

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

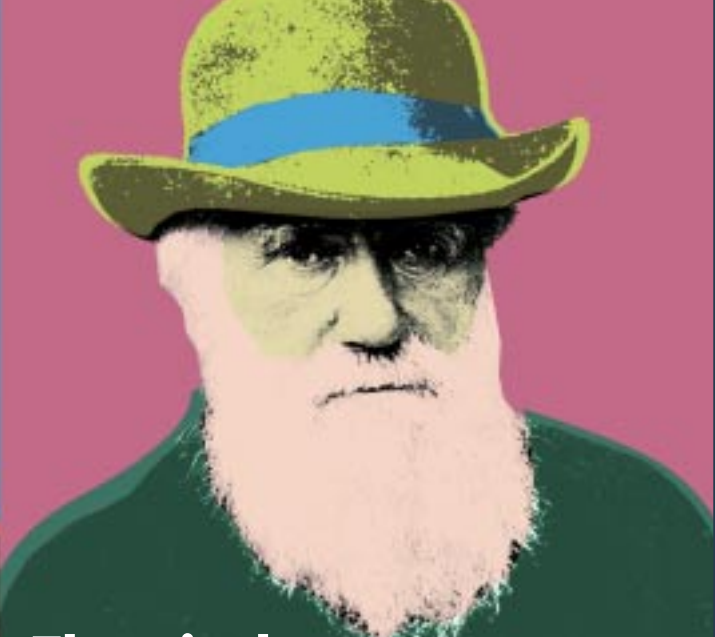
DVD

LHC –
der Film

Erde 3.0
Ökostädte
der Zukunft



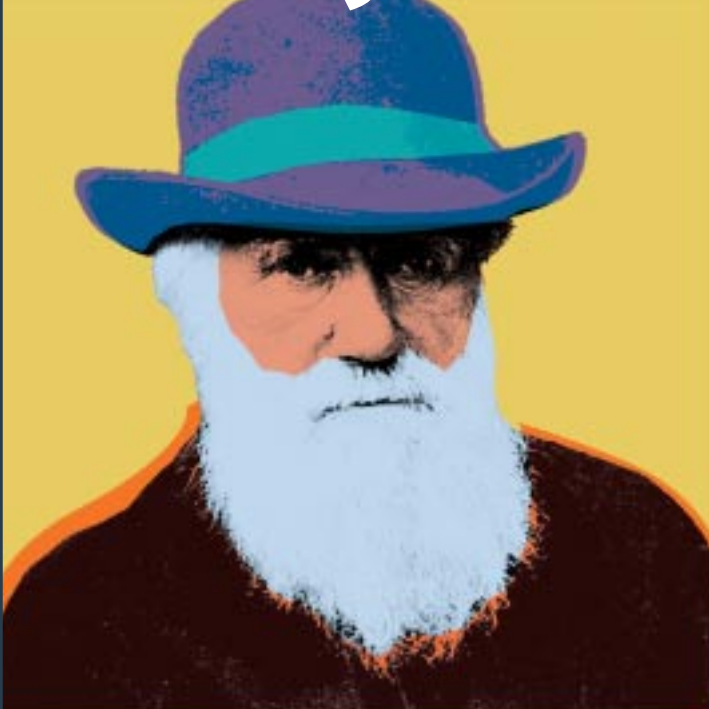
Spektrum
DER WISSENSCHAFT
01/09
JANUAR 2009



Vierteilige Darwin-Serie

Theorie der

150 Jahre Evolution



TEIL I: Gruppe kontra Individuum?

DEUTSCHE AUSGABE DES
SCIENTIFIC
AMERICAN

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



www.spektrum.de



Reinhard Breuer
Chefredakteur

Wider die Vorurteile zwischen Geistes- und Naturwissenschaften

Seit fast einem Jahr porträtieren wir nun schon im Zweimonatstakt herausragende Wissenschaftler wie den Quantenphysiker Anton Zeilinger oder den Paläogenetiker Svante Pääbo. Diesmal haben wir einen Vertreter der jüngeren Generation befragt: den Wissenschaftsphilosophen Michael Pauen. An der Berliner Humboldt-Universität ist er Professor »für die Philosophie des Geistes« – wahrlich ein anspruchsvolles Metier.

Er ist ein Mann, der mit Vorurteilen aufräumt: So erklärt er etwa die Beschädigungen, die das Menschenbild angeblich durch die naturwissenschaftlichen Entdeckungen erfahren habe, für einen Mythos. Die berühmte »kopernikanische Kränkung« sei in Wahrheit eine Erhöhung des Irdischen in die Himmelsphären gewesen. Deshalb beruht für Pauen das gegenseitige Misstrauen zwischen Natur- und Geisteswissenschaften auf einem »naturalistischen Missverständnis«. Dass der Philosoph nicht nur dem reinen Geist verpflichtet ist, sondern auch gerne zur Rockgitarre greift, haben wir beim Gespräch mit Interesse vernommen (S. 54).

Mit einigen Veränderungen wollen wir Sie in dieser Ausgabe überraschen. So starten wir mit »Schlichting!« eine Rubrik, die von dem Physikprofessor Joachim Schlichting verfasst wird. Er beschreibt für uns Alltagsbeobachtungen, die eine originelle physikalische Erklärung finden – Phänomene, die unterhaltsam und lehrreich zugleich sind (S. 30). In der zweiten neuen Rubrik »Wissenschaft und Karriere« stellen wir Menschen vor, die den Weg aus der Wissenschaft in die freie Wild-



MIT FRODLINGEN VON MICHAEL PAUEN

bahn der Wirtschaft, oft auch mit eigenen Unternehmensgründungen, gefunden haben. Was sie dazu brauchten: zumindest eine gute Idee für etwas, das andere benötigen, ohne sich darüber richtig im Klaren zu sein (S. 98).

Umwelt, Ökologie und Technologie sind schließlich Themen unserer Umweltreihe »Erde 3.0«. Die Bezeichnung spielt an auf die bei Software bekannten Upgrades. Seit wir mit der industriellen Revolution die »Erde 2.0« eingeführt haben, sind wir mit vollem Einsatz dabei, die ererbte »Erde 1.0« zu ruinieren. Wie es uns gelingen könnte, Ökologie und Ökonomie so zu vereinen, dass es eine nachhaltige »Erde 3.0« geben wird, damit befassen wir uns in der neuen Reihe. In diesem Jahr haben wir dazu fünf Folgen vorgesehen.

Auch Wissenschaftsphilosophen können manchmal ganz anders: hier Michael Pauen (rechts) an der Bassgitarre in seiner Blindenrockband, dem »Marburger Hammerorchester«.

Herzlich Ihr

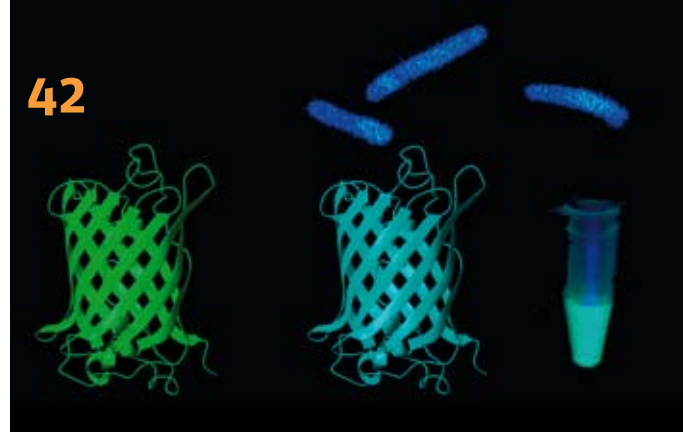
Reinhard Breuer



24

ASTRONOMIE & PHYSIK

Vielleicht ist das All wie ein Reifen geformt



42

MEDIZIN & BIOLOGIE

Neue Fluoreszenzmarker dank erweitertem Gen-Code

62

MENSCH & GEIST

Elliptische Kurven sind Gegenstand eines großen Mathematik-Rätsels

AKTUELL

10 Spektrogramm

Fotos von fernen Planeten · Tote Maus geklont · Strom aus dem Schuh · Familienbande bei Amöben · Golfstrom mit Fernsteuerung u. a.

13 Bild des Monats

Urschildkröte mit halbem Panzer

14 Gammablitze in neuem Licht

Zufällige Beobachtung eines Gammablitzes im optischen Spektralbereich liefert neue Einsichten

16 Bakterielle Vereinsmeierei

Molekulare Hintergründe des Gemeinsinns bei Bakterien

19 Magma spricht, bevor es bricht

Zerbrechendes Magma kündigt explosive Vulkanausbrüche an

21 Durchbruch dank Graphen

Abbildung von Wasserstoffatomen mit ultradünner Kohlenstoffolie

23 Springers Einwürfe

Dringend gesucht: eine Theorie für wilde Märkte

ASTRONOMIE & PHYSIK

24 Ist das Weltall ein Donut?

Nicht nur das unendliche Standardmodell des Universums ist mit den Beobachtungen verträglich – sondern auch ein endlicher »Drei-Torus«

NEUE RUBRIK »SCHLICHTING!«

30 Lesen im Kaffeefleck

Physikdidaktiker H. Joachim Schlichting erklärt physikalische Phänomene des Alltags

51

DVD

LHC –
der Film



MEDIZIN & BIOLOGIE

TITEL

DARWIN SERIE TEIL I EVOLUTION

32 Gruppe oder Individuum?

Die Selektion »zum Wohl des Ganzen« galt lange als gefährliche Irrlehre. Ein neuer, differenzierter Ansatz zeigt ihre Bedeutung

42 Erweiterung des genetischen Kodes

Eine Art Kode-Evolution im Labor kann Zellen in die Lage versetzen, Proteine mit ausgewählten künstlichen Bausteinen herzustellen

WISSENSCHAFT IM ALLTAG

52 Lebenssaft im Beutel

Damit Blutkonserven Leben retten, werden die Spenden aufwändig nach Blutbestandteilen getrennt

Titelmotiv: www.darwin-jahr.de, mit frdl. Genehmigung der Giordano Bruno Stiftung

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



DARWIN-SERIE TEIL I

Evolution zum Wohl des Ganzen?

32

MENSCH & GEIST

PORTRÄT

- 54 Philosoph mit (Faible fürs) Hirn**
Michael Pauen bezieht als Geisteswissenschaftler die Ergebnisse der Hirnforschung in sein Denken ein

SERIE (TEIL IV)
DIE GRÖSSTEN RÄTSEL DER MATHEMATIK

- 62 Elliptische Kurven und eine kühne Vermutung**
Erst 40 Jahre wartet die Vermutung von Birch und Swinnerton-Dyer auf ihren Beweis; aber sie ist so bedeutend, dass ein Preis von einer Million Dollar darauf ausgesetzt ist

INTERVIEW

- 72 »Am Ende interessiert der Mensch«**

Ein Interview mit dem neuen Präsidenten des Deutschen Archäologischen Instituts, Hans-Joachim Gehrke, über die Ziele der Altertumswissenschaften heute

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

- 76 Experimentelle Mathematik**
Systematisches Probieren mit modernen Algorithmen liefert neue Erkenntnisse – und manchmal einen Beweis gleich mit

ERDE & UMWELT

NEUE RUBRIK ERDE 3.0

- 81 ► Ökostädte der Zukunft**
Weltweit entwerfen Städteplaner Visionen von naturnahen, umweltfreundlichen Metropolen. Drei Prototypen sind in den USA, China und den Arabischen Emiraten geplant
- 88 Kurzberichte**
Öl aus Algen · Chinas Streben nach sauberer Kohle · In Großvaters Fußstapfen

WEITERE RUBRIKEN

- 3 Editorial: Wider die Vorurteile zwischen Geistes- und Naturwissenschaften
8 Leserbrief / Impressum
89 Im Rückblick
111 Lösung des »Spektrum«-Jubiläumspreisrätsels
114 Vorschau



81

ERDE & UMWELT
Öko-Alternative zu Schanghai?



90

TECHNIK & COMPUTER
Echt oder gefälscht?

TECHNIK & COMPUTER

- 90 Wie entlarvt man Bildfälschungen?**
Mit raffinierten Algorithmen lassen sich selbst geschickte Manipulationen an Digitalfotos aufdecken
- NEUE RUBRIK WISSENSCHAFT & KARRIERE
- 98 »Spielen liegt in der Natur des Menschen«**
Interview mit einem KI-Forscher und Unternehmensgründer
- 100 European Contest for Young Scientists 2008**
»Jugend forscht« auf europäischer Ebene

- 104 Rezensionen:
Hans und Thomas Pichler *Vulkangebiete der Erde*
Robert B. Laughlin *Abschied von der Weltformel*
P. Ball *Brillante Denker, kühne Pioniere*
Michael Pauen *Was ist der Mensch?*
Volker Sommer *Darwinisch denken*
Gerard Caris *Pentagonismus*

ONLINE

Dies alles und vieles mehr finden Sie in diesem Monat auf www.spektrum.de.

Lesen Sie zusätzliche Artikel, diskutieren Sie mit und stöbern Sie im Heftarchiv!

