätzungen warnen (oben). Tim Meinhard und Axel Utech stellten ihren automatischen Cocktailmixer vor (unten).

in Waldkirchen ein. Er zeigte, wie sich Flechten als regelrechte Archive nutzen lassen, um die Klimaentwicklung in der Vergangenheit nachzuvollziehen. Wellenartige Strukturen in diesen Organismen – ähnlich wie Baumringe – erlauben Rückschlüsse auf den klimatischen Verlauf der letzten Jahrhunderte, denn Flechten können sehr alt werden. Florian Schober maß die Abstände zwischen den einzelnen Hoch- und Tiefpunkten der Wellen. Die daraus gebildete Sinuskurve gab Auskunft darüber, wie warm oder wie kalt ein bestimmtes Jahr war.

### **Staub im Eisbohrkern**

Ebenfalls ums Klima drehte sich die Arbeit der erst 15-jährigen Stefanie Tuchtenhagen. Die Schülerin der Johann-Gutenberg-Schule in Bremerhaven untersuchte den Klimawandel auf der antarktischen Halbinsel anhand eines Eisbohrkerns. »Dabei habe ich einen neuen Parameter entdeckt«, berichtet sie. »Je kälter es war, desto mehr Staub enthalten die Bohrkerne, weil die Tiefdruckgebiete diesen mitbringen.« Anerkennung bekam sie in Form des Preises der Wilhelm und Else-Heraeus-Stiftung. »Eigentlich hatte ich mich für ›Schüler experimentieren‹ angemeldet«, verrät die Jungforscherin, »aber dann wurde meine Arbeit hochgestuft, so dass ich jetzt hier in Essen bei ›Jugend forscht‹ antrete.«

### **Lautstarke pH-Messung**

Indikatoren, die per Farbreaktion den pH-Wert einer Substanz anzeigen, kennt jeder aus der Schule. Blinden nutzen sie allerdings recht wenig. Lutz Brozio (19) von der Fürst-Johann-Ludwig-Schule in Hadamar entwickelte daher mit einfachen und kostengünstigen Mitteln ein Gerät, das jede Farbe in einen Ton übersetzt und damit den Farbumschlag hörbar macht. Erste Tests an einer Blindenschule in Marburg waren so erfolgreich, dass das Gerät dort auch in Zukunft verwendet werden soll. Beim Bundeswettbewerb »Jugend forscht« gab es dafür den zweiten Platz im Bereich Arbeitswelt.



### **Handschuh mit Warnfunktion**

pH-Indikatoren nutzte auch Alexander Herms vom Bischöflichen Willigis-Gymnasium in Mainz für seinen intelligenten Laborhandschuh mit Säure-Base-Warnfunktion. »Die Idee kam mir, als ich mich im Unterricht verätzte, weil ich nicht bemerkte, dass ich Säure am Handschuh hatte«, erzählt der 19-Jährige. Seither experimentierte er mit verschiedenen Materialien, um Handschuhe mit Indikatorstoffen zu beschichten. Noch ist es ein weiter Weg bis zum marktreifen Produkt, doch der Handschuh mit dem pH-Indikator Phenolphthalein funktionierte immerhin schon recht gut. Das beeindruckte nicht nur Besucher, denen Herms die Farbreaktion auf der Schutzkleidung vorführte, sondern brachte ihm auch den Preis des Adolf-Martens-Fonds e. V. ein.

### **Computergesteuerter Cocktailmixer**

Zum gemütlichen Abschluss des Rundgangs oder auch für die kleine Erholung zwischendurch lohnte es sich, zum Stand von Tim Meinhard (20) und Axel Utech (19) zu schlendern. Die beiden Schweriner ersannen eine Maschine, die mittels Pumpe und Shaker bis zu acht verschiedene Zutaten zu leckeren Cocktails vermischt – und erhielten dafür den Sonderpreis des Präsidenten des Vereins Deutscher Ingenieure e. V. (VDI). Die Rezeptauswahl für die bunten Mixgetränke sowie die Steuerung erledigte ein Computer. Nur noch trinken musste man selbst. Na denn: Prost!

**Stefanie Reinberger** ist promovierte Biologin und freie Wissenschaftsjournalistin in Köln.

PHYSIK

## Experimentalphysik, opulent dargestellt

Ungewöhnliche Beispiele aus dem Alltag geben Klassikern wie dem Impuls- und dem Energieerhaltungssatz ein neues Gesicht.

**H**ochglanzseiten mit viel Text und wenig Formeln, unterbrochen von zahlreichen bunten Bildern, machen auf den ersten Blick klar: Dies ist zwar ein Lehrbuch der Experimentalphysik; aber es will anhand von Alltagsphänomenen das Interesse und Verständnis des Lesers für die Problematik wecken. Während viele vergleichbare Lehrbücher sich auf berühmte Beispiele wie die Wurfparabel, die schiefe Ebene oder den Satelliten beschränken, bringt das Werk des Braunschweiger Physikprofessors Rainer Müller neue und ungewöhnliche Fragestellungen oder Anwendungsgebiete für mechanische Probleme: Welche Maximaldistanz kann ein Mensch beim Weitsprung erreichen? Was passiert im menschlichen Körper beim Bungee-Sprung? Kann man in einer rotierenden Raumstation so wie auf der Erde spazieren gehen? Warum fällt ein

Fahrrad nicht um? In der Auswahl der Beispiele erkennt man das Bemühen des Autors, insbesondere junge Leser für Mechanik zu begeistern.

Anhand obiger und weiterer Alltagsphänomene leitet Müller Formeln zur Energie- und Impulserhaltung, zur Himmelsmechanik oder zu Stoß- und Drehbewegungen nahezu spielerisch aus Beobachtungen her. Ist eine Formel gefunden, so wird sie eingeraht und in Rechenbeispielen vorgeführt. Aufgelockert wird der Text durch die oben erwähnten Schaubilder und Hochglanzfotos, auf denen beispielsweise die Saturn-V-Rakete oder auch einmal ein Hochleistungssportler zu sehen sind.

Müllers Begeisterung für schwungvolle Bewegungen zeigt sich besonders im letzten Kapitel »Geführte Bewegungen und Zwangskräfte«, das im Wesentlichen den

**Beim Grand Jeté scheint die Balletttänzerin ein Stück weit waagrecht in der Luft zu fliegen. Sie kann zwar nach dem Absprung die parabelförmige Bahn ihres Schwerpunkts nicht verändern; dieser wandert jedoch durch Anheben der Beine und Arme im Verhältnis zum Rumpf aufwärts, mit dem Ergebnis, dass Kopf und Rumpf sich annähernd waagrecht bewegen.**



Achterbahnen gewidmet ist. Da schwärmt er davon, wie reizvoll es ist, auf einem parabelförmigen Streckenabschnitt für mehrere Sekunden die Schwerelosigkeit zu genießen oder kopfunter durch einen Looping zu rauschen – vorausgesetzt, die Einfahrt in denselben hat einem nicht schon die Knochen gebrochen. Das war eine durchaus ernst zu nehmende Gefahr bei den frühen Achterbahnen mit kreisförmigen Loopings. Die Lösung des Problems heißt Klothoide: Die Krümmung dieser Kurve – und damit die Kraft, die den Achterbahnfahrer in den Sitz drückt – steigt linear von null bis zu einem Maximalwert im Scheitel des Loopings an. Erst diese Kurve, deren Berechnung schon eine ganze Menge Analysis erfordert, macht dieses Fahrvergnügen überhaupt publikumstauglich.

Das Buch bietet die Mathematik so schonend dar, dass Schüler der Mittel- oder Oberstufe eines Gymnasiums es durchaus konsumieren können. Aber wie geht es einem allgemein an Mechanik interessierten Erwachsenen damit?

An dieser Stelle bin ich durch meine Schulerfahrung belastet, und zwar keineswegs durch einen dort erworbenen Hass auf Physik – ganz im Gegenteil. Aber dass die Erwachsenen uns so penetrant vermitteln wollten, das sei doch alles gar nicht so schlimm und durch Alltagsbeispiele wunderbar zu motivieren, und dabei viel zu viele Worte machten, ist mir gewaltig auf die Nerven gegangen. Auch Müller macht viele Worte, und man merkt ihm die gute Absicht an.

Im Studium habe ich als einziges derart elaboriertes Buch über Experimentalphysik Paul Tiplers »Physik« akzeptiert. Das ist zwar noch dicker, bringt aber, kürzer gefasst, auch im Teilgebiet Mechanik wesentlich mehr, vor allem die Fluid- und Hydrodynamik, die in Müllers »Klassischer Mechanik« gänzlich ausgespart wird.

Für weniger ungeduldige Leser aber, die Lust und Zeit für Mechanik im Alltag haben, ist dieses Buch eine reichhaltige und unterhaltsame Fundgrube.

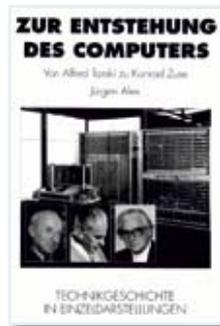
*Vera Spillner*

Die Rezensentin hat Physik studiert und promoviert zurzeit in Philosophie an der Universität Bonn.

Rainer Müller  
**Klassische Mechanik**  
 Vom Weitsprung zum Marsflug  
 Walter de Gruyter, Berlin 2009.  
 480 Seiten, € 59,95

## Konrad Zuses wissenschaftliches Werk

Jürgen Alex beschreibt im Detail, wie der Erfinder des Computers Tarskis »Mathematische Logik« in Hardware umgesetzt hat.



Wer kann sich heute noch vorstellen, dass ein Computer nicht elektronisch, nicht einmal elektromechanisch, also mit Relais, sondern tatsächlich rein mechanisch arbeiten kann, mit Speicher- und Schaltelementen aus Blech, in Heimarbeit zu Tausenden zurechtgesägt? Über das frühe Meisterwerk und seinen Erbauer Konrad Zuse (1910–1995), dessen 100. Geburtstag wir in diesem Sommer feiern, ist viel geschrieben worden (zum Beispiel in Spektrum der Wissenschaft 5/1997, S. 54); gleichwohl geben seine Leistungen immer wieder aufs Neue Anlass zum Staunen.

In Anbetracht seiner persönlichen Lebensumstände und des technischen Entwicklungsstands seiner Zeit ist es geradezu unfassbar, wie er nicht nur die ersten tatsächlich zuverlässig und stabil arbeitenden Rechenmaschinen selbst baute, sondern darüber hinaus grundlegende Überlegungen zur Rechnerarchitektur, der Struktur und Arbeitsweise von Rechenalgorithmen, Programmen und Programmiersprachen sowie zu parallelen Berechnungen anstellte – ohne Vorkenntnisse, mit nur geringer Unterstützung und auf sich allein gestellt, ohne Einbindung in die uns heute selbstverständlich erscheinende Kommunikationsgemeinschaft.

Jürgen Alex, der das Leben des Erfinders in dieser Zeitschrift (1/1997, S. 78) beschrieben hat, vermittelt darüber hinaus, was Zuse unter günstigeren Bedingungen noch hätte vollbringen können; wie weit er seiner Zeit voraus war und wie widrig die Umstände, unter denen er arbeitete. Nicht ausgespart bleibt, was an Zuses Charakter und Arbeitsweise dazu beitrug, dass seine Leistungen lange Zeit unbeachtet und weitgehend ohne direkte Folgen blieben.

Aber Leben und Werk des Meisters sind gar nicht das Hauptthema des Buchs. Alex unternimmt vielmehr »einen ersten Versuch, Zuses wissenschaftliches Lebenswerk der *communitas scientiae* in einer Gesamtdarstellung vorzulegen«. Das umfasst Exkurse in Wissenschaftstheorie und -geschichte, mathematische Logik, Historismus, aber auch technische und theoretische In-

formatik sowie Physik, mit umfangreichen oder knappen Fußnoten sowie zahlreichen Quellenangaben. Alex benötigt sie, um fünf im Text formulierte Thesen zu stützen:

► Zuses Lebenswerk umfasst drei unterscheidbare Computerkonzepte, deren erstes mit der Entscheidung für das – heute als selbstverständlich angesehene – Rechnen im Dualsystem begann.

► Die Konzepte spiegeln in ihrer Abfolge Zuses Kenntnisstand elementarer Sätze der mathematischen Logik wider, wie er sie in Alfred Tarskis »Einführung in die mathematische Logik« kennen lernte.

► Weitergehende Kenntnisse formaler Logik hatte und benötigte Zuse nicht.

► »Künstliche Gehirne« (Zuses Terminologie) werden axiomatische Theorien selbstständig formulieren, dazugehörige Modelle definieren und solche Theorien bei der Lösung aller Aufgabenstellungen, die mit denkmöglichen Kombinationen logischer Schlüsse lösbar sind, interpretieren.

► Zentrale Thesen, die Stephen Wolfram in »A New Kind of Science« formuliert, sprechen dafür, dass Wolfram Zuses wissenschaftliches Lebenswerk fortführen könnte.

Jürgen Alex stellt in den ersten Kapiteln Geschichtliches sowie Grundlagen der Informatik und der mathematischen Logik bereit. Hier findet der ambitionierte Leser ohne entsprechende Vorkenntnisse alles Nötige, um die im Untertitel und den Thesen 2, 3 und 4 angesprochenen Zusammenhänge zwischen Zuses Überlegungen und den entsprechenden Teilen dieser mathematischen Theorie systematisch verfolgen zu können.

Sein erstes Konzept, den »algebraischen Rechner«, realisierte Zuse in den Rechnermodellen Z1 (1936) bis Z4 (Ende 1944). In heutiger Terminologie handelt es sich um Computerhardware mit allen wesentlichen Komponenten: Rechner, die Dualzahlen in Gleitkommadarstellung verarbeiten, mit Ein- und Ausgabe, Speicher sowie Rechen- und Steuereinheit, die das Programm (den »Rechenplan«) enthält. Dazu hatte Zuse in seiner »Bedienungskombinatorik« die moderne Schaltalgebra umgesetzt.

Das zweite Konzept vollendete Zuse 1945 mit der Ausarbeitung des »Plankalküls«, der nicht weniger als eine hoch entwickelte Programmiersprache mit strukturierten Objekten darstellt. Auch wenn er nicht zum praktischen Einsatz kam und erst 30 Jahre später veröffentlicht wurde, kann der Plankalkül als erstes Muster für eine auch heutigen Ansprüchen genügende Software angesehen werden; seine Funktionstüchtigkeit wurde durch die erfolgreiche Implementierung im Jahr 2000 an der Freien Universität Berlin bewiesen.

Zum dritten Konzept, der »logistischen Rechenmaschine«, wurde Zuse durch die Schwierigkeiten der Wettervorhersage angeregt. Entworfen in den Jahren 1956 bis 1958, enthält die »Feldrechenmaschine« tragfähige Grundlagen dafür, was man heute massiv parallel arbeitende Rechnersysteme auf der Basis zellulärer Automaten nennen würde, und formulierte zugleich explizite Forderungen an »künstliche Gehirne«, die logische Operationen ausführen,

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

Probleme selbst formulieren und lösen können, ja sogar lernfähig sind. In seiner Vision dessen, was heute künstliche Intelligenz genannt wird, erkannte Zuse sogar die Gefahr, dass derart leistungsfähige Maschinen außer Kontrolle geraten könnten.