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

Wissenschaft



CORBIS-REUTERS

FÜR ABONNENTEN »Gene mit Gedächtnis«

www.spektrum-plus.de



AUS: F.E. GUÉRIN-MENEVILLE, DICTIONNAIRE PICTORESCQUE D'HISTOIRE NATURELLE ET DES PHÉNOMÈNES DE LA NATURE... 1835

INTERAKTIV Mitmachen und gewinnen

www.spektrum.de/artikel/975115

spektrumdirekt.de

Die Wissenschaftszeitung im Internet

Kein Ende der (R)Evolution

Das Darwin-Jahr hat begonnen (siehe unseren Artikel auf S. 32) – und Sie wollen mehr über die aktuellen Entwicklungen in der Evolutionsforschung wissen? Das **spektrumdirekt**-Dossier »Evolution« hält Sie auf dem Laufenden

www.spektrumdirekt.de/evolution

Feuer speiende Berge

Die eruptive Gewalt der Vulkane zeugt von der ungebrochenen Dynamik der Erde – und sie bietet faszinierende Einblicke in das Innenleben unseres Planeten

www.spektrumdirekt.de/vulkane

FÜR ABONNENTEN

Ihr monatlicher Plus-Artikel zum Download

Gene mit Gedächtnis

Die molekulare Archäologie hat sich in den letzten zehn Jahren zu einem Zugpferd der Altertumswissenschaft entwickelt. Stehen die großen Rätsel der Geschichtsforschung davor, mit Hilfe der DNA geknackt zu werden?

DIESER ARTIKEL IST FÜR ABONNENTEN FREI ZUGÄNGLICH UNTER

www.spektrum-plus.de

INTERAKTIV

Machen Sie mit!

Mitmachen und gewinnen bei der 10. Wunschartikelrunde



Ethik des Klimawandels? Ordnung aus Chaos? Oder Kaffee – einmal ganz anders gesehen? Über welches von fünf Themen, die wir Ihnen vorstellen, würden Sie gerne in »Spektrum« lesen? Stimmen Sie ab – wir verlosen ein Wochenende in Heidelberg

www.spektrum.de/artikel/975115

Chronik des Lebens

Eindrucksvoll führt uns Ernst Peter Fischer in »Das Große Buch der Evolution« die Ursprünge von Pflanzen, Tieren und Menschen vor Augen. Mit unterhaltsamen Texten und faszinierenden Bildern schildert er die Entwicklung des Lebens vom Mikroorganismus bis hin zu den Menschen. Lesen Sie die Rezension oder schreiben Sie selbst eine Buchvorstellung

www.spektrumdirekt.de/artikel/974957



PIERRE AUGER OBSERVATORIUM

TIPPS Premiere für Auger-Observatorium
www.wissenslogs.de/wblogs/blog/forschern-auf-der-spur

TIPPS
Nur einen Klick entfernt

Premiere für Auger-Observatorium

Chefredakteur Reinhard Breuer war dabei, als in Argentinien das internationale Observatorium für extrem energiereiche kosmische Strahlung offiziell eröffnet wurde. Ein mehrteiliger Reisebericht mit Fotos auf

www.wissenslogs.de/wblogs/blog/forschern-auf-der-spur

Hören Sie auf uns!

Der »Spektrum Talk« ist auch im Januar wieder online: Hören Sie rein in Arvid Leyhs Gespräche mit Redakteuren und Autoren über ausgewählte Artikel aus dieser Ausgabe

www.spektrum.de/talk

Wir lesen für Sie ...

... und vor allem: Wir schreiben über die Bücher, die sich auf unseren Schreibtischen stapeln. Sachbücher aus vielen wissenschaftlichen Disziplinen ebenso wie Lehrreiches für Kinder (und ihre Eltern) besprechen wir auf

www.spektrum.de/rezensionen



FREIGESCHALTET

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

Einfach + schön = wahr

Was wir ästhetisch ansprechend finden, halten wir eher für richtig. Die Psychologen Rolf Reber und Sascha Topolinski erklären, warum unser Geist Schönheit mit Wahrheit gleichsetzt

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

www.gehirn-und-geist.de/artikel/974899

Erste Bilder von extrasolaren Planeten

Vor 14 Jahren hatte der erste indirekte Nachweis von Planeten bei anderen Sternen einen Wettlauf um die erste direkte Aufnahme von Exoplaneten ausgelöst. Nun wurden gleich zwei solcher Bilder veröffentlicht

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

www.astronomie-heute.de/artikel/975525



FREIGESCHALTET

Einfach + schön = wahr

www.gehirn-und-geist.de/artikel/974899

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

www.spektrum.com
service@spektrum.com
Telefon 06221 9126-743

WISSENSlogs

Die Wissenschaftsblogs

Folgeschwere Experimente?

Während der LHC in unfreiwilligem Winterschlaf liegt, beleuchten die **Wissenslogs**, was wir von dem Großexperiment tatsächlich zu erwarten haben (Blog: »RELATIV EINFACH – aber nicht einfacher«). Wer es näher am Alltag mag, liest dagegen bei Stefan Ohm, der sich mit Hyperurbanisierung befasst, über ein potenziell wesentlich folgeschwereres Experiment der Menschheit (»GEO-LOG«). Und wie steht es um den Klimawandel? Alte und neue Erkenntnisse werden auf dem »Spektrum«-Blogportal nach wie vor sehr kontrovers diskutiert (»GEO-LOG«, »KlimaLounge«, »ÖKO-LOGISCH«).

www.wissenslogs.de
www.scilog.de

Zum deutschen Standort Semantic Web

Mein Computer versteht mich – allmählich, November 2008

Ich erhielt das Novemberheft am Tag vor der 7th International Semantic Web Conference in Karlsruhe. Dort treffen sich jährlich die maßgeblichen Forscher und Anwender rund um das Thema des Artikels. Auch einige der Autoren des Beitrags waren dieses Jahr natürlich anwesend.

Als Ergänzung zu dem aus dem Englischen übersetzten Artikel sei angemerkt, dass sich einige der führenden Standorte zum Semantic Web (im Artikel frei als »Semantisches Netz« über-

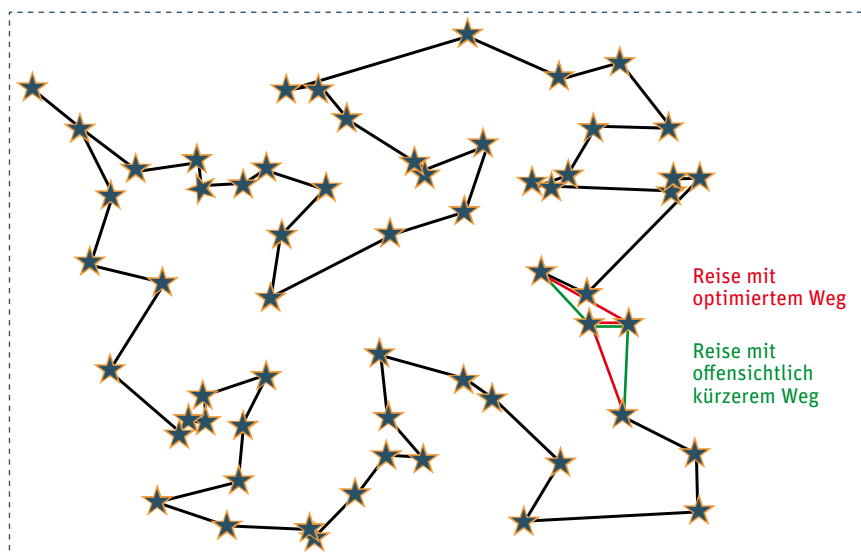
setzt) in Deutschland befinden. Eine entsprechende Liste dazu findet sich unter www.spektrum.de/artikel/971784.

PD Dr. Pascal Hitzler, Karlsruhe

Nachgebesserter optimierter Weg

Wie man einen Brief frankiert Oktober 2008

Offensichtlich kann man den »optimierten Weg« auf S. 78 nachbessern (grün in der Zeichnung). Es ist nicht ausgeschlossen, dass es auch andere Nachbesserungen gibt. Allerdings sind sie wegen der geringen Auflösung rein optisch schwer zu entdecken.



Briefe an die Redaktion ...

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

Oder schreiben Sie mit kompletter Adresse an:

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

Im Übrigen ist das Beispiel zum Problem des Handlungsreisenden (TSP) gut ausgewählt, da es einen Wegabschnitt zeigt (links ganz oben), auf dem der Handlungsreisende zweimal einen Ort besucht. In vielen TSP-Interpretationen ist das unnötigerweise »verboten«. Beim TSP ist nur wichtig, dass der Handlungsreisende alle Orte mindestens einmal besucht und zum Ausgangsort zurückkehrt.

Prof. Dr. Dejan Lazich, Karlsruhe

Erratum

Rettung für den Aralsee? Oktober 2008

In der Landkarte auf S. 66 ist der Balchaschsee abgebildet. Der Baikalsee liegt noch beträchtlich weiter östlich.

Die Red.

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefler (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Thilo Körkel (Online Coordinator), Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Christina Meyberg (Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Marc Grove, Anke Heinzlmann, Claus Schäfer, Natalie Schäfer
Redaktionsassistent: Eva Kahlmann, Ursula Wessels
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 Könneker, Richard Zinken (Online)
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: service@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Dr. Frank Jöst, Dr. Frank Schubert, Dr. Karl-Hans Taake
Leser- und Bestellservice: Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.com

Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o ZENIT Pressevertrieb GmbH, Postfach 81 06 80, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366, E-Mail: spektrum@zenit-presse.de, Vertretungsberechtigter: Uwe Bronn
Bezugspreise: Einzelheft € 7,40/Sfr. 14,00; im Abonnement € 79,20 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 66,60. Die Preise beinhalten € 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 SdW zum Vorzugspreis.
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls; Anzeigenleitung: Jürgen Ochs, Tel. 0211 6188-358, Fax 0211 6188-400; verantwortlich für Anzeigen: Ute Wellmann, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2481, Fax 0211 887-2686
Anzeigenvertretung: Berlin: Michael Seidel, Goethestraße 85, 10623 Berlin, Tel. 030 526821-841, Fax 030 7526821-828; Hamburg: Matthias Meißner, Brandtstraße 1 / 6. OG, 20457 Hamburg, Tel. 040 30183-210, Fax 040 30183-283; Düsseldorf: Hans-Joachim Beier, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2053, Fax 0211 887-2099; Frankfurt: Axel Ude-Wagner, Eschersheimer Landstraße 50, 60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 2424-4507, Fax 069 2424-4555; Stuttgart: Andreas Vester, Werstraße 23, 70182 Stuttgart, Tel. 0711 22475-21, Fax 0711 22475-49; München: Bernd Picker, Josephsplatzstraße 15/IV, 80331 München, Tel. 089 545907-18, Fax 089 545907-24
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 29 vom 01.01.2008.
Gesamtherstellung: Vogel Druck- und Medienservice GmbH & Co. KG, 97204 Höchberg

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung, öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig. Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer.

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

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

ISSN 10170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN

415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Chairman: Brian Napack, President: Steven Yee, Vice President: Frances Newburg, International Managing Director: Kevin House, Vice President, Finance and General Manager: Michael Florek, Managing Director, Consumer Marketing: Christian Dorbandt, Vice President and Publisher: Bruce Brandfon



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



30 Jahre Spektrum DER WISSENSCHAFT

Jubiläum

Allen Kollegen meine Gratulation zum 30sten.

Sehr interessante Zeitschrift. Weiter so.

Kurt Ballay, per E-Mail



Ratlos in die Zukunft, November 2008

Zu komplex für Vorhersagen

Ich finde den Artikel sehr interessant. Menschliches Verhalten ist eben so komplex, dass es nicht adäquat durch (notwendigerweise einfache) Gesellschaftsmodelle vorhergesagt werden kann. Dennoch erliegen wir – also die westlichen Gesellschaften – der Illusion, dass diese Modelle eben doch zutreffen, und handeln danach. Diese Aussagen werden vom Autor mit zahlreichen Beispielen sehr gut unterlegt.

Generell wünsche ich mir, dass »Spektrum« solche Themen häufiger aufgreift. Meistens liegt der Fokus auf

dem (natürlich nicht zu verachtenden) Klimawandel. Brisante Themen aus dem kulturwissenschaftlichen Bereich kommen dabei häufig zu kurz.

Andreas Beyerlein, Sulzbach-Rosenberg

Dilemma erfasst, Perspektive fehlt

Dieser Artikel ist schön geschrieben. Der Autor schafft es treffend, einen kurzen Überblick über das zu geben, was wahrscheinlich die Gefühlswelt vieler Menschen bei uns bewegt, ohne dass sie es immer direkt formulieren können: In der »schönen neuen Welt« laufen wir den Entwicklungen hinterher, erst

konzeptlos, dann überrascht und schließlich verängstigt. Der Autor schafft aber es auch nur, das Dilemma prägnant zu erfassen, kann aber selbst auch keine echte Perspektive anbieten. Der Verweis auf mögliche kleine positive Schritte, wie das zitierte Beispiel zwischen Indien und Pakistan, wirkt eher hilflos angesichts der globalen Einfallsllosigkeit. Aber zielsicher schließt der Autor ja auch mit der Schlussfolgerung: »Ob die Welt das so überlebt, wie wir sie kennen? Wohl kaum!«

Hoffen wir, dass die Welt uns überleben lässt. Auf uns selbst gestellt schaffen wir es wohl eher nicht.