These 4 präzisiert Zuses Vorstellungen in moderner Formulierung und hat rein spekulativen Charakter. Alex diskutiert ihre Berechtigung im Rahmen einer historischen Untersuchung und sagt: »Wird aber das erste Rechnersystem nach diesen Kriterien realisiert, erweisen sich die Thesen als bestätigt.« Gegenwärtig sieht es nicht gut aus für eine solche Bestätigung. Programme, die auch nur ein vorgegebenes Axiomensystem systematisch auszuarbeiten versuchen, führen ein Nischendasein (Spektrum der Wissenschaft 8/1997, S. 32).

These 5 geht auch nach den Worten des Autors über das Thema des Buchs hinaus und sollte eher als Anregung für weitergehende Untersuchungen angesehen werden. Wolframs Überlegungen werden knapp so dargestellt, dass ihr Bezug zu Zuses Vorstellung vom »Rechnenden Raum« erkennbar ist. Dessen Überzeugung, »den Kosmos als gigantische Rechenmaschine aufzufassen«,

gewinnt vielleicht durch aktuelle Untersuchungen der Physik, etwa Modelle der Quantengravitation oder Spin-Netzwerke, neue unterstützende Aspekte.

Anregend, sogar spannend und gut lesbar sind vor allem die historischen Teile mit den Schilderungen von Zuses Ideen in ihrer Entstehung, seiner Rechner und deren Herstellung und Rettung unter den Bedingungen des Kriegsendes sowie ihre Einordnung in die Technikgeschichte. Die Lektüre des wissenschaftlichen Teils gestaltet sich jedoch äußerst mühsam. Hätte der Autor doch wenigstens die Fußnoten in reine Quellenangaben und inhaltliche Erläuterungen aufgeteilt und etwas genauer nach den Druckfehlern gesehen!

Die völlig andere Auseinandersetzung mit dem Thema durch den Romanautor F. C.

Delius («Die Frau, für die ich den Computer erfand») mag ja durchaus sachlich falsch und für den Kundigen unergiebig sein (Spektrum der Wissenschaft 6/2010, S. 101). Ich empfand sie nach dieser harten wissenschaftlichen Kost als erholend.

Andreas Nestke

Der Rezensent ist promovierter Mathematiker und lehrt Mathematik an Hochschulen in Berlin.

Jürgen Alex

#### Zur Entstehung des Computers – Von Alfred Tarski zu Konrad Zuse

Zum Einfluß elementarer Sätze der mathematischen Logik bei Alfred Tarski auf die Entstehung der drei Computerkonzepte des Konrad Zuse

VDI-Verlag, Düsseldorf 2008.  
394 Seiten, € 98,-



### WISSENSCHAFTSGESCHICHTE II

## Die Motive der Welträtsellöser

Ehrfurcht vor der lebendigen Natur und Angst um die eigenen Wissensbestände förderten vor 90 Jahren eine seltsame Bewegung gegen die Relativitätstheorie und ihren Urheber.

Die meisten erkennt man bereits an den Umschlägen: voluminöse DIN-A4-Sendungen, handschriftlich adressiert, die Briefmarken penibel an den Kuvertkanten ausgerichtet. »An die Spektrum-Redaktion« oder »Dem Chefredakteur persönlich« steht außen. Innen erklärt der Absender, wie sich das Problem des freien Willens dank Quantenmechanik und Entropiesatz in Wohlgefallen auflöse – oder warum die Relativitätstheorie doch nicht stimme. Nur wage es niemand, diese Wahrheit auszusprechen. Niemand außer dem Autor, versteht sich.

Milena Wazeczek hat derlei Experten in ihrer wissenschaftshistorischen Dissertation einen Namen gegeben: Welträtsellöser. Die Politikwissenschaftlerin sichtete den 2004 erschlossenen Nachlass des Physikers Ernst Gehrcke (1878–1960). Der spätere Direktor der optischen Abteilung der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt hatte sich in den 1920er Jahren durch kritische Veröffentlichungen zur Relativitätstheorie und ihrer populären Rezeption hervorgetan und war dadurch zu einem Vertrauensmann etlicher Einstein-Kritiker avanciert. Sie schickten ihm Briefe, Pamphlete, Zeitungsaus-

schnitte. Schnell wuchs Gehrckes Sammlung auf 5000 Dokumente an; rund 2700 davon sind erhalten geblieben. Eine einzigartige Sammlung, die Auskunft gibt über die Motive sowie die sozialen und institutionellen Hintergründe einer Front gegen den Schöpfer der Relativitätstheorie, die sich in der frühen Weimarer Republik formierte.

Wazeczek definiert Welträtsellöser als Forscher außerhalb der akademischen Wissenschaft, die jedoch nach eigenem Verständnis auf Augenhöhe mit den Ordinarien diskutieren können – meist auf der Grundlage eigener »Studien«. Die Analyse des Gehrcke-Archivs zeigt: Vor allem Ingenieure, Ärzte und Juristen zählten zu Einsteins frühen Opponenten; von verschiedenen Seiten und mit teils widerstreitenden Argumenten nahmen sie seine Relativitätstheorie in die Zange. Was die »freien Naturforscher« einte, war das Bemühen, die eigenen Wissensbestände gegen die als bedrohlich empfundene moderne Physik zu verteidigen. Die meisten Welträtsellöser vertraten dabei ein ganzheitliches, von Ehrfurcht vor der lebendigen Natur gekennzeichnetes Weltbild, einige mit einem deutlichen Hang zur Esoterik.

Die Autorin beschreibt in klugen Ausführungen den ideologiegeschichtlichen Kontext dieses Milieus – und verfolgt ihn dann doch nicht bis zu seinem geistigen Paten zurück: Johann Wolfgang von Goethe. Dem Nachhall von Goethes Naturanschauung in der deutschen Geistesgeschichte, die sich in Werken wie der »Metamorphose der Pflanze« und der »Farbenlehre« manifestiert, verdanken wir bis heute holistische Konzepte der Naturerklärung, die in den experimentellen und mathematischen Methoden der modernen Naturwissenschaft zersetzende, lebensfeindliche Kräfte am Werk sehen. Beredtes Zeugnis davon geben etwa die Texte der beiden Schriftsteller (und Ärzte!) Gottfried Benn und Alfred Döblin, Zeitgenossen von Einstein.

Viele Einstein-Gegner hatten die neue Theorie, gegen die sie anschrieben, nicht einmal ansatzweise verstanden. Mit den Jahren verliehen sie ihren Tiraden denn auch eine neue Stoßrichtung, echaufferten sich darüber, von dem mittlerweile prominenten Einstein und seinem Umfeld ignoriert, ja aktiv ausgegrenzt zu werden. Dies belegt Wazeczek mit einer Fülle von Quellen weit über den Gehrcke-Nachlass hinaus. Es gelingt ihr, die Konflikte, die auch einzelne Fachkollegen mit Einstein in Briefwechseln oder öffentlich austrugen, lebendig werden zu lassen.

Allerdings blendet die Autorin die allgemeine politische und gesellschaftliche Entwicklung der Jahre, über die sie schreibt, komplett aus. Und das ist für die Zeit nach 1919, als Einstein durch die Sonnenfinsternis-Beobachtungen der Royal Society auf einen Schlag weltberühmt wurde, ein schweres Manko. Viele Zeitgenossen stießen sich nicht nur an der Relativitätstheorie, sondern auch daran, dass ihr Schöpfer Jude war und obendrein politisch links stand. So kulminierten immer mehr Attacken jener Jahre in dem Vorwurf, Einstein werde von linken und liberalen Medien hofiert und betreibe unlautere »Reklame« für eine die Gesellschaft gefährdende relativistische Weltanschauung. Hier stellten Einsteins Kritiker implizit – einzelne auch explizit – Querbezügen zu Texten wie den berühmten »Protokollen der Weisen von Zion« her, jener gefälschten antijüdischen Propagandaschrift, die kurz nach dem Ersten Weltkrieg in mehreren Varianten hohe Auflagen erzielte und auch von Zeitungen abgedruckt wurde. Vor diesem Hintergrund wurde der Physiker sogar als Protagonist einer »jüdisch-bolschewistischen Weltverschwörung« an den Pranger gestellt.

Die Physik geriet damit zu einem wichtigen Schauplatz der allgemeinen ideologischen Grabenkämpfe in der politisch instabilen ersten deutschen Republik. Einstein selbst arrivierte in den 1920er Jahren zu einem Lieblingsfeind von Ultrakonservativen, Völkischen und Nationalsozialisten.

Auch wenn von der »öffentlichen Kontroverse um die Relativitätstheorie in den 1920er Jahren« (Untertitel) damit ein entscheidender Teil fehlt: Die umsichtige Analyse der von »Welträtsellösern« und einzelnen Fachkollegen gegen Einstein geführten Kampagnen rundet unser Bild von den Hin-

tergründen der Anti-Einstein-Debatten jener Zeit ab.

Carsten Könneker

Der Rezensent ist Diplomphysiker und promovierter Literaturwissenschaftler sowie Chefredakteur von »Gehirn & Geist«.

Milena Wazeck

#### Einsteins Gegner

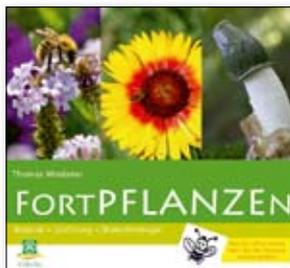
Die öffentliche Kontroverse um die Relativitätstheorie in den 1920er Jahren

Campus, Frankfurt am Main 2009.  
429 Seiten, € 29,90

## BOTANIK

# Der Nutzeffekt des Pflanzensex

Das Geschlechtsleben der Pflanzen und Pilze bietet viele Überraschungen – und Ansatzpunkte für die Landwirtschaft.



Thomas Miedaner, außerplanmäßiger Professor an der Landessaatzuchtanstalt der Universität Hohenheim, erklärt uns unterhaltsam und leicht verständlich zweierlei: im ersten Teil »Alles Natur«, wie die (nicht nur sexuelle) Fortpflanzung bei Pflanzen und Pilzen funktioniert, und im zweiten Teil »Manipulierte Geschlechter«, wie sich der Mensch diese Reproduktionsmechanismen zu landwirtschaftlichen Zwecken zu Nutze macht. Das Buch lässt sich ohne große biologische Vorkenntnisse lesen, allerdings hilft zu einem besseren Verständnis ein kurzer Blick ins alte Biologielehrbuch zum Thema Mitose und Meiose.

Warum nehmen Lebewesen überhaupt die energetisch sehr aufwändige sexuelle Fortpflanzung auf sich, wo doch die vegetative Vermehrung durch einfaches Klonen schneller und effizienter wäre? Nachdem uns der Autor auf diese alte Frage die übliche Antwort gegeben hat – Stichwort: Die Vermischung der väterlichen und der mütterlichen Gene stellt viel mehr Vielfalt und damit Überlebenschancen bereit als die

Mutation allein –, gibt er einen Überblick über die Mechanismen der sexuellen und vegetativen Vermehrung bei Blütenpflanzen. Faszinierend ist es, zu lesen, wie die Blüte der Bienen-Ragwurz ihre Bestäuber mit der Nachbildung des Genitalbereichs einer weiblichen Biene anlockt (Bild) und wie die Monarchfalter ein Gift, das Pflanzen

ursprünglich zum Selbstschutz produzierten, zum Sexuallockstoff umfunktioniert haben.

Pilze verfügen zuweilen über Dutzende von Geschlechtern und eine entsprechende Vielfalt an Reproduktionsmechanismen. Der hefeähnliche *Cryptococcus neoformans* bildet sogar Nachkommen mit Angehörigen des eigenen Geschlechts und schaffte es mit dieser Eigenschaft als »schwuler Killer-Pilz« bis in die »Bild«-Zeitung. *Septoria tritici*, der Auslöser der Blattdürre, greift zwar, wie Pilze generell, nur in der Not zur sexuellen Vermehrungsweise, das aber so wirksam, dass er binnen kürzester Zeit gegen die neuesten Fungizide resistent wird. Gewisse parasitische Pilze locken andere Pilze an, indem sie sich ihnen als Geschlechtspartner andienen. Und die Wildsau ist nur deshalb wild auf Trüffeln, weil diese den Geruch wilder Eber verströmen.

Bei vielen Kulturpflanzen wie Weizen, Roggen, Kartoffel, Rebe und Banane nutzt der Mensch deren Fortpflanzungsmechanismen für seine Zwecke, immer auf der Suche nach resistenteren, toleranteren und ertragreicheren Sorten. Männlicher Spargel wächst besser als weiblicher, hybride Mais-sorten besser als die Ausgangssorten; nur unbefruchteter weiblicher Hopfen bringt den richtigen Biergeschmack. In mühseliger Kleinstarbeit müssen Hunderte und Tausende von Getreideblüten sterilisiert werden, um gezielte Kreuzungen durchzuführen; und die so effiziente rein vegetative Ver-



**Die Blütenlippe der Bienen-Ragwurz ahmt den Genitalbereich einer weiblichen Biene mitsamt Haaren nach. Das Bienenmännchen »braucht den Berührungskontakt mit einem weichen, nachgiebigen Körper, um zum Orgasmus zu kommen«.**

mehrung von Kartoffeln durch Knollen und von Weinreben durch Stecklinge hat in Europa mehrfach zu Katastrophen geführt, weil die genetisch einheitlichen Bestände nahezu komplett einem neuen Schädling zum Opfer fielen. Wussten Sie, dass in den 1960er Jahren die damals übliche Bananensorte Gros Michel durch einen Schadpilz fast komplett ausgerottet worden ist? Und dass es möglicherweise in 20 Jahren die Banane mit dem Geschmack, wie wir ihn heute kennen, nicht mehr geben wird?

Im letzten Kapitel geht es um die Problematik der Verbreitung gentechnisch veränderter Pollen, insbesondere die Kontamination konventioneller und natürlicher Pflanzenbestände durch gentechnisch veränderte Organismen. Das ist ein großes Thema vor allem für die Bio-Landwirtschaft. Während Miedaner die Diskussion hier zu Lande als Problem »diffuser Zukunftsängste einer zu wenig aufgeklärten Bevölkerung« sieht, gesteht er immerhin zu, dass die Einkreuzung mit einheimischen Arten durch Pollenflug andernorts (zum Beispiel bei Bt-Mais in Mexiko) ein echtes Problem dar-

stellen kann. Dies ist das einzige unbefriedigende Kapitel: Diese viel zu kurze Abhandlung, die sich auch noch auf den Teilaspekt Pollenflug beschränkt, kann der Komplexität der Problematik nicht gerecht werden.

Das Buch wendet sich nicht ans Fachpublikum, sondern an den interessierten Laien; es ist in lockerer, leicht lesbarer Sprache verfasst und gut bebildert. Ob die von Miedaner selbst gezeichneten Cartoons so witzig sind, darüber lässt sich streiten. Auf die Dauer wirken die zahlreichen, zum Teil leicht schlüpfrigen Anspielungen auf die menschliche Sexualität etwas bemüht. Blumen empfinden nun mal keine »Lust«, sind nicht »befriedigt« und »treiben« es auch nicht miteinander, jedenfalls nicht nach dem aktuellen Stand der botanischen Forschung. Hier war wohl *sex sells* der Vater des (Verkaufs)Gedankens.

Dadurch, dass alle Sachverhalte und Konzepte anhand konkreter Beispiele erklärt werden, wird die Materie leichter zugänglich, obgleich man jederzeit die Komplexität dahinter spürt. Das Buch bleibt

zwar notgedrungen an der Oberfläche, ist aber nicht oberflächlich.

Das Literaturverzeichnis hinterlässt einen zwiespältigen Eindruck: Einerseits finden sich allgemein verständliche Quellen, andererseits sehr spezielle Fachliteratur, welche für Laien nicht geeignet ist. Ein kommentiertes Literaturverzeichnis zu den einzelnen Kapiteln wäre sinnvoller gewesen.