Daniel Schiller, Köln

Die Dunkle Energie und ihre Feinde November 2008

Einfache Erklärung kann Missverständnis bestärken

Der Autor schreibt in diesem Artikel zur Rotverschiebung der Spektrallinien von Galaxien: »Eine einfache Erklärung bietet der Dopplereffekt: Die Wellen werden gedehnt, weil sich die Galaxien von uns wegbewegen.«

Ich bin sicher, dass Herrn Professor Gerhard Börner der korrekte Sachverhalt geläufig ist, nämlich dass es sich nicht um den Dopplereffekt handelt, der in diesem Fall den Hauptanteil der Rotverschiebung bewerkstelligt, son-

dern um die Expansion der Raumzeit (siehe SdW 5/2005, S. 38).

Offensichtlich hat Professor Börner versucht, eine möglichst einfache Erläuterung für eine Aussage zu geben, die im Zusammenhang mit dem Artikel von eher untergeordneter Bedeutung ist.

Leider bestärkt er damit ein Missverständnis, das besonders unter Personen wie mir selbst, die Physik auf einem einfacheren Niveau betreiben, weit verbreitet ist.

Dr. Fritz Macco, Heidenheim

Beobachtungsort von WMAP

Auf S. 41 heißt es: »Er (der Satellit WMAP) wurde am 30. Juni 2001 ... zu einem Punkt zwischen Erde und Sonne geschickt. In etwa 1,5 Millionen Kilometer Entfernung von der Erde beobachtet er – immer von der Erde und der Sonne abgewandt – ...«

Zwischen Erde und Sonne liegt der Lagrange-Punkt L1. WMAP ist am Lagrange-Punkt L2 auf der verlängerten Linie Sonne-Erde 1,5 Millionen Kilometer hinter der Erde. Nur von da ist eine komplette Himmelsbeobachtung möglich, bei der man sich gleichzeitig von Sonne und Erde abwenden kann.

Daniel Schiller, Köln

EVOLUTION

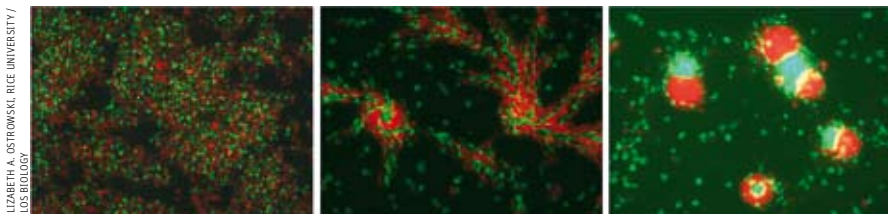
Familienbande bei Amöben

■ Findet die Amöbe *Dictyostelium discoideum* keine Nahrung mehr, kann sie sich mit Artgenossen zu einem vielzelligen Verband zusammenschließen. An einem langen Stiel entsteht dann ein Fruchtkörper, der Sporen freisetzt. Das sind Zellen in einem robusten, genügsamen Dauerstadium, die leicht verbreitet werden können und unter günstigen Bedingungen wieder auskeimen. Der Haken dabei: Nur die Amöben in den Sporen pflanzen sich fort, diejenigen im Stiel

sterben ab. Warum opfern sie sich freiwillig für ihre Artgenossen?

Um diese Frage zu klären, manipulierten Wissenschaftler um Elizabeth Ostrow-

Zwei verschiedene Stämme von *Dictyostelium discoideum* (rot und grün markiert) sortieren sich bei der Entwicklung vom Einzeller zum vielzelligen Fruchtkörper nach genetischer Ähnlichkeit.



ELIZABETH A. OSTROWSKI, RICE UNIVERSITY / PLOS BIOLOGY

ski von der Rice University in Houston (Texas) bei Versuchen mit den Urtierchen gezielt die Verwandtschaftsverhältnisse. Dazu züchteten sie zwölf genetisch unterschiedliche Stämme, die sie farblich markierten. Anschließend ließen sie je zwei gemeinsam hungern.

Wie erwartet, wanderten die Einzeller aufeinander zu und vereinigten sich zu Fruchtkörpern. Doch geschah das keineswegs wahllos. Die farblichen Markierungen offenbarten vielmehr eine klare Vorliebe für die eigene Verwandtschaft: Die Fruchtkörper bestanden jeweils fast ausschließlich aus Mitgliedern desselben Stamms. Eine Zelle opfert sich also gemeinhin nur für einen nahen, genetisch ähnlichen Verwandten, da sich ihr eigenes Erbgut so trotzdem verbreitet. Demnach gilt offenbar schon für primitive Einzeller eine Form von Altruismus, die bisher nur bei hoch entwickelten sozialen Tieren bekannt war.

PLoS Biology, Bd. 6, S. e209

ARCHÄOLOGIE

Kernfamilie schon in der Steinzeit

■ Offenbar gibt es die Kernfamilie schon seit mindestens 4600 Jahren. Das ergab jetzt die genaue Analyse von vier Mehrfachgräbern, die 2005 nahe Eulau in Sachsen-Anhalt entdeckt worden waren. Sie stammen aus der Schnurkeramikkultur, die in Mitteleuropa zwischen 2800 bis 2200 v. Chr. verbreitet war. Ein multidisziplinäres Team um den Anthropologen Wolfgang Haak von der Universität Mainz ermittelte unter anderem mittels DNA-Tests die Verwandtschaftsverhältnisse zwischen den gemeinsam beerdigten Personen. Demnach

enthielt ein Grab einen Mann, eine Frau und zwei gemeinsame Söhne. Eltern und Kinder lagen paarweise einander zugewandt und hielten sich umschlungen.

Die ebenfalls untersuchten Strontiumisotopenverhältnisse in den Zähnen verrietten, wo die Verstorbenen ihre Kindheit verbracht hatten. Sie stimmten bei den Eltern nicht überein, waren jedoch zwischen Vätern und Kindern identisch. Demnach wuchs die Mutter nicht am späteren Familiensitz auf, sondern zog erst bei der Heirat zur Sippe ihres Mannes.

Den Tod fanden die begrabenen Personen anscheinend bei einem gewaltsamen Angriff. So wurde die Wirbelsäule einer Frau von einem Steingeschoss getroffen, zwei der Skelette weisen Schädelverletzungen auf und viele der Kinder zeigen Abwehrspuren an den Unterarmen. Da nur Kinder unter zehn und Erwachsene ab etwa 30 Jahren beerdigt sind, schließen die Forscher, dass die jugendlichen Gruppenmitglieder den Angriff überlebten und zurückkamen, um die Toten zu beerdigen.

PNAS, Bd.105, S. 18226

In einem Grab der Schnurkeramikkultur in Sachsen-Anhalt sind Vater, Mutter und zwei Söhne in inniger Vereinigung beigesetzt.



LANDESAMT FÜR DENKMALPFLEGE UND ARCHÄOLOGIE SACHSEN-ANHALT, JURA LIPTÁK (FOTO), KAROL SCHAUER (ZEICHNUNG)

KLONEN

Zum Leben wiedererweckt



TERUHIKO WAKAYAMA, RIKEN, JAPAN / PNAS

Putzmunter und kerngesund ist der Klon (rechts) einer 16 Jahre tiefgefrorenen Maus (oben).

■ Aus totem Gewebe, das ohne Frostschutzmittel tiefgefroren und wieder aufgetaut wurde, ließ sich bisher kein Klon erzeugen. Tatsächlich hielten das viele Forscher auch für grundsätzlich unmöglich, weil beim Einfrieren Eiskristalle entstehen, die das Innere der Zelle und wohl auch das genetische Material stark schädigen.

Ein Team um Teruhiko Wakayama vom japanischen Riken-Zentrum für Entwicklungsbiologie in Kobe hat jetzt jedoch das Gegenteil bewiesen. Die Gruppe konnte Klone von einer 16 Jahre lang bei -20 Grad Celsius eingefrorenen männlichen Maus

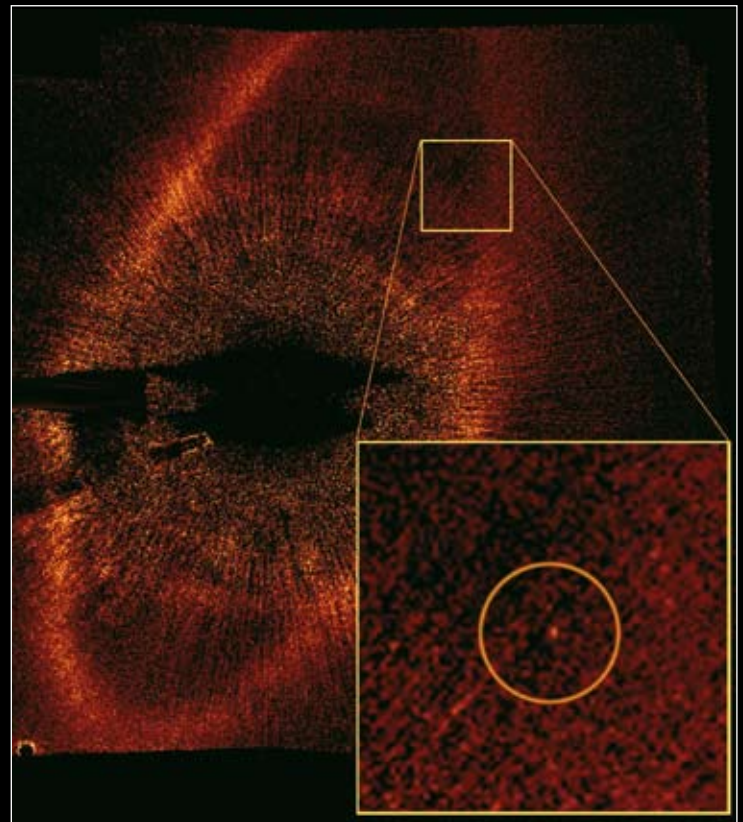
Extrasolare Planeten fotografiert

■ Mehr als 300 extrasolare Planeten sind inzwischen bekannt – doch alle wurden nur indirekt über Bahn- oder Helligkeitsschwankungen entdeckt, die sie bei ihrem Mutterstern hervorrufen. Jetzt ist es erstmals gelungen, Trabanten ferner Sonnen zweifelsfrei auf Fotos zu identifizieren.

Einer davon umrundet den 25 Lichtjahre entfernten Stern Fomalhaut im Sternbild des Südlichen Fisches und erhielt deshalb den Namen Fomalhaut b. Schon länger gab es einen deutlichen Hinweis auf seine Existenz: 2005 zeigten Aufnahmen mit dem Weltraumteleskop Hubble einen azentrischen Stabring um den Stern mit scharfem innerem Rand. Genau dort konnten Forscher um Paul Kalas von der University of California in Berkeley nun ein Objekt ausmachen, das sich im Abstand von 17 Milliarden Kilometern – etwa der zehnfachen Distanz vom Saturn zur Sonne – um Fomalhaut bewegt. Es hat etwa die dreifache Jupitermasse und braucht für einen Umlauf 872 Erdenjahre.

Gleich drei extrasolare Planeten lichtete ein Team um Christian Marois vom Herzberg Institute of Astrophysics in Victoria (British Columbia) mit dem Gemini North Telescope auf Hawaii ab. Sie umrunden den 128 Lichtjahre entfernten Stern HR 8799 im Sternbild Pegasus. Mit einem geschätzten Alter von 60 Millionen Jahren sind sie noch jung genug, um selbst Wärmestrahlung abzugeben. Trotzdem bedurfte es ausgefeilter Computerprogramme, um ihr Licht von dem des sehr viel helleren Zentralsterns zu trennen. Die drei Planeten haben wahrscheinlich die 5- bis 13-fache Masse von Jupiter und einen 20 bis 30 Prozent größeren Durchmesser.

Science, Online-Vorabveröffentlichungen



Auf diesem schon 2006 vom Weltraumteleskop Hubble aufgenommenen Foto ist innerhalb des Stabring um den Stern Fomalhaut ein Planet als schwacher Punkt zu erkennen.

erzeugen. Obwohl sich im tiefgefrorenen Kadaver keine einzige intakte Zelle mehr fand, gelang es den Forschern, aus Hirngewebe, das sie in einem speziellen Medium homogenisierten, nackte Zellkerne zu gewinnen, die sie auf entkernte Oozyten (Eizellen) übertragen konnten. Es klappte auch, embryonale Stammzellen daraus zu gewinnen. Direkte Klonversuche misslangen jedoch: Die sich entwickelnden Embryonen starben nach Einpflanzen in eine Leihmutter regelmäßig ab.

Deshalb übertrugen die Forscher Kerne der geklonten Stammzellen wiederum auf entkernte Oozyten. Und diesmal hatten sie Erfolg: Aus den so erzeugten Embryonen wurden vier geklonte Mäuse geboren, von denen zwei sich später erfolgreich fortpflanzten. Wakayama und seine Kollegen hoffen nun, dass sich ihre Methode auch auf ausgestorbene Tiere wie die Mammuts anwenden lässt, von denen Kadaver über mehr als 4000 Jahre im ewigen Eis Sibiriens konserviert wurden.

PNAS, Bd. 105, S. 17318

TECHNIK

Strom aus dem Schuh

■ Stellen Sie sich vor, Sie gingen spazieren und winzige Drähte in Ihren Schuhen produzierten dabei genügend Wechselstrom, um Ihren MP3-Player zu betreiben oder Ihre Handschuhe zu wärmen! Laut Zhong Lin Wang vom Georgia Institute of Technology in Atlanta ist das kein unerfüllbarer Wunschtraum: Der 1880 von Pierre Curie entdeckte Piezoeffekt macht's möglich.

Wang benutzt 0,2 bis 0,3 Millimeter lange Zinkoxiddrähte. Diese erzeugen beim zyklischen Dehnen und Entspannen ein piezoelektrisches Potenzial, das sich periodisch auf- und wieder abbaut. So entsteht eine Wechsellspannung von bis zu 45 Millivolt. Eine Silbersuspension an den Enden der Drähte fungiert als Elektrode. Da Zinkoxid feuchtigkeitsempfindlich ist, packt Wang es in eine Kunststoffhülle.

Zusammengeschaltet würden mehrere solche Module genügend Strom für den Betrieb kleiner elektrischer Geräte liefern.



Zhong Lin Wang präsentiert den Prototyp seiner flexiblen »Ladungspumpe«. Der Generator erzeugt Wechselstrom, wenn die Zinkoxiddrähte periodisch gedehnt und gestaucht werden.

Einsatzgebiete sind viele denkbar. Die Generatoren könnten in Kleidung, Schuhen oder Fahnen eingebettet werden und verschiedene Sensoren mit Strom versorgen. Ohne externe Energiequelle wäre es so möglich, etwa den Blutdruck zu kontrollieren oder Informationen über die Umwelt zu sammeln und die Daten an eine Zentrale zu übermitteln.

Nature Nanotechnology, Online-Vorabveröffentlichung

OZEANOGRAPHIE

Ferngesteuerter Golfstrom

■ Der Agulhasstrom transportiert warmes, salzreiches Wasser im Indischen Ozean an der afrikanischen Küste entlang nach Süden. Wenn er südlich von Kapstadt auf den antarktischen Zirkumpolarstrom trifft, biegt er abrupt um und kehrt in einer Schleife nach Norden zurück. Dabei schnüren sich alle drei bis vier Monate riesige Wasserwirbel von mehreren hundert Kilometern Durchmesser ab und befördern warmes, salzreiches Wasser in den Atlantik. Tatsächlich wandern sie, wie Arne Biastoch am Kieler Leibniz-Institut für Meereswissenschaften und Kollegen nun herausfanden, bis über den Äquator nach Norden und beeinflussen so schließlich sogar den als Heizung für Europa wichtigen Golfstrom.

Die Forscher verwendeten ein neu entwickeltes Computermodell, das die Strömungen im Meer in nie gekanntem Detailreichtum simulierte. Hochleistungscomputer an der Universität Kiel und am Rechenzentrum in Stuttgart benötigten dafür sechs Monate. Das Modell berechnete für fast 40 Millionen Punkte jeweils die Wasserbewegungen. Dieses fein-



Vom Agulhasstrom im Indischen Ozean schnüren sich an der Südspitze Afrikas Wirbel ab, die in den Atlantik wandern. In dieser farbkodierten Momentaufnahme einer Computersimulation nimmt die Strömungsgeschwindigkeit von blau über grün und gelb nach rot zu.

maschige Rechengitter für das Seegebiet vor Südafrika war in ein gröberes eingebettet, das die globalen Strömungen modellierte.

Als Motor des Golfstroms gilt erkaltes, salzreiches Wasser, das in der Nordpolarregion absinkt und dabei eine so genannte thermohaline Zirkulation im Atlantik antreibt. Diese könnte Klimamodellen zufolge im Zuge der globalen Erwärmung erlahmen. Indiz dafür wäre eine Abschwächung des Golfstroms, nach der momentan gesucht wird. Laut den neuen Erkenntnissen könnten Schwankungen durch die Strömungsverhältnisse im Südatlantik den Effekt allerdings überlagern und ihn so kaschieren oder vortäuschen.

Nature, Bd. 456, S. 489

QUANTENPHYSIK

Teilchenmassen exakt berechnet

■ Fast die gesamte Masse der sichtbaren Welt liegt in den Atomkernen, die aus Neutronen und Protonen bestehen. Diese Nukleonen wiederum setzen sich aus jeweils drei Quarks zusammen, welche über Gluonen aneinander gebunden sind. Im Prinzip sollte es also möglich sein, aus der Theorie der Quarks und Gluonen, der Quantenchromodynamik (QCD), die Massen aller Grundbausteine der Materie abzuleiten. Doch das entpuppte sich als Problem, das mehr als 20 Jahre lang nur in grober Näherung lösbar war.

Erst jetzt gelang es Forschern um Stephan Dürr vom Forschungszentrum Jülich, die Massen der Nukleonen sehr präzise zu berechnen. Ein grundlegendes Problem ist, dass sich die Gleichungen der QCD nur bei extrem hohen Energien, wenn Quarks und Gluonen als Plasma vorliegen, leicht handhaben lassen. Um auch für normale Materie bei geringen Energien zu

Ergebnissen zu gelangen, stellen Physiker die eigentlich kontinuierliche Raumzeit als Gitter dar und lassen dessen Abstände schließlich gegen null gehen. Dieses Vorgehen erfordert einen gewaltigen Rechenaufwand.

Die Forscher um Dürr konnten mit einer Hand voll Verbesserungen an den gängigen Computerverfahren deren Effizienz erheblich steigern und so auch virtuelle Quark-Antiquark-Paare berücksichtigen. Diese entstehen kurzzeitig im Nukleon und tragen zur Masse der Protonen und Neutronen bei, wurden bisher wegen des hohen Rechenaufwands aber vernachlässigt.

Dürr und seine Kollegen erhielten für die Massen von Proton und Neutron nun Werte, die nur noch vier Prozent von den experimentell bestimmten abweichen. Zuvor hatte die Genauigkeit solcher Rechnungen bei allenfalls zehn Prozent gelegen.

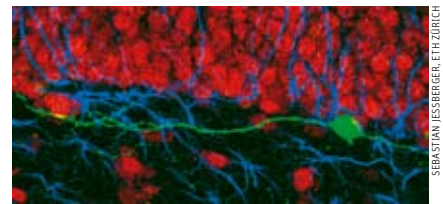
Science, Bd. 322, S. 1224

HIRNFORSCHUNG

Fehlsteuerung neuronaler Stammzellen

■ Ein Leben lang verbleiben neuronale Stammzellen als eine Art Reserve im Gehirn. Aus ihnen können sich bei Bedarf in begrenztem Maß neue Nervenzellen bilden. Wie dieser Vorgang reguliert wird und auf welche Weise die frischen Neurone den richtigen Platz im Gehirn finden sowie die korrekten Verknüpfungen bilden, ist allerdings noch weitgehend unbekannt.

Ein kleiner Erkenntnisgewinn gelang jetzt Sebastian Jessberger vom Institut für Zellbiologie der ETH Zürich zusammen mit Kollegen. Mittels Retroviren schalteten die Forscher in neuronalen Stammzellen von Mäusen ein Protein aus, von dem man wusste, dass es bei der Entwicklung des Nervensystems im Embryo eine Rolle spielt: die cyclinabhängige Kinase 5 (Cdk5). Wie sich zeigte, bildeten die derart behandelten Stammzellen dendritische Fortsätze, die in völlig falsche Richtungen wuchsen.



Aus Stammzellen ohne Cdk5 entstehende Neurone (grün) bilden Fortsätze, die in falsche Richtungen wachsen, aber trotzdem dauerhafte Kontakte zu Neuronen (rot) und Gliazellen (blau) herstellen.

Normalerweise hätte man erwartet, dass diese fehlgeleiteten Dendriten keine Partner finden, zu denen sie Kontakt aufnehmen können, und deshalb rasch wieder abgebaut werden. Tatsächlich bildeten sie jedoch dauerhafte Verbindungen – so genannte Synapsen – zu falschen Nervenzellen aus.

Dieses Ergebnis zeigt, dass das Einführen von Stammzellen zur Behandlung neuronaler Erkrankungen keineswegs unproblematisch ist, solange man nicht gewährleisten kann, dass sich daraus korrekt verknüpfte Neurone entwickeln. Indem falsche Verbindungen Chaos im Gehirn anrichten, verschlimmern sie die Erkrankung womöglich noch.

PLoS Biology, Bd. 6, S. e272

Mitarbeit: Sandra Czaja und Vera Spillner

Urschildkröte mit halbem Panzer

Im Südwesten Chinas haben Forscher die ältesten fossilen Schildkröten entdeckt. Die Tiere lebten gegen Ende der Trias vor rund 220 Millionen Jahren. Der neue Fund löst das Rätsel, wie die Schildkröten zu ihrem Panzer kamen. Dieser ist bei den ältesten bisher bekannten Vertretern, die vor knapp 210 Millionen Jahren in Deutschland vorkamen, bereits komplett ausgebildet. Die neuen Fossilien haben dagegen nur das voll entwickelte Plastron auf der Bauchseite (rechts: Fossil; unten: Rekonstruktion). Auf dem Rücken befinden sich lediglich die Wirbelsäulenschilde und verbreiterte Rippen.

Nach einer populären Theorie sollen sich die Panzer einst durch Verschmelzung von verknöcherten Hautplatten gebildet haben. Solche Osteodermen fehlen in dem Fossil jedoch. Offenbar entstand der Panzer demnach durch Verbreiterung von Wirbelsäule, Brustbein und Rippen. Dass sich erst der Bauchpanzer entwickelte, deutet zudem auf einen marinen Ursprung der Tiere hin.



MARLENE DONNELLY / FIELD MUSEUM



INSTITUT FÜR VERTEBRATENPALÄONTOLOGIE UND PALÄANTHROPOLOGIE, PEKING

Gammablitze in neuem Licht

Durch einen Zufall konnte erstmals ein Gammastrahlenausbruch von Beginn an auch im optischen Spektralbereich beobachtet werden. Die Messungen lieferten neue Erkenntnisse über den energiereichsten Vorgang im Kosmos.

Von Jan Hattenbach

Gammastrahlenausbrüche sind die energiereichsten Ereignisse, die wir im Universum beobachten. Sie dauern meist weniger als eine Minute – doch innerhalb dieser kurzen Zeitspanne setzen sie mehr Energie frei als die Sonne in Milliarden Jahren. Nach ihrer Entdeckung vor rund vier Jahrzehnten waren die *Gamma Ray Bursts* (GRBs), wie sie auf Englisch heißen, deshalb lange ein großes Rätsel. Inzwischen verfügen die Astronomen jedoch über ausgereifte Erklärungsmodelle und glauben, den Ursprung des Phänomens weitgehend verstanden zu haben.

Demnach erscheinen die Blitze deshalb so hell, weil das Objekt, von dem sie jeweils stammen, seine Strahlung nicht gleichmäßig in alle Richtungen, sondern wie ein Leuchtturm gebündelt aussendet.

Ihre Quelle dürfte in den meisten Fällen eine Supernova sein. Dabei explodiert ein massereicher Stern, während sein Inneres zu einem Schwarzen Loch kollabiert. Die umgebende stellare Materie, die in einer Scheibe um das Schwerkraftzentrum rotiert, wird in das Schwarze Loch gezogen und dabei auf extreme Temperaturen erhitzt. Durch einen komplizierten Prozess, bei dem starke Magnetfelder eine entscheidende Rolle spielen, entsteht ein eng gebündelter Teilchenstrahl, der zu beiden Seiten entlang der Rotationsachse herausgeschleudert wird.

Die Materie in diesem so genannten Jet erreicht fast Lichtgeschwindigkeit. Die geladenen Teilchen werden dabei vom Magnetfeld des ehemaligen Sterns auf spiralförmige Flugbahnen gezwungen. Dadurch senden sie längs der Jetachse intensive elektromagnetische Strahlung aus. Für kurze Zeit leuchtet diese kosmische Fackel stärker als jedes andere Objekt im Weltall.

Gammastrahlen können die Erdatmosphäre nicht durchdringen, deshalb wurden die GRBs erst vor vier Jahrzehnten mit Hilfe von Satelliten entdeckt. Beobachtungen seither ergaben, dass täglich zwei bis drei Gammablitze auftreten. Weil sie unvorhersehbar an zufälligen Orten erscheinen, war die Registrierung des gleichzeitig im sichtbaren Spektralbereich ausgesandten Lichts bis vor wenigen Jahren allerdings reine Glückssache. Allenfalls das Nachleuchten, das Tage bis Wochen anhält, ließ sich mit optischen Teleskopen verfolgen.

Mit dem Start des Satelliten Swift im Jahr 2004 verbesserte sich die Situation deutlich. Dessen Burst Alert Telescope (BAT) registriert die Gammastrahlung der Ausbrüche und liefert sekundenschnell Alarmmeldungen an automatische Teleskope auf der Erde, die sich sofort auf die betreffende Himmelsregion ausrichten. Auch das beansprucht allerdings eine gewisse Zeit, weshalb in der Regel immer noch einige Minuten ver-

gehen, bis die Beobachtung im sichtbaren Bereich beginnt.