»FortPFLANZEN« ist allen zu empfehlen, die wissen wollen, mit welchen Techniken und Tricks unsere Kulturpflanzen, die einen großen Teil unserer Nahrung ausmachen, zu dem geworden sind, was sie heute sind.

Frank Thommen

Der Rezensent ist Diplombiologe und arbeitet als IT Support Engineer beim Europäischen Laboratorium für Molekularbiologie (EMBL) in Heidelberg.

Thomas Miedaner

**FortPFLANZEN**

Botanik + Züchtung + Biotechnologie

DLG-Verlag, Frankfurt am Main 2009.  
180 Seiten, € 24,90



MATHEMATIK

## Liegestütze fürs Gehirn

Dieses Buch verschafft einem nicht gleich »ein besseres Leben« – aber immerhin eine gute Einführung in klassische Problemlösungsmethoden.

Kann man durch fleißiges Denken Gehirnkapazität aufbauen, so wie man durch fleißiges Hantelnstemmen Muskelmasse aufbaut? Im Prinzip schon; nur kommt es im geistigen Bereich viel mehr noch als im körperlichen auf die richtige Methode an. Christian Hesse, Professor für Mathematik in Stuttgart, gibt uns 22 Methoden (»Heuristiken«) an, mit denen wir Probleme oft leichter lösen können.

Aber ist nicht gerade bei Denksportaufgaben das Entscheidende die kreative Idee? Auch Hesse gibt zu, dass man ohne diese nichts erzwingen kann. Immerhin liefert er erlernbare Methoden oder Anleitungen, die Ideen erzeugen können; die helfen einem beim Vorgehen, wenn man zunächst nicht weiterweiß. Freilich, den rechten Blick zu bekommen, wann man welche Methode einsetzt, ist auch eine Sache der Übung. Daher führt Hesse zu jeder Methode eine Reihe

von Beispielen an und garniert das Ganze, damit es nicht zu trocken gerät, mit allerlei Interessantem und auch Lustigem.

Zuerst wird dem Leser das Analogieprinzip vorgestellt: »Kann man das Problem auf ein ähnliches zurückführen, für das die Lösung bereits bekannt ist?« Nehmen wir ein Tennisturnier, bei dem  $n$  Spieler nach dem K.-o.-System gegeneinander antreten. Wie viele Spiele müssen ausgetragen werden? Meistens wird die Veranstaltung schon so angelegt, dass diese Anzahl eine Zweierpotenz ist und jede Runde die Zahl der Teilnehmer halbiert. Aber diese Spezialisierung ist unnötig und verstellt den Blick fürs Wesentliche. Der einfache Gedankengang ist: Der Verlierer eines Spiels scheidet aus dem Turnier aus. Jedes Spiel hat genau einen Verlierer, und am Ende soll genau ein Nichtverlierer übrig bleiben. Also ist die Anzahl der Spiele gleich  $n-1$ .

Genau so geht die Lösung des Schokoladenproblems: Eine Schokoladentafel aus  $n$  mal  $m$  Stücken hat lange waagerechte und kurze senkrechte Fugen. Sie soll in lauter Einzelstücke zerlegt werden. Ein »Spielzug« besteht darin, ein Tafelfragment entlang einer ganzen Fuge entzweizubrechen. Benötigt man weniger Spielzüge, wenn man erst die langen und dann die kurzen Fugen bricht, oder umgekehrt? Die Antwort: Es kommt überhaupt nicht darauf an. Jeder Spielzug erhöht die Anzahl der Fragmente um 1, am Ende müssen es  $n \cdot m$  Stücke sein, also braucht man  $n \cdot m - 1$  Spielzüge.

Einige weitere Methoden sind sehr gut verständlich und auch eingängig. Etwa das Paritätsprinzip: »Bietet das Problem die Möglichkeit zur Einteilung von Teilaspekten in zwei einander nicht überlappende Klassen, so dass daraus Aufschlüsse über die Lösung gewonnen werden können?« Oder das Dirichlet-Prinzip (»Schubfachprinzip«): »Wenn  $n+1$  Objekte ganz beliebig auf  $n$  Fächer verteilt werden, dann gibt es mindestens 1 Fach mit mindestens 2 Objekten.« Letzteres mutet fast schon trivial an, doch es wird sich als sehr nützlich erweisen.

Hier zwei Probleme: Ihr Spielpartner nimmt aus seinem Geldbeutel eine beliebige Anzahl von Geldstücken und legt sie

auf den Tisch. Nachdem Sie die Münzen nach Kopf und Zahl begutachtet haben, drehen Sie sich um. Dann dreht Ihr Freund beliebig oft eine Münze um, wobei er jedes Mal »drehen« sagt. Bevor Sie sich wieder umdrehen, deckt Ihr Freund eine Münze zu. Ihre Aufgabe ist es schließlich, zu sagen, ob die verdeckte Münze Kopf oder Zahl zeigt.

Zum anderen Problem: Zeigen Sie »Unter sechs beliebigen Personen gibt es stets drei, die alle miteinander befreundet sind, oder drei, bei denen dies durchgängig nicht der Fall ist«. Welche Denkmethode wenden Sie an?

Zuerst zum zweiten Problem (Spektrum der Wissenschaft 9/1990, S. 112). Man zeichnet ein Sechseck, dessen Ecken  $A, B, C, D, E$  und  $F$  die sechs Personen wiedergeben. Dann kann das Verhältnis zweier Personen mit einer roten Verbindungslinie für »befreundet« und einer blauen für »nicht befreundet« zwischen den entsprechenden Ecken dargestellt werden. Die Behauptung ist dann, dass es in jedem solchen Beziehungssechseck ein Dreieck gibt, dessen Seiten entweder alle blau oder alle rot sind. Das sieht man so ein: Sei  $P$  eine der sechs Personen, also eine Ecke aus der Menge  $\{A, B, C, D, E, F\}$ . Von den von  $P$  ausgehenden sechs Linien müssen nach dem Schubfachprinzip mindestens drei die gleiche Farbe haben, also zum Beispiel rot sein. Die drei gleichfarbigen Linien führen zu drei weiteren Punkten, sagen wir  $Q, R$  und  $S$ . Ist dann eine der Kanten  $QR, RS, QS$  rot, dann haben wir schon unser rotes Dreieck. Ansonsten bilden aber  $QR, RS$  und  $QS$  ein blaues Dreieck. Das war's! Und was sagt Bayern-Manager zum Dirichlet-Prinzip: »Wenn Franck so spielt wie gegen Saloniki, wird er immer von zwei, drei Leuten gedeckt. Von einem ist er nicht zu halten, oder nur mit Fouls. Das bietet doch Chancen für andere. Gehen zwei auf Franck, muss nach Adam Riese irgendwo einer frei stehen.«

Und beim ersten Beispiel? Nutzen Sie das Paritätsprinzip. Zählen Sie die Anzahl der Kopf zeigenden Münzen und merken Sie sich, ob diese gerade oder ungerade ist, bevor Sie sich umdrehen. Die Parität bleibt schließlich erhalten, wenn Ihr Freund eine gerade Anzahl von Münzen dreht ...

Damit Sie keinen falschen Eindruck bekommen: Die Lektüre fordert tatsächlich an einigen Stellen eine größere Aufmerksamkeit. So spricht Hesse Grundzüge der Mengenlehre und Logik an; diese helfen oft, sorgfältiger zu argumentieren. Aber auf jede Durststrecke folgt Entspannung. Zum Beispiel erfährt man nicht nur, wie Ein-

steins Ideen mit dem Invarianzprinzip zusammenhängen, sondern auch einiges über sein Leben. Man erhält nicht nur ansatzweise Einblicke in die Lösung eines der bekanntesten mathematischen Probleme, des großen fermatschen Satzes, sondern erfährt auch die hoch spannende Geschichte dieses legendären Satzes. Im letzten Kapitel zur Brute-Force-Methode erzählt uns der Autor, wie der geniale Mathematiker Alan Turing eine Chiffriermaschine entschlüsselt und somit maßgeblich in das Geschichtsgeschehen eingegriffen hat.