Am 19. März 2008 ereignete sich jedoch ein Glücksfall: Swift entdeckte kurz hintereinander gleich zwei Ausbrüche, die zufällig nur wenige Grad voneinander entfernt lagen. Während die Beobachtung des ersten bereits in vollem Gange war, blitzte im Gesichtsfeld der Teleskope der zweite auf: GRB 080319B. So hatten das robotische Rapid Eye Mount Telescope auf La Silla in Chile und das polnische Himmelsüberwachungsteleskop »Pi of the Sky« auf dem benachbarten Las-Campanas-Observatorium das Ereignis von Beginn an im Blick.

Mehr sichtbares Licht als Gammastrahlung

Wie sich zeigte, schnellte parallel zur Gammaintensität auch die optische Helligkeit rasant in die Höhe. Für knapp 50 Sekunden wäre GRB 080319B von einem dunklen Standort auf der Erde aus sogar mit bloßem Auge sichtbar gewesen. Er war damit kurzzeitig das fernste Objekt, das ein Mensch ohne Hilfsmittel wahrnehmen konnte: Sein Abstand betrug etwa 7,5 Milliarden Lichtjahre – mehr als halb so viel wie der Radius des beobachtbaren Universums.

Dank der Alarmmeldung von Swift nahmen einige Minuten später zusätzliche Teleskope weltweit die Beobachtung auf. Durch einen weiteren glücklichen Zufall befanden sich die größten Spiegel in Chile und auf Hawaii gerade auf der Nachtseite der Erde. So konnte etwa das Very Large Telescope der Europäischen Südsternwarte auf dem Paranal in Chile schon zehn Minuten nach Beginn des Ausbruchs mit den Messungen beginnen.

In den folgenden vier Wochen erstellten Astronomen mit einer Vielzahl von Instrumenten das bislang detaillierteste Profil eines Gammastrahlenausbruchs und seines Nachleuchtens. Das registrierte Strahlungsspektrum umfasst



NASA, GSFC, STEFAN IMMLER / SWIFT

Vom Satelliten Swift stammt dieses Falschfarbenbild des Gammastrahlenausbruchs GRB 080319B. Es ist aus Aufnahmen des Ultraviolett-Optischen Teleskops (UTOP) und des Röntgen-Teleskops (XTS) zusammengesetzt.



mehr als zehn Größenordnungen in der Wellenlänge – vom Gamma- bis in den Radiobereich – bei hoher Zeitauflösung.

Kürzlich publizierten Judith Racusin von der Pennsylvania State University in University Park und ihre Mitarbeiter nun die Ergebnisse ihrer Untersuchungen. Sie bestätigen das gängige Modell zur Erklärung der GRBs in den Grundzügen, modifizieren und verfeinern es aber in einigen Punkten.

Die Astronomen fanden heraus, dass sowohl die Gammastrahlung als auch das sichtbare Licht während der ersten 50 Sekunden aus dem gleichen sehr kleinen Raumbereich in unmittelbarer Nähe des mutmaßlichen Schwarzen Lochs stammt. Den Beweis dafür liefert zum einen der parallele Intensitätsverlauf der beiden Strahlungsarten und zum anderen der sehr schnelle Anstieg und Abfall der Helligkeit. In Einklang mit der gängigen Vorstellung hing der Ausbruch also mit einer Supernova zusammen. Diese wurde wohl nur deshalb nicht beobachtet, weil der auf die Erde gerichtete Lichtkegel des GRB sie überstrahlte.

Völlig überraschend und im Widerspruch zum bisherigen Modell beobachteten die Astronomen jedoch, dass das sichtbare Licht viel intensiver war als die Gammastrahlung. Diese kann deshalb nicht direkt durch Wechselwirkung der relativistischen Elektronen mit dem Magnetfeld – also über einen Synchrotronmechanismus – entstanden sein. Racusin

und ihre Mitarbeiter postulieren folglich einen mehrstufigen Prozess.

Die zunächst gebildete Synchrotronstrahlung ist demnach ungewöhnlich langwellig und fällt in den sichtbaren Bereich. Diese niederenergetischen Photonen werden im dichten Feuerball des Jets teilweise nachträglich von den Elektronen angestoßen und erst durch die dabei zugeführte Energie in Röntgen- und Gammaquanten transformiert. Mit einem solchen »Synchrotron-Selbst-Compton-Prozess« lässt sich das beobachtete Strahlungsspektrum gut erklären.

Ein enger und ein weiter Kegel

Racusin und ihre Kollegen verweisen auch auf eine Möglichkeit, diesen Mechanismus unabhängig zu testen. Durch wiederholte Elektron-Photon-Stöße müsste nämlich noch energiereichere Strahlung zwischen 10 und 100 Gigaelektronvolt entstehen. Diese Komponente war bislang nicht beobachtbar. Sie sollte sich aber, falls sie nicht zu stark durch die dichte optische Synchrotronstrahlung abgeschwächt wird, mit Hilfe des unlängst gestarteten Weltraumteleskops Fermi bei künftigen Ausbrüchen nachweisen lassen.

Schließlich enthüllte die genaue Analyse des Nachleuchtens bislang unbekannte Details in der Struktur des relativistischen Jets. Dieses Leuchten entsteht Minuten bis Wochen nach der Explosion, weil die Teilchen aus dem Jet durch die vom Vorgängerstern abgestoßenen

Ursache des Gammastrahlenausbruchs war eine Supernovaexplosion, bei der geladene Partikel fast mit Lichtgeschwindigkeit in entgegengesetzte Richtungen ausgestoßen wurden. Die genaue Analyse ergab, dass die resultierenden Teilchenstrahlen oder »Jets«, wie auf dieser Grafik zu sehen, aus einem schmalen inneren und einem weiten äußeren Kegel bestanden.

Gashüllen abgebremst werden. Unerwarteterweise nahm seine Intensität bei GRB 080319B ungleichmäßig ab. Daraus schließen die Wissenschaftler auf eine komplexe Struktur des relativistischen Strahls. Er bestand demnach aus zwei Kegeln. Der breitere, äußere hatte einen Öffnungswinkel von acht Grad. Der innere Jet war mit 0,4 Grad dagegen wesentlich stärker gebündelt und zudem erheblich energiereicher.

Das hat eine wichtige Konsequenz. Wenn sich der Löwenanteil der Explosionsenergie auf einen derart schmalen Strahl konzentrierte, war die gesamte freigesetzte Energie deutlich geringer, als die enorme Helligkeit des *Bursts* zunächst erwarten ließ, und entsprach nur dem Durchschnittswert für GRBs. Womöglich ist die nun beobachtete innere Struktur des Jets eine typische Eigenschaft aller Gammastrahlenausbrüche. Dann wäre nur einer unter tausend exakt so ausgerichtet, dass der energiereiche zentrale Kegel die Erde trifft. Im Grunde unterscheidet sich der Rekordausbruch GRB 080319B daher möglicherweise nicht von anderen, weniger lichtstarken *Bursts*. Dafür spricht auch der Verlauf seiner Lichtkurve.

Bei einer nur geringfügig anderen Ausrichtung des Jets wäre GRB 080319B also nicht weiter aufgefallen. Was wie eine Serie glücklicher Zufälle aussieht, ist in Wahrheit aber der Lohn für langes, geduldiges Warten – und das Resultat des perfekten Zusammenspiels zwischen Satelliten und erdgebundenen Teleskopen. Es dürfte nur eine Frage der Zeit sein, bis Swift wieder einen ultrahellen Gammastrahlenausbruch registriert. Dann bietet sich die nächste Gelegenheit, die Schlussfolgerungen der Astronomen zu überprüfen und unser Wissen über die energiereichsten Prozesse im Kosmos zu vertiefen.

Jan Hattenbach ist Physiker und freier Wissenschaftsjournalist in Aachen.

Bakterielle Vereinsmeierei

Angeblich primitive Einzeller können wie höhere Organismen auch in Gruppen zusammenleben, miteinander kommunizieren und einander sogar bis zur Selbstaufopferung unterstützen. Neue Untersuchungen erhellen die molekularen Hintergründe.

Von Michael Groß

Mikroben werden oft als primitive Einzeller geschmäht. Sie können jedoch im Team durchaus komplizierte Aufgaben erfüllen – etwa Infektionsherde etablieren oder in den Lichtorganen gewisser Fische hell aufleuchten. Dabei hängt der Erfolg davon ab, ob eine hinreichende Zahl von Artgenossen mitmacht. Das erfordert eine Art der Kommunikation, die man als *Quorum Sensing* bezeichnet. Sie dient dazu, die aktuelle Bevölkerungsdichte der eigenen Art zu messen (Spektrum der Wissenschaft 1/2003, S. 14). Jetzt sind weitere Besonderheiten der bakteriellen Geselligkeit ans Licht gekommen, wobei die Kooperation zwischen den Einzellern bis zur Selbstaufopferung gehen kann.

Grundelement jedes Zusammenlebens ist, wie jeder Deutsche weiß, der Verein. Auch Mikroben können sich zu Verbänden zusammenrotten und gegenüber anderen Gruppen von Artgenossen abgrenzen.

Schon 1946 berichteten Forscher erstmals über eine merkwürdige Schwarmbildung von Bakterien der Art *Proteus mirabilis*. Dabei halten einzelne Kolonien bei ihrer Ausbreitung auf Agarplatten deut-

lich sichtbar Abstand voneinander. Das Phänomen dient in der Klinik heute noch zur Klassifizierung dieser Mikroben.

Jahrzehnte später zeigte sich, dass die getrennten Schwärme jeweils verschiedene Proteine aus der Familie der Protocine herstellen, die für Artgenossen in anderen Kolonien tödlich wirken können. Doch mit dieser chemischen Kriegsführung allein lässt sich die Abgrenzung nicht erklären. Sie kommt nämlich auch dann zu Stande, wenn keiner der beiden Schwärme derartige Toxine herstellt.

Das Team von Peter Greenberg an der University of Washington in Seattle hat das Phänomen jetzt mit genetischen Methoden untersucht. Dabei machten die Forscher ein Sortiment von sechs Genen aus, deren Mutation, Entfernung oder Verdoppelung die Gruppenidentität der betroffenen Bakterien beeinflusst (*Science*, Bd. 321, S. 256). Diesem Sechserpack gaben sie den geradezu freudianisch anmutenden Namen *ids*, für *identification of self*; die Komponenten heißen entsprechend *idsA* bis *idsF*.

Greenbergs Team erzeugte Bakterienstämme, denen eines, mehrere oder alle dieser *ids*-Gene fehlten, und untersuchte ihr Abgrenzungsverhalten gegenüber der

Ausgangspopulation sowie anderen Mutanten. Daraus ergab sich ein kompliziertes Muster von Abhängigkeiten und Kombinationen. Zum Beispiel verträgt sich eine Bakterienkolonie völlig ohne *ids*-Gene mit vier Varianten, bei denen jeweils nur ein Bestandteil des Sechserpacks (B, C, D oder E) eliminiert ist. Der *ids*-lose Schwarm und seine vier Vereinsbrüder grenzen sich aber gegenüber Kolonien ab, die alle Gene außer A oder F enthalten.

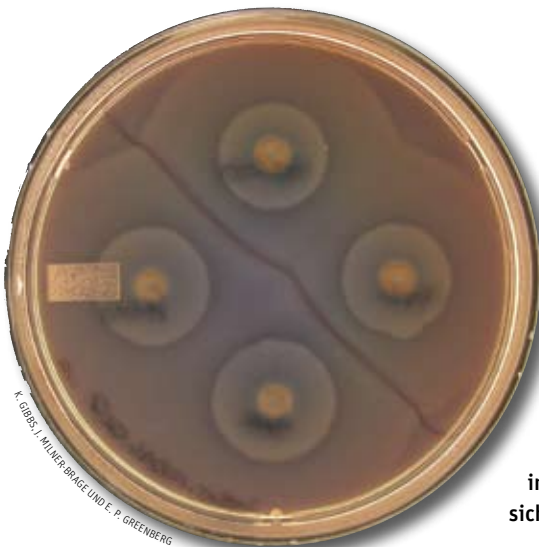
Zensus bei Mikroben

Den genauen molekularen Mechanismus der bakteriellen Vereinsbildung konnten Greenberg und Mitstreiter noch nicht aufspüren. Dazu müsste es erst gelingen, die in den *ids*-Genen verschlüsselten Proteine zu identifizieren.

Auch beim *Quorum Sensing* gibt es interessante neue Erkenntnisse. Um zu ermitteln, ob sich genügend Artgenossen in der Nähe befinden, schütten kooperationswillige Bakterien einen chemischen Botenstoff aus und prüfen, wie viele Kollegen dasselbe getan haben. Dazu messen sie die Konzentration der Substanz in der Umgebung.

Als Botenstoff dienen oftmals Verbindungen aus Homoserinlacton (HSL) und einer Fettsäure, wie sie die Zelle ohnehin als Baustein für ihre Außenmembran herstellt. Für die Kopplung der beiden Komponenten sorgt ein spezielles Enzym.

Bei dem fotosynthetischen Bakterium *Rhodospseudomonas palustris* verknüpft dieses Enzym das HSL allerdings mit Cumarsäure. Das hat die ebenfalls an der University of Washington angesiedelte Arbeitsgruppe von Caroline Harwood nun in Zusammenarbeit mit Greenberg entdeckt (*Nature*, Bd. 454, S. 595). Die Cumarsäure stellt das Bakterium allerdings nicht selbst her, sondern nimmt es aus der Umgebung auf. Es handelt sich um ein Derivat der Zimtsäure, das Bestandteil der Lignozellulose in den Zellwänden der Pflanzen ist.



Auf dieser Agarplatte wurden an vier Stellen Bakterien der Art *Proteus mirabilis* aufgebracht (dunkle ockerfarbene Flecken). Die Zellen bildeten Kolonien, die sich in konzentrischen Kreisen ausbreiteten. Jeweils zwei dieser Kolonien sind miteinander verschmolzen; zu den beiden anderen bildete sich dagegen eine deutlich sichtbare Grenze. Warum sich Populationen ein und desselben Bakteriums in einigen Fällen vermischen und in anderen voneinander abgrenzen, ließ sich nun genauer ergründen.

K. GIBBS / MITER BRAGE UND E. P. GREENBERG

Obwohl *R. palustris* allein von der Fotosynthese leben kann, labt es sich im Verein mit seinesgleichen auch gern an verrottender Vegetation. Das Cumarsäure-HSL-Signal teilt den Bakterien nun zweierlei mit:

- ▶ Es gibt Cumarsäure und damit leckeres abgestorbenes Pflanzenmaterial;
- ▶ es sind so viele Artgenossen vorhanden, welche die Säure aufgenommen und in den Botenstoff umgewandelt haben, dass der gemeinschaftliche chemische Angriff auf das zerfallende Grünzeug Erfolg verspricht.

Mit dieser Entdeckung sind Harwood und ihre Kollegen somit auf eine interessante Verbindung zwischen der Kommunikation zwischen Bakterien und der Wahrnehmung ihrer Umgebung gestoßen. Zudem erweist sich, dass das Arsenal möglicher Signalstoffe keineswegs, wie bisher gedacht, auf geradkettige Fettsäuren beschränkt ist, die in Membranen vorkommen.

Neues Licht brachten jüngste Untersuchungen schließlich auch in einen der rätselhaftesten Aspekte der Zusammenarbeit zwischen Bakterien: die Selbstauf-

opferung einzelner Individuen zum Wohl der Gemeinschaft. Dieses Phänomen wird zum Beispiel bei der Infektion mit *Salmonella typhimurium* beobachtet, einem Bakterium, das häufig Lebensmittelvergiftungen verursacht. Die erfolgreiche Etablierung eines Infektionsherds hängt davon ab, dass einige Mikroben sich auflösen und dabei einen Giftstoff freisetzen. Doch wenn alle Bakterien der infizierenden Stoßtruppe genetisch identisch sind und dieselben Umweltbedingungen vorfinden, sollten sie sich auch gleich verhalten. Wie kann ein Bakterium »entscheiden«, dass es sich im Interesse der Allgemeinheit opfert?

Selbstlos bis in den Tod

Martin Ackermann und Wolf-Dietrich Hardt sowie ihre Kollegen an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich haben in Zusammenarbeit mit Michael Doebeli von der University of British Columbia in Vancouver jetzt eine Antwort auf diese Frage gefunden. Nach ihren theoretischen Modellstudien, die sie anschließend durch experimentelle Befunde erhärten konnten, geschieht die

Aufteilung in Selbstmörder und Nutznießer rein zufällig – mit Hilfe von Ungenauigkeiten beim Ablesen und Weiterverarbeiten der Erbinformation (*Nature*, Bd. 454, S. 987).

Bei *S. typhimurium* haben alle Bakterien die Anlage zur Aufopferung. Zufällige Fehler bei der Umsetzung der selbstmörderischen genetischen Botschaft führen jedoch dazu, dass sie nur bei zehn Prozent der Population tatsächlich zum Tragen kommt. Die restlichen 90 Prozent profitieren davon, indem sie sich in dem Infektionsherd erfolgreich vermehren.

Diese drei fast gleichzeitig erschienenen Publikationen zeigen, dass sich in der Welt der scheinbar primitiven Mikroben noch ungeahnte Zusammenhänge und Mechanismen verbergen. Da der Erfolg von pathogenen Bakterien wie etwa Salmonellen für den Menschen oft fatale Konsequenzen hat, liegt es in unserem Interesse, die Geselligkeit und Kooperation der Einzeller besser zu verstehen.

Michael Groß ist promovierter Biochemiker und Wissenschaftsjournalist in Oxford (England).

Anzeige



Finden Sie mit uns
die Erfolgsformel für
Ihre Karriere



- » Größter Stellenmarkt für Lehre und Forschung im deutschsprachigen Raum
- » Personalisierter Job-Newsletter mit wöchentlich neuen Stellenangeboten
- » Informationen und Karriere-Blog für (Nachwuchs-) Wissenschaftler

Das Karriereportal der Wissenschaft von:

Forschung
& Lehre

DIE ZEIT

ALS ABONNENT HABEN SIE VIELE VORTEILE!



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



Zum Bestellen einfach nebenstehende Karte ausfüllen und abschicken oder

per Telefon: 06221 9126-743

per Fax: 06221 9126-751

per E-Mail: service@spektrum.com

oder per Internet:

www.spektrum.de/abo

ABONNIEREN ODER VERSCHENKEN

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



Goethe-Pen
Der mit der Schrift des Universalgenies bedruckte Tintenroller ist Schreibwerkzeug, Blickfang und Inspirationsquelle zugleich.

LESER WERBEN LESER

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




Einkaufskorb von Reisetel
(Lieferung ohne Inhalt)

PRODUKT DES MONATS



Sonderpreis für Abonnenten

VULKANISMUS  Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Magma spricht, bevor es bricht

Von explosiven Vulkanausbrüchen geht die größte Gefahr aus. Leider sind sie auch am schwersten vorherzusagen. Neue Hoffnungen weckt nun die Entdeckung, dass Magma unter den Bedingungen, die zur Explosion führen, wie ein Festkörper bricht und dabei seismische Signale sendet.

Von Donald Bruce Dingwell

Vulkanische Ausbruchsphasen halten oft jahre- bis jahrzehntelang an. Dabei nimmt die Eruptionstätigkeit manchmal kurzzeitig deutlich zu – und mit ihr die vulkanisch bedingte Seismizität. Das ließe sich im Prinzip dazu benutzen, Informationen über Bruchprozesse im Schlotbereich zu gewinnen. Würde dies rechtzeitig geschehen, wäre eine Vorhersage von besonders gefährlichen explosiven Ausbrüchen denkbar. Das mathematische Verfahren dafür existiert. Es

handelt sich um die Bruchvorhersage-Methode oder kurz FFM (nach englisch *material failure forecast method*). Bisher diente sie allerdings ausschließlich zur Charakterisierung von Bruchvorgängen in festen Gesteinen, weil die Ansicht vorherrschte, dass sich das Magma im Schlot aseismisch verhält.

Doch das trifft, wie sich nun zeigte, nicht generell zu. Bei vielen vulkanischen Ausbrüchen rhyolitischer Natur befindet sich das aufsteigende Magma, das in diesem Fall siliziumreich und somit äußerst zäh ist, sehr nahe an einer kritischen

Grenze, die als Spröd-Duktil-Übergang bezeichnet wird. Unter bestimmten Umständen – etwa bei hohen Deformationsraten – kann es sich dann wie ein festes Gestein verhalten.

Wie kommt es dazu? Damit ein Ausbruch stattfindet, muss das Magma schnell genug im Schlot aufsteigen. Das

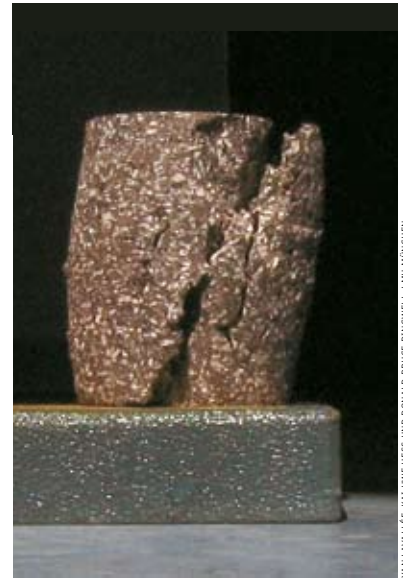
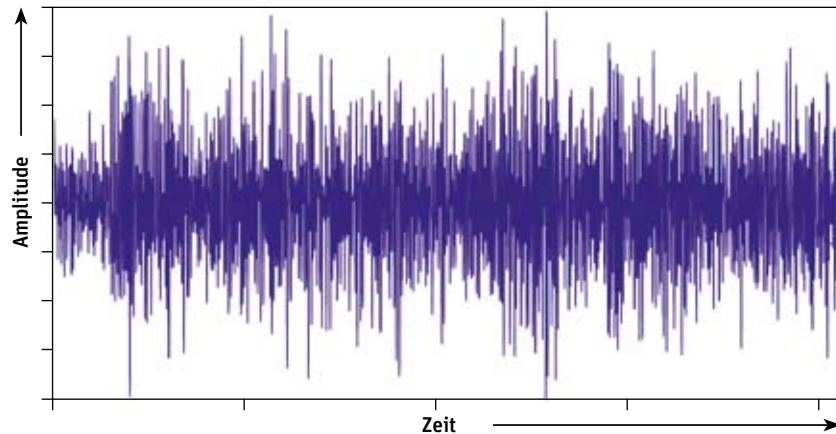
Im Krater des über 4000 Meter hohen Vulkans Colima im Westen Mexikos hat sich ein Lavadom gebildet. Dies kündigt möglicherweise einen explosiven Ausbruch an.



YAN LAVALLÉE, KARLWE HESS UND DONALD BRUCE DINGWELL, LOU MUNICHEN

MINIBEBEN IM MAGMA

In einer Gesteinsprobe aus dem Vulkan Colima ließen sich im geschmolzenen Zustand unter Bedingungen, wie sie vor einem explosiven Ausbruch auftreten, feine Mikrorisse erzeugen, die sich teils zu sichtbaren Spalten erweiterten (Bild rechts). Die Rissbildung war mit seismografisch nachweisbaren Erschütterungen verbunden (links).



VON LAVALLÉE, KAI-UWE HESS UND DONALD BRUCE DINGWELL, LMU MÜNCHEN

erfordert eine beträchtliche Spannung. Sie muss umso höher sein, je zähflüssiger die Schmelze ist. Bei sehr hoher Viskosität kann diese Spannung schließlich so groß werden, dass sie die Zugfestigkeit des Magmas übersteigt. Die Schmelze fließt dann nicht mehr, sondern bricht.

Entscheidend für diesen Vorgang ist, dass die Viskosität des Magmas stark von der chemischen Zusammensetzung abhängt. Als wichtigste Komponente fungiert dabei das Wasser. Seine Löslichkeit in der Schmelze erniedrigt sich aber, wenn der Druck im aufsteigenden Magma nachlässt. Dann perlt es in Dampfform aus und bildet Blasen. Dadurch steigt zwangsläufig die Viskosität und damit letztlich die Spannung im magmatischen System.

Verlangsamt sich in dieser Situation der Aufstieg, weil zum Beispiel der Druck aus der Tiefe nachlässt, bildet sich ein vulkanischer Dom, der langsam abkühlt und erstarrt. Bleibt aber die treibende Kraft erhalten, so dass das Magma mit unverminderter Geschwindigkeit nach oben gepresst wird, dann verhält es sich schließlich wie ein Festkörper, und sein Aufstieg mündet in einer explosiven Druckentladung, in deren Folge die Schmelze zertrümmert wird und gewaltvoll in Form kilometerhoher Aschewolken austritt.

Eine entscheidende Rolle spielen dabei auch die Zeitskalen, auf denen das Magma verformt wird. Bei langsamer

Deformation kann es noch fließen, bei schneller reagiert es dagegen festkörperartig und zerbricht.

Um die Gefährlichkeit eines Vulkans zu beurteilen, kommt es also darauf an, das Verhalten des Magmas in der Nähe des Spröd-Duktil-Übergangs sehr genau zu beobachten und zu überwachen. Am Ort des Geschehens ist das allerdings schwierig. Am genauesten gelingt die Untersuchung an Modellsystemen im Labor.

Vorhersage eines Ausbruchs

Weltweit gibt es etwa 50 Wissenschaftler, welche die Herausforderung annehmen, Vulkanausbrüche experimentell unter möglichst naturnahen Bedingungen nachzustellen. Dazu zählt auch meine Forschungsgruppe an der Universität München. Unser Ziel ist es, das Bruchverhalten von Magma zu verstehen, um eine Vorhersage von explosiven Ausbrüchen zu ermöglichen.