Kann man nach der Lektüre wirklich ein neues und »besseres Leben« führen, wie der Untertitel verspricht? Das hat Hesse vermutlich selbst nicht ganz ernst gemeint. Natürlich kann man sich nicht plötzlich, ohne eine gewisse Routine, ohne weitere Aufgaben und weiteres Training zu einem durch und durch souveränen Problemlöser entwickeln. Für einen soliden und fundierten Einstieg ins mathematische Denken bietet dieses Buch aber sicherlich eine überaus gute Grundlage.

Insgesamt legt Hesse ein gut strukturiertes Buch vor, schreckt nicht davor zu-

rück, auch echte Mathematik einfließen zu lassen – und ist meilenweit entfernt von den drögen Büchern, die populärwissenschaftlich sein wollen und doch nur verstaubte Inhalte halbmathematisch behandeln. Wer zu viel Angst vor der Mathematik hat, sei beruhigt: Trotz seiner steilen Karriere über Harvard und Berkeley hat Hesse die Fähigkeit, vieles auch einfach zu erklären, nicht verloren.

Was man aber in jedem Fall benötigt, ist manchmal eine gewisse Ausdauer. Genau wie beim normalen Sport – geschenkt wird einem nichts.

Roland Pilous

Der Rezensent studiert Mathematik und Philosophie an der Freien Universität Berlin. Dort beschäftigt er sich vornehmlich mit den Grundlagen der topologischen Räume.

Christian Hesse

**Das kleine Einmaleins des klaren Denkens**

22 Denkwerkzeuge für ein besseres Leben

C.H.Beck, München 2009.

352 Seiten, € 14,95

ANZEIGE

**Sprachen lernen? Betrachten Sie es als ein Kinderspiel.**

Rosetta Stone ist eine einzigartige Sprachlern-Software, welche das Lernen von Sprachen so einfach macht wie nie zuvor. Unsere Methoden imitieren den Lernprozess, dem Sie sich schon als Kind zum Erlernen Ihrer Muttersprache bedient haben.

In 31 Sprachen erhältlich

6 MONATE GELD-ZURÜCK GARANTIE

**10% Rabatt + Gratis Lieferung**

Informieren Sie sich jetzt unter **0800 200 11 887**  
[RosettaStone.de/sdw07](http://RosettaStone.de/sdw07)

Geben Sie 'sdw07' beim Bestellvorgang an

**RosettaStone**

©2010 Rosetta Stone Ltd. Alle Rechte vorbehalten. Schutzrechte angemeldet. Das Angebot kann nicht mit anderen Angeboten kombiniert werden. Sechs-Monate-Geld-zurück-Garantie gilt nur wenn Produkte direkt bei Rosetta Stone erworben worden sind. Voraussetzung für die Erstattung des Kaufpreises ist, daß alle Bestandteile bei der Rücksendung intakt sind (Anwendungs-CD, Sprach-CD, Bedienungsanleitung, und Lehrplan mit Ausnahme von Paschtu). Der Versand innerhalb von Deutschland ist kostenlos. Die Kosten für Rücksendungen werden nicht übernommen. \*Gegenüber dem Einzelkauf von Stufe 1, Stufe 2 und Stufe 3.

Mehr, als das Magazin zu bieten hat: Auf [www.spektrum.de](http://www.spektrum.de) finden Sie Artikel, Sonderhefte und das gesamte Archiv. Und sind nur einen Klick von den Angeboten entfernt, die wir Ihnen hier auf dieser Seite vorstellen.

## FÜR ABONNENTEN

*Ihr monatlicher Plus-Artikel zum Download*

### »Ohne Fleiß zum Preis«

Entscheiden wir umso besser, je mehr Informationen wir berücksichtigen? Nein, sagt der Psychologe Thorsten Pachur von der Universität Basel. In vielen Situationen bringen einfache Faustregeln sogar mehr als aufwändige Analysen. Erfolgreiche Pokerspieler und Börsenmanager wissen das längst

DIESEN ARTIKEL IST FÜR ABONNENTEN FREI ZUGÄNGLICH UNTER

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

## FREIGESCHALTET

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

### »Tropenstürme auf Titan«

Zum ersten Mal gelangen von der Erde aus Aufnahmen eines gewaltigen Sturms auf Saturns größtem Mond. Offenbar entstand er in der trockenen und ultrakalten Wüste der Äquatorregion. Dies könnte erklären, woher deren durch Erosion geformte Schluchten und Täler stammen

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

[www.astronomie-heute.de/artikel/1034678](http://www.astronomie-heute.de/artikel/1034678)

### »Hirn unter Strom«

Obwohl sie bei schweren Depressionen oft erfolgreich ist, genießt die Elektrokrampftherapie keinen guten Ruf. Patienten lehnen die Behandlung mit Stromstößen oft ab. Zwei Mediziner vom Universitätsklinikum Bonn erklären, warum die Befürchtungen unbegründet sind

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

[www.gehirn-und-geist.de/artikel/1034008](http://www.gehirn-und-geist.de/artikel/1034008)

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

## spektrumdirekt.de

*Die Wissenschaftszeitung im Internet*

### Fortschritte in der Nanowelt

Immer besser beherrschen es Forscher, Strukturen mit Abmessungen von wenigen milliardstel Metern herzustellen und auch zu nutzen. Mit Nanokügelchen manipulieren sie Licht und bringen so die Plasmonik voran, sie schicken aber auch DNA-Roboter auf den Vormarsch und lassen Goldkügelchen unter einer »Tarnkappe« verschwinden

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

### Wie sehen die Metropolen der Zukunft aus?

Mehr als die Hälfte der Menschheit lebt bereits in Städten – Tendenz steigend. Ist die Stadt der Zukunft ein Moloch oder eine Chance? Wie lassen sich ihre Bewohner versorgen? Und was wurde aus den Utopien der Vergangenheit?

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

## WissensLogs

*Die Wissenschaftsblogs*

### Plattform für Debatten

Hintergründiges zur Ölpest, neue Experimente der Plasmaphysik, sprachwissenschaftliche Überlegungen und klimapolitische Entwicklungen: Auf der Blogplattform des »Spektrum«-Verlags erfahren Sie, was Wissenschaftler und Wissenschaftsjournalisten aus ganz Deutschland derzeit beschäftigt. Sehen Sie die Welt aus ungewöhnlichen Perspektiven, und vor allem: Diskutieren Sie mit!

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

## Spektrum in den sozialen Netzwerken



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



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



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



Eidgenössische Technische Hochschule Zürich  
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

## Assistant Professor (Tenure Track) of Biological Systems Analysis

The Department of Biosystems Science and Engineering ([www.bsse.ethz.ch](http://www.bsse.ethz.ch)) at ETH Zurich invites applications for an outstanding candidate in Biological Systems Analysis, preferably with a focus on experimental single cell analysis in multicellular systems. Ideally, the candidate has a strong background in the development of novel strategies to elucidate the roots and implications of molecular noise in determining cellular decisions and the implications for multicellular ensembles. Research areas of interest may include, but are not limited to, single cell signaling dynamics, gene circuit control, and cellular heterogeneity in biotechnology. Collaborations with the SystemsX.ch community ([www.systemsx.ch](http://www.systemsx.ch)), the Swiss initiative in systems biology, are highly encouraged.

D-BSE of ETH Zurich is located in Basel, the heart of the BioValley area which provides excellent opportunities for collaboration within a strong life science research community at the academic as well as at the company level in areas ranging from biotechnology to pharmaceutical and medical research.