Kürzlich konnten wir dabei einen bedeutenden Erfolg verzeichnen: Unter Führung von Yan Lavallée und Kai-Uwe Hess gelang es meiner Gruppe, Bruchprozesse in der Schmelze unter kontrollierten Laborbedingungen auszulösen. Dabei konnten wir die Minibeben, die ein zerbrechendes Magma verursacht, akustisch registrieren.

Wie die statistische Auswertung der Aufnahmen ergab, nahm vor einem katastrophalen Bruch die Anzahl der seis-

mischen Erschütterungen deutlich zu. Damit wurde zum ersten Mal experimentell bewiesen, dass sich bewegendes Magma Erdbeben verursachen kann. Aber was noch wichtiger ist: Bei unseren künstlichen Vulkanen im Labor waren wir in der Lage, den katastrophalen, kompletten Bruch des Magmas vorherzusagen, indem wir die kleineren Bruchereignisse davor mit der FFM-Methode analysierten.

Nun gilt es, nach ähnlichen seismischen Signalen an aktiven Vulkanen zu fahnden. Schon jetzt steht fest, dass solche Signale gut zu erkennen sind. So konnten sie etwa bei der jüngsten dombildenden Phase des Mt. St. Helens im US-Bundesstaat Washington registriert werden. Spannend ist, ob auch unter natürlichen Bedingungen die FFM zur Vorhersage von explosiven Eruptionen taugt. Wenn ja, würden weltweit die Chancen, durch eine rechtzeitige Vorwarnung Menschenleben in von Vulkanen bedrohten Gebieten zu retten, erheblich steigen.

Ein alter Kumpelspruch aus dem Bergbau lautet: »Holz spricht, bevor es bricht.« Das Gleiche gilt offenbar auch für Magma.

Donald Bruce Dingwell ist Direktor des Departments Geo- und Umweltwissenschaften an der Universität München und Professor für Experimentelle Vulkanologie am dortigen Lehrstuhl für Petrologie und Mineralogie.

ELEKTRONENMIKROSKOPIE ◀ Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

Durchbruch dank Graphen

Eine nur eine Atomlage dünne Schicht aus Kohlenstoff entpuppt sich als idealer Objektträger für die Elektronenmikroskopie. Damit gelang es erstmals, einzelne Wasserstoffatome sichtbar zu machen.

Von Stefan Maier

Die Inbetriebnahme eines neuen Himmelsteleskops schafft es gewöhnlich in die Tagesmedien, sind damit doch meist spektakuläre neue Bilder entfernter Regionen des Weltraums verbunden. Auch Fortschritte beim Sichtbarmachen der kleinsten Bausteine der uns umgebenden Materie faszinieren nicht nur die Fachwelt. So finden die Meilensteine der Entwicklung neuer Generationen von Mikroskopen zu Recht ihren Niederschlag in den Geschichtsbüchern und auf der Nobelpreisträgerliste. Doch wann hat jemals die Entwicklung eines neuen Objektträgers, also der bloßen Unterlage für den Untersuchungsgegenstand, Aufmerksamkeit erregt? Selbst in den Katalogen der Mikroskophersteller stehen diese durchsichtigen Plättchen mit Sicherheit nicht im Mittelpunkt.

Dennoch können auch scheinbar kleine Verbesserungen derart unscheinbarer (und billiger!) Verbrauchsmaterialien einen großen Durchbruch ermöglichen. Den schlagenden Beweis dafür lieferte nun eine Publikation der Arbeitsgruppe von Alex Zettl an der University of California in Berkeley (*Nature*, Bd. 545, S. 319). Die Forscher präsentieren darin eine Unterlage, auf der sich erstmals auch leichte Atome wie Wasserstoff im Transmissionselektronenmikroskop (TEM) erkennen lassen. Dazu muss das Gerät nicht einmal eine ungewöhnlich hohe Auflösung haben.

Das TEM arbeitet nach dem gleichen Prinzip wie übliche Lichtmikroskope. Nur werden Elektronen- statt Lichtstrahlen durch das abzubildende Objekt geschossen. Und zum Fokussieren dienen nicht Glaslinsen, sondern elektrische und magnetische Felder. Da die Wellenlänge von Elektronen je nach deren Geschwindigkeit 1000- bis 100 000-mal kleiner ist als die von sichtbarem Licht, hat das TEM eine entsprechend höhere Auflösung. Dadurch lassen sich beispielsweise Gitterstrukturen von Kristallen

Objektträger für die Transmissionselektronenmikroskopie enthalten gitterartig angeordnete Löcher, die in dieser Falschfarbenaufnahme blau erscheinen. Wo sie grün aussehen, sind sie von einer Graphenmembran bedeckt. Diese lässt die Elektronenstrahlen ungehindert passieren und erlaubt auch die Abbildung von Objekten, die kleiner sind als der Lochdurchmesser von einem Mikrometer.

oder unter bestimmten Umständen sogar einzelne Atome abbilden – Objekte, deren Größe weit unterhalb der Auflösungsgrenze von Lichtmikroskopen liegt.

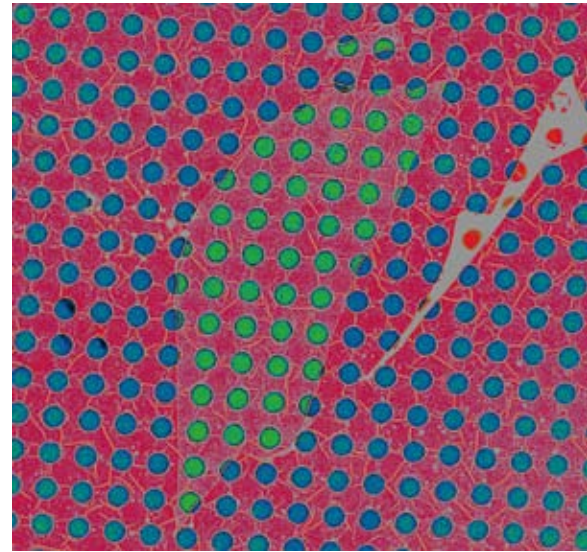
Der Kontrast entsteht in diesem Fall dadurch, dass die Elektronen beim Passieren des Untersuchungsobjekts gestreut oder absorbiert werden. Atome mit hohen Ordnungszahlen und somit dichten Elektronenhüllen schwächen den Strahl dabei stärker ab als leichte und erscheinen in den erzeugten Bildern deshalb dunkler.

Fast so gut wie das Vakuum

Natürlich müssen mindestens einige Elektronen den Untersuchungsgegenstand auch ungehindert durchdringen können. Aus diesem Grund lassen sich mit TEMs in der Regel nur Objekte mit einer Dicke unterhalb eines Mikrometers abbilden. Auch die Unterlage muss entsprechend dünn sein. Außerdem sollte der Objektträger den Elektronenstrahl wesentlich weniger beeinflussen als der Untersuchungsgegenstand selbst.

Und genau da steckt das Problem. Die Materialwissenschaftler hätten am liebsten eine Unterlage aus nichts weiter als dem Vakuum selbst. So ergeben sich in der Tat die schärfsten Bilder langgestreckter Moleküle wie etwa Kohlenstoffnanoröhren, wenn diese über Löcher in einer dünnen Folie gespannt werden und daher im Vakuum hängen.

Bei kleinen Molekülen oder gar einzelnen Atomen lässt sich dieser Trick



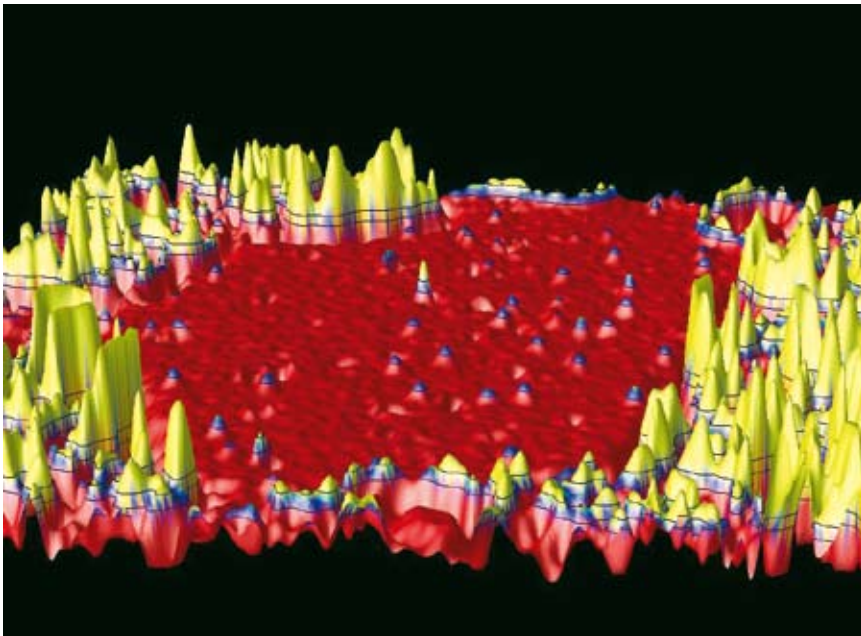
J. C. MEYER, CAGLAR O. GIRIT, MICHAEL F. CROMMIE UND ALEX ZETTL, UC BERKELEY

freilich nicht anwenden, weil die benötigten Löcher viel zu klein wären. In diesem Fall ist eine Unterlage unverzichtbar. Die aber lässt sich leider nicht aus den leichtesten Elementen wie Wasserstoff oder Helium herstellen. Infolgedessen

Anzeige

FORTIS
B-42 BLACK

Chronograph Automatik, Titan, Karbon
Offizieller Ausrüster für Luft- & Raumfahrt
www.fortis-watches.com



J. C. MEYER, CAGLAR O. GIRIT, MICHAEL F. CROMMIE UND ALEX ZETTL, UC BERKELEY

kann man in TEMs nur relativ schwere Atome abbilden. Solche von Wasser- oder auch Kohlenstoff ergeben auf allen bisher eingesetzten Unterlagen einen so schwachen Kontrast, dass sie selbst in den besten Elektronenmikroskopen verborgen bleiben.

Zettl und seine Kollegen haben nun einen Objektträger aus dem Hut gezaubert, den man als Stringtanga der Elektronenmikroskopie bezeichnen könnte; denn wie das minimalistische Badeutensil unterscheidet er sich nur unwesentlich vom Nichts. Es handelt sich um eine Folie aus Kohlenstoff, die nicht mehr als eine Atomlage dick ist. Die Fachwelt kennt sie unter dem Namen Graphen – mit Betonung auf der zweiten Silbe. Die Atome sind darin wie im Hasendraht in einem sechseckigen Wabenmuster angeordnet.

Da die größte Periode des Graphengitters mit 0,21 Nanometern die Auflösungsgrenze des von den Forschern verwendeten Mikroskops unterschreitet, sollten Objektträger aus diesem Material im wahrsten Sinn des Wortes unsichtbar sein. Störstellen wie etwa einzelne angelagerte Atome oder Defekte führen dagegen zu einer lokalen Verzerrung des Gitters, an der die Elektronen gestreut werden, so dass ein schwarzer Punkt entsteht. Somit sollten sich selbst Fremdkörper weit unterhalb der Auflösungsgrenze des Mikroskops abbilden lassen – darunter auch Wasserstoffatome.

Im Nachhinein ist, wie so oft, die Lösung offensichtlich. Die Vorteile von

Graphen als Unterlage für die Transmissionselektronenmikroskopie liegen auf der Hand: Es ist nicht nur extrem dünn und praktisch eben, sondern lässt sich auch leicht herstellen, hat über große Flächen hinweg eine perfekte Kristallstruktur und leitet trotz seiner geringen Dicke elektrischen Strom hervorragend. Da es dem hindurchtretenden Elektronenstrahl kaum Widerstand entgegensetzt, erleidet es fast keine Strahlenschäden, so dass sich einzelne Schichten über mehrere Stunden hinweg benutzen lassen. Außerdem lagern sich Atome oder kleinere Molekülverbände fest an die Wabenstruktur an. Dadurch gelingen selbst bei Raumtemperatur scharfe Aufnahmen von leichten Atomen, weil diese nicht herumzappeln.

Erste Abbildung von Wasserstoff

Graphen gilt schon länger als möglicher Kandidat für die Nanoelektronik, weshalb eine Menge Erfahrungen für den Umgang damit vorliegen, auf die Zettls Gruppe zurückgreifen konnte. Dazu zählt eine verblüffend einfache Herstellungsmethode aus Graphit, dem Hauptbestandteil von Bleistiftminen. Darin sind viele Graphenschichten übereinandergestapelt. Sie lassen sich mit einem Klebeband – etwa Tesafilm –, das mit genau der richtigen Geschwindigkeit darüber hinweggezogen wird, leicht einzeln abstreifen. Mit etwas Übung schafften es die Forscher, derartige Schichten über gewöhnliche TEM-Gitter zu spannen (Bild auf S. 21).

In dieser elektronenmikroskopischen Aufnahme, die dreidimensional und in Falschfarben wiedergegeben ist, erscheinen Wasserstoffatome, die bisher nicht abbildbar waren, als Kegel mit blauen Spitzen. Gelbe Berge repräsentieren Kohlenstoff.