The educational goal of D-BSE is interdisciplinary science and engineering to teach students at both the undergraduate and graduate levels by integrating expertise and knowledge from biologists, chemists, physicists, engineers, computer scientists and mathematicians, along with industrial collaborators. The successful candidate will be expected to teach undergraduate level courses (German or English) and graduate level courses (English).

Assistant professorships have been established to promote the careers of younger scientists. The initial appointment is for four years with the possibility of renewal for an additional two-year period and promotion to a permanent position.

Please submit your application together with a curriculum vitae, a list of publications, and statements on future teaching and research activities to the President of ETH Zurich, Prof. Dr. Ralph Eichler, Raemistrasse 101, 8092 Zurich, Switzerland (or via e-mail to [faculty-recruiting@sl.ethz.ch](mailto:faculty-recruiting@sl.ethz.ch)), no later than July 31, 2010. When applying electronically, do only send one PDF file. With a view towards increasing the number of female professors, ETH specifically encourages qualified female candidates to apply.



Eidgenössische Technische Hochschule Zürich  
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

## Professor of Stochastic Systems (Theory)

The Department of Biosystems Science and Engineering ([www.bsse.ethz.ch](http://www.bsse.ethz.ch)) at ETH Zurich invites applications for an outstanding candidate in Stochastic Systems (Theory) who will develop a strong and visible research program in the area of stochastic systems for the analysis and design of biological systems. Research topics include but are not limited to mathematical/computational methods for probabilistic modeling and stochastic simulation of biological systems, for systems identification and experimental design, and for rational engineering of novel biological functions that are robust to or exploit stochastic phenomena.

D-BSE of ETH Zurich is located in Basel, the heart of the BioValley area providing excellent opportunities for collaboration within this strong life science research community at the academic, clinical, and pharmaceutical level.

Candidates should have a Ph.D. degree in Mathematics, Engineering, Computer Science, or related disciplines, and an excellent track record in development of stochastic systems methods and their application to biological systems. The ideal applicant should have demonstrated success in obtaining support for independent research projects and a strong publication record reflecting innovative, interdisciplinary, and collaborative approaches to important problems in biology or medicine. Commitment to teaching and the demonstrated ability to lead a research group are expected. The successful candidate will be expected to teach undergraduate level courses (German or English) and graduate level courses (English). The position will be filled either at the associate or the full professor level, depending on the candidate's age and qualification.

Please submit your application together with a curriculum vitae, a list of publications, and statements on future teaching and research activities to the President of ETH Zurich, Prof. Dr. Ralph Eichler, Raemistrasse 101, 8092 Zurich, Switzerland (or via e-mail to [faculty-recruiting@sl.ethz.ch](mailto:faculty-recruiting@sl.ethz.ch)), no later than July 31, 2010. When applying electronically, do only send one PDF file. With a view towards increasing the number of female professors, ETH specifically encourages qualified female candidates to apply.



MIT FRODL. GEN. DER TETEC AG

## » Wir bauen ein Trägermaterial und säen Knorpelzellen ein«

Neuer Gelenkschutz statt Prothese, so lautet das Versprechen von Christoph Gaissmaier, Arzt und Vorstand der Tetec, eines Unternehmens, das aus körpereigenen (autologen) Knorpelzellen Transplantate für Kniegelenkoperationen herstellt.

**Christoph Gaissmaier** wurde 1964 in Ulm geboren. Nach einer kaufmännischen Ausbildung begann er 1988 ein Medizinstudium in Tübingen. Während der Doktorarbeit erwachte sein Interesse an der Wissenschaft, 1997 absolvierte er mehrwöchige Forschungsaufenthalte in Denver, Chicago und Pueblo. Seit zwölf Jahren leitet er das zellbiologische Labor der Berufsgenossenschaftlichen Unfallklinik Tübingen, das sich am Naturwissenschaftlichen und Medizinischen Institut in Reutlingen befindet. Vor zehn Jahren gründete er dort die Firma Tetec – der Name steht für »Tissue Engineering Technologies« – als Tochtergesellschaft von B. Braun/Aesculap. Das Unternehmen hat derzeit 39 Mitarbeiter. Gaissmaier ist Vorstand für Forschung und Entwicklung, Herstellung und Zulassungen. Er gehört außerdem zu den Gründungsmitgliedern der Arbeitsgemeinschaft »Gewebereneration und Gewebeersatz« der Fachgesellschaften für Unfallchirurgie und Orthopädie.

**Spektrum der Wissenschaft:** Sie leiten ein Forschungslabor der Universität Tübingen und sind Firmengründer – eine steile Karriere. War das so geplant?

**Dr. Christoph Gaissmaier:** Offen gestanden nein. Nach dem Abitur absolvierte ich eine kaufmännische Lehre, weil ich mir noch nicht im Klaren war, was ich wollte.

**Spektrum:** Wie kamen Sie zur Medizin?

**Gaissmaier:** Ich wohnte mit einem Freund zusammen, dessen Sohn an Krebs erkrankte. Damals reifte bei mir die Idee, Arzt zu werden. Eine Hürde war mein Notendurchschnitt. Beim Medizinertest gehörte ich aber zu den besten zehn Prozent und erhielt einen Studienplatz. Während der Doktorarbeit erwachte dann das Interesse an der Forschung. Unser Team befasste sich mit Verknöcherungen, die bei Hüftprothesen auftreten können und die Beweglichkeit einschränken. Damals arbeitete ich erstmals mit Zellkulturen. Und ich stellte fest, dass mir Wissenschaft Spaß macht.

**Spektrum:** Inzwischen produzieren Sie Transplantate für geschädigte Gelenke.

**Gaissmaier:** Vor allem größere Knorpelschäden, verursacht beispielsweise durch einen Sportunfall, führen neben erheblichen Beschwerden zu weiteren Ver-

schleißerscheinungen und häufig zur Gelenkarthrose. Wenn die Knorpelschicht, die das Gelenk auskleidet, so weit zerstört ist, dass Knochen auf Knochen reibt und Erschütterungen nicht mehr abgedämpft werden können, sind Schmerzen, Unbeweglichkeit und letztlich der künstliche Gelenkersatz die Folgen. Seit einigen Jahren gibt es nun aber die ACT, eine Technik, körpereigene – im Fachjargon autologe – Knorpelzellen einzusetzen.

**Spektrum:** Die zuvor entnommen und vermehrt werden?

**Gaissmaier:** Man entnimmt arthroskopisch eine kleine Menge davon aus noch intakten Knorpelarealen, vermehrt sie im Labor und injiziert das Resultat dann im Rahmen einer Operation an die betroffene Stelle. Dort wachsen die Zellen an und bilden neues Knorpelgewebe.

**Spektrum:** Das klingt zu einfach, um wahr zu sein. Wo ist der Haken?

**Gaissmaier:** Der Chirurg muss relativ viele gesunde Strukturen zerstören, um den eigentlichen Defekt zu behandeln. Bei der konventionellen ACT misst der Schnitt zur Eröffnung des Kniegelenks zirka 14 Zentimeter, der Schaden ist aber vielleicht nur so groß wie eine Euro-Münze. Der Operateur braucht aber



Das Tetec-Produkt Novocart 3D (Foto) ist ein Biomaterial, das Knorpelzellen eine möglichst natürliche Umgebung für die Vermehrung bietet. Es kann minimal-invasiv ins Gelenk eingesetzt werden. Zurzeit bereitet das Unternehmen die klinische Erprobung von Novocart Disc zur Bandscheibenregeneration vor. Es wird flüssig injiziert und polymerisiert vor Ort, um transplantierte Zellen in der Bandscheibe zu fixieren.

Platz, weil er das Transplantat mit einem Deckel aus Knochenhaut wasserdicht verschließen muss, damit die neuen Zellen am Ort bleiben, bis sie anwachsen. Außerdem tendieren Knorpelzellen in Kultur dazu, ihre Eigenschaften zu verlieren, je mehr Zellteilungen sie durchlaufen. Das Transplantat gleicht dann eher Narben- als Knorpelgewebe und ist weit weniger funktional.

**Spektrum:** Gibt es denn noch andere Behandlungsalternativen?

**Gaissmaier:** Mikrofrakturierung und Mosaikplastik. Bei der ersten entfernt der Chirurg den defekten Knorpel und bohrt den darunterliegenden Knochen an. Aus dessen Mark wandern unspezifische Bindegewebszellen in den Defekt ein und füllen ihn mit Narbengewebe. Gerade bei größeren Knorpelschäden ist dieses nach 18 bis 36 Monaten meist wieder abgetragen, da es den erheblichen biomechanischen Belastungen nicht standhält. Der Patient steht dann erneut vor der Frage, wie es weitergehen soll. Bei der Mosaikplastik stantzt man aus weniger beanspruchten Stellen im Gelenk Knorpel-Knochen-Zylinder aus und pflanzt sie in den defekten Bereich ein. Die Verfügbarkeit dieser Stanzzyylinder im Gelenk ist aber begrenzt. Der gemeinsame

Bundesausschuss der Krankenkassen hat deshalb beschlossen, die Kosten für die ACT – rund 4000 bis 5000 Euro – zu übernehmen.

**Spektrum:** Weil das Zellimplantat mehr Erfolg verspricht?

**Gaissmaier:** Vor allem erreicht man mit den alternativen Methoden kaum die einzigartigen biomechanischen Eigenschaften von hyalinem Gelenkknorpel, der sowohl heftige Stöße dämpft als auch Scherkräften widersteht.

**Spektrum:** Worauf beruht dessen Elastizität und Beständigkeit?

**Gaissmaier:** Hyaliner Knorpel – das Adjektiv beschreibt das glasige Aussehen – besteht im Wesentlichen aus zwei Komponenten: einem strapazierfähigen Netzwerk aus Kollagen-Typ-2-Fasern und einem wässrigen Gel. Es wird von Aggrecanen gebildet, das sind ebenfalls Proteine, die in den Maschen des Netzwerks sitzen und Wassermoleküle binden. Wie das Gelkissen in Laufschuhen dämpft dieses Polster Stöße auf die Gelenkflächen.

**Spektrum:** Und warum bilden Knorpelzellen, die in Zellkulturen vermehrt werden, oft ein Narbengewebe?

**Gaissmaier:** Das kann passieren, weil ihr Stoffwechsel ohne Einbettung in eine geeignete extrazelluläre Matrix nicht mehr richtig funktioniert. Deswegen haben wir ein Biomaterial entwickelt, das ihre natürliche Umgebung imitiert.

**Spektrum:** Worum handelt es sich dabei?

**Gaissmaier:** Es besteht aus Molekülen, die in den Körpergeweben vorhanden sind. Die künstliche Struktur löst sich deshalb auch mit der Zeit auf und wird durch eine Matrix ersetzt, die von den transplantierten Zellen selbst hergestellt wird. Wir verwenden vor allem Kollagen Typ 1 und ein Chondroitinsulfat. Mit Hilfe eines speziellen Gefriertrocknungsverfahrens bauen wir daraus ein schwammartiges Trägermaterial auf, in das wir die Zellen des Patienten einsäen. Für ein optimales Ergebnis geben wir noch einen Differenzierungsfaktor dazu, damit sie ihre Eigenschaften behalten beziehungsweise wiedererlangen. Dieser Faktor wird normalerweise von den Knorpelzellen selbst produziert, durch die Zellvermehrung wird die Synthese aber unterdrückt. Auf einer Seite des schwammartigen Materials befindet sich ein Deckel aus sehr reißfestem Kollagen. Das rund 2,6 Millimeter dicke Transplantat bringen wir gekühlt in einem dafür entwickelten Transportcontainer ins Krankenhaus zurück.

**Spektrum:** Wie groß muss der Schnitt sein, um dieses Implantat einzusetzen?

**Gaissmaier:** Da keine aufwändige Naht zum Abdichten mehr notwendig ist, reichen rund vier Zentimeter.

**Spektrum:** Wie ist es Ihnen gelungen, ein solches Produkt zu entwickeln?

**Gaissmaier:** Während meiner chirurgischen Zeit an der Berufsgenossenschaftlichen Unfallklinik Tübingen, an der ich heute noch beschäftigt bin, veröffentlichten schwedische Kollegen erstmals Ergebnisse solcher autologen Knorpelzelltransplantationen. Wir haben das auch versucht und konnten bald größere Defekte reparieren. Dann fragte 1999 der Verband der Berufsgenossenschaftlichen Unfallkliniken an, ob wir in unserem Labor auch Transplantate für seine anderen Kliniken herstellen können. Das war aber rechtlich nicht einfach, weil man dazu eine Herstellungserlaubnis benötigt, die im Rahmen eines Hochschullabors nur schwer zu erhalten ist. Aesculap, ein im schwäbischen Tuttlingen ansässiges Unternehmen, das zum internationalen Medizintechnikkonzern B. Braun gehört, zeigte sich interessiert. 2000 wurde die Tetec als Aesculap-Tochter gegründet. Seitdem haben wir mehr als 3000 Transplantate für das Kniegelenk hergestellt.

**Spektrum:** Warum eigentlich gerade für dieses Gelenk?

**Gaissmaier:** Weil es in den westlichen Nationen – und das sind unsere potenziellen Kunden – am häufigsten von Knorpelschäden und Arthrose betroffen ist. Das ist vermutlich sowohl eine Folge der höheren Lebenserwartung als auch des Freizeitsports.

**Spektrum:** Ist es nicht riskant, mit nur einem Produkt auf dem Markt vertreten zu sein?

**Gaissmaier:** Inzwischen transplantiert man auch bei Sprunggelenken. Und für Gelenke, die chirurgisch nicht gut zugänglich sind, beispielsweise bei Schäden an den Bandscheiben, haben wir ein flüssiges Biomaterial entwickelt, das erst an der defekten Stelle polymerisiert.

**Spektrum:** Haben Sie noch Zeit für den Patientenkontakt in der Klinik?

**Gaissmaier:** Leider nein. Aber unser Produkt wird dieses Jahr bei mehr als 1000 Patienten eingesetzt. An meiner Motivation, therapeutisch tätig zu sein, muss ich also keine Abstriche machen. ◀

Das Interview führte die Münchner Wissenschaftsjournalistin **Julia Groß**.



## LINGUISTIK

# Indogermanische Sprachen in Europa

Mit ungewöhnlichen Methoden rücken Forscher der Frage zu Leibe, wann und wie die indogermanischen Sprachen nach Europa gelangten

M. DAUDU

### WEITERE THEMEN IM AUGUST

#### **SERIE Zeit: Mesopotamien**

Früher war alles besser – den Urzustand der Welt wiederherzustellen, gehörte zu den wichtigsten Zielen mesopotamischer Politik

#### **Exotische Weberknechte**

Bizarre Körperformen, grelle Farben, gute Panzerung und chemische Abwehrwaffen kennzeichnen zahlreiche dieser Spinnentiere

**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)



HOLLY LINDEN

#### **Minerale, die das Leben schuf**

Nur ein Dutzend Minerale zählten zur Mitgift der Erde bei ihrer Entstehung vor 4,6 Milliarden Jahren. Heute gibt es über 4400. Die meisten davon verdanken ihre Existenz dem Leben

NASA / HOLLAND FORD, JHU / DAS ACS SCIENCE TEAM UND ESA

#### **Kosmologisches Standardmodell auf dem Prüfstand**

Die noch rätselhafte Dunkle Materie soll eine zentrale Rolle bei der Entwicklung von Galaxien spielen. Doch Beobachtungen an Satellitengalaxien in unserer kosmologischen Nachbarschaft nähren Zweifel an der Existenz dieser Materieform