Die Graphenfolien entpuppten sich im Elektronenmikroskop dann in der Tat über weite Flächen hinweg als praktisch unsichtbar. Angelagerte Fremdatome oder Fehlstellen in der Wabenstruktur machten sich dagegen, wie erwartet, als schwarze Punkte bemerkbar. Erstere hafteten dabei so stabil an der Graphenschicht, dass die Forscher über mehrere Belichtungen mitteln und so den Kontrast erhöhen konnten – was schärfere Bilder lieferte und die Identifikation der abgebildeten Objekte erleichterte.

Einem schwarzen Punkt auf einem elektronenmikroskopischen Bild lässt sich ja nicht ansehen, welches Fremdatom dahintersteckt. Es sicher zu bestimmen, erwies sich in der Tat als knifflig. Die Wissenschaftler mussten dazu auf Computersimulationen des Durchgangs schneller Elektronen durch eine Graphenschicht zurückgreifen. Der Kontrast angelagerter Atome hängt nämlich von der Ordnungszahl des Fremdatoms sowie seinem Einfluss auf die Wabenstruktur ab. Zur Genugtuung der Forscher ergaben die Computersimulationen, dass manche dunklen Punkte tatsächlich Wasserstoffatome zeigten. Das bedeutete einen neuen Meilenstein in der Elektronenmikroskopie, die Erfüllung eines jahrzehntelangen Traums.

Die Stabilität der Graphenschicht ermöglichte es zudem, Vorgänge auf der Oberfläche zu verfolgen, sie also gleichsam zu filmen. So konnten die Forscher die Wanderung größerer angelagerter Kohlenstoffketten beobachten. Im Prinzip eröffnen die neuen Objektträger damit auch die Möglichkeit, chemische Reaktionen in Echtzeit zu beobachten – eine Aussicht, bei der viele Chemiker glänzende Augen bekommen dürften. Und das Beste daran ist: Die vielen Mikroskope in den Forschungslabors aller Welt müssen dazu nicht einmal umgerüstet werden. Den Quantensprung in Sachen Abbildungsqualität gibt es also quasi zum Nulltarif.

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

Springers Einwürfe

Wanted: Theorie für wilde Märkte

Wann kommt die erste Testanlage für Börsencrashes?

Muss es für eine Disziplin, die sich stolz Wissenschaft nennt, nicht blamabel sein, wenn sie so versagt wie die Ökonomie in der aktuellen Wirtschaftskrise? Zwar fand ich, gut versteckt zwischen euphorischen Konjunkturmeldungen, schon vor gut zehn Jahren zaghafte Überlegungen, ob die US-Wirtschaft ihren abnorm langen Höhenflug wohl mit einer harten oder weichen Landung beenden würde – aber dass der Weltmarkt gleich so katastrophal zusammenkracht, hat mir niemand prophezeit. Zu all dem materiellen Elend, das die große Krise mit sich bringt, müsste sich eigentlich Scham über den intellektuellen Bankrott gesellen.

Die noch immer herrschende Lehre kennt nur zahme Märkte, auf denen sich umfassend informierte Akteure begehen, um dort nicht nur zum eigenen Wohl, sondern zum allgemeinen Wohl Angebot und Nachfrage friedlich zu versöhnen. Geringfügige Abweichungen vom Gleichgewicht passieren danach viel öfter als heftige Ausschläge; das Häufungsmuster folgt der gaußschen Normalverteilung, einer glatten Glockenkurve. Das einzig Wissenschaftliche an diesem Märchen für schläfrige Kinder ist wohl seine Falsifizierbarkeit, denn die hat die Krise nun überzeugend demonstriert.

Immerhin kam schon vor Jahren von dem Mathematiker Benoît Mandelbrot der Vorschlag, seine Theorie der Fraktale auf das Börsengeschehen anzuwenden (Spektrum der Wissenschaft 5/1999, S. 74). Fraktale sind selbstähnlich; eine entsprechende Börsenfieberkurve zeigt darum in allen Größenordnungen ähnlich starke Schwankungen. Dieses Modell scheint das tatsächliche Börsengeschehen besser abzubilden, während die herrschende Lehre mit ihrer Gaußkurve große Ausschläge systematisch unterschätzt.

Als Menetekel erweist sich nachträglich ein Beinahe-Crash des globalen Finanzsystems, ausgelöst 1998 durch einen Hedgefonds, der sich bei seinen Spekulationen – unter Beteiligung der Wirtschaftsnobelpreisträger von 1997

Scholes und Merton – blind auf die gaußsche Normalverteilung verließ. Alan Greenspan, damaliger Chef der US-Notenbank, konnte einen globalen Finanzcrash nur verhindern, indem er ein Bankenkonsortium organisierte, das 3,75 Milliarden Dollar vorschoss – verglichen mit den Beträgen für heutige Rettungsaktionen geradezu Peanuts.

Die viel monströseren Ausmaße der momentanen Krise sind auch mit Fraktalen nicht mehr erklärbar. Vielleicht fällt den zahlreichen theoretischen Physikern, die seit gut 20 Jahren, statt Teilchenphysik zu treiben, gut dotierte Jobs an der Wall Street anstreben, endlich etwas Neues ein. Sie haben doch gelernt, simplen Modellen nur so lange zu vertrauen, wie sie der Realität entsprechen. Die fast religiöse Inbrunst, mit der die Mainstream-Ökonomie am Prinzip des Gleichgewichts festhält, müsste einem Physiker eigentlich albern vorkommen. Kein Automodell ist bloß für Fahrten auf leeren Betonpisten konzipiert, jedes wird brutalstmöglichen Crashtests ausgesetzt.

»Freie Märkte sind wilde Märkte«, betont Jean-Philippe Bouchard, Physikprofessor an der Pariser École Polytechnique und Manager bei einer Investmentfirma. »Die angebliche Allwissenheit und perfekte Effizienz eines freien Markts stammt aus ökonomischen Arbeiten der 1950er und 1960er Jahre, die im Nachhinein mehr wie Propaganda gegen den Kommunismus anmuten als wie plausible Wissenschaft.«

Bouchards starke Worte stehen unter der Überschrift »Die Ökonomie braucht eine wissenschaftliche Revolution« (*Nature*, Bd. 455, S. 1118). Bravo! Jetzt bin ich gespannt, was daraus folgt – hoffentlich nicht das große Vergessen, sobald die Konjunktur wieder anspringt.



Michael Springer



wichtige onlineadressen

- ▶ **Brainlogs**
Blogs für die Welt im Kopf
www.brainlogs.de
- ▶ **Ingwer und Meerrettich**
zur wirkungsvollen Entzündungshemmung
bzw. Antibiose bei Pferd und Mensch
www.freenet-homepage.de/Brosig-Pferde-Ingwer/
- ▶ **Kernmechanik – von Kernspin bis Kosmologie, von Dunkler Materie und Energie**
www.kernmechanik.de
- ▶ **KOSMOpod**
Astronomie zum Hören
www.kosmopod.de
- ▶ **WISSENSlogs**
Science unplugged
www.wissenslogs.de

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

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

Ist das Universum ein **TORUS ?**



KONRAD POLYMER, FREIE UNIVERSITÄT BERLIN;
TEXTUR: NASA/ESA / K. SHARON & E. OFEK

Die präzise Vermessung der kosmischen Hintergrundstrahlung eröffnet Forschern neue Wege, um zwischen endlichen und unendlichen Modellen des Kosmos zu unterscheiden. Wie Frank Steiner und sein Team von der Universität Ulm zeigen konnten, ist derzeit auch ein endliches Universum von der Form eines Torus mit den Beobachtungsdaten verträglich.

Von Georg Wolschin

Vielleicht nähern wir uns allmählich der Antwort auf die uralte Frage, ob das Universum endlich oder unendlich groß ist. Und wenn der Ulmer Forscher Frank Steiner Recht hat, dann könnte es eine Lösung geben, an die bisher nur wenige gedacht haben.

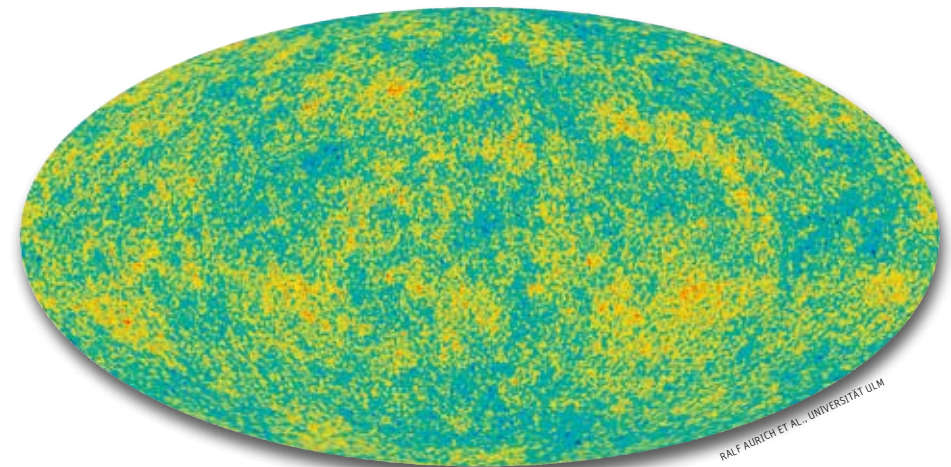
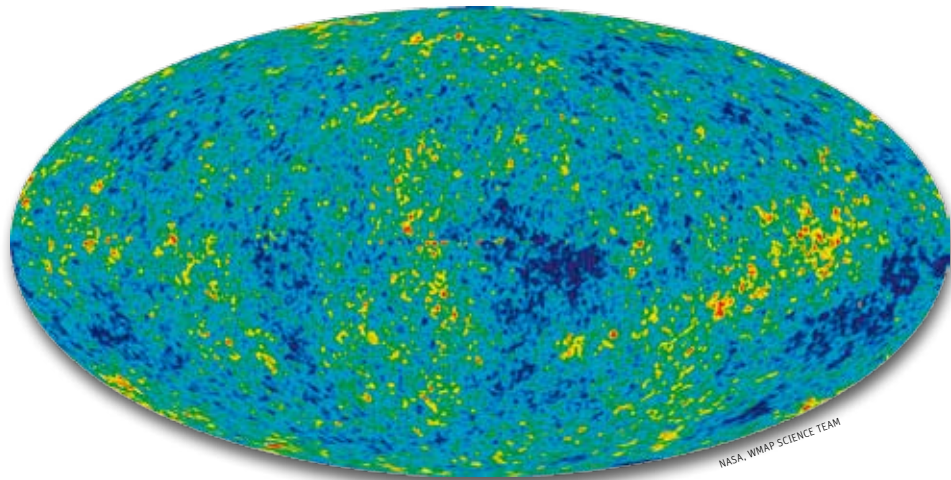
Kosmologische Räume werden gewöhnlich nach ihrer so genannten Krümmung unterschieden: Sind sie positiv gekrümmt wie etwa die zweidimensionale Oberfläche einer Kugel, haben sie stets ein endliches Volumen. Räume mit negativer Krümmung – wie etwa eine zweidimensionale Sattelfläche – heißen »hyperbolisch« und können endlich oder unendlich sein. Entsprechendes gilt für flache Gebilde wie etwa die euklidische Ebene. Was diese drei Raumtypen unterscheidet, ist ihre Krümmung: positiv für die Kugeloberfläche, negativ für den hyperbolischen Raum, null für den euklidischen Raum.

Da die globale Geometrie eines Raums (fachlich: seine Topologie, die Lehre von den Orten) durch seine Krümmung nicht vollständig festgelegt wird, ist diese Dreitypenlehre jedoch nur die halbe Story. So kann auch ein flacher Raum endlich sein. Ein Beispiel für einen flachen, aber endlichen Raum bildet die Oberfläche eines Torus. Ringe beziehungsweise Donuts sind Torusbeispiele in zwei Dimensionen, fachlich ein »Zwei-Torus«. Dass sie geometrisch flache Objekte sind, lässt sich mit einem kleinen Gedankenexperiment zeigen: Schneidet man einen Piertorus einmal durch den kleinen und einmal quer durch den großen Ring, dann erhält man ein flaches, rechteckiges Stück Papier – einen flachen, endlichen Raum von zwei Dimensionen. Eine Kugeloberfläche lässt sich verzerrungsfrei nicht in eine Ebene abwickeln. Heute favorisieren die meisten Wissenschaftler ein flaches unendliches Universum. Dabei unterstellen sie jedoch, dass die

Welt die einfachste mögliche Geometrie verwirklicht.

Doch um Fragen zur globalen Geometrie des Alls wirklich beantworten zu können, müssen wir auch die Topologie kennen. Die Frage ist, ob und wie sich die globalen geometrischen Eigenschaften des Weltraums durch Beobachtungen feststellen lassen. Die Mathematik von Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie als Grundlage aller modernen Kosmologie macht über die Topologie selbst keine Aussage. Die Theorie beschreibt mittels

Die Temperaturschwankungen der kosmischen Hintergrundstrahlung hat der WMAP-Satellit in mehrjähriger Flugzeit bis 2008 gemessen (oben). Ulmer Forscher haben den Mikrowellenhintergrund simuliert – bei endlichem flachem Raum mit einer so genannten Drei-Torus-Topologie (unten).



Aus fünf Jahren WMAP-Beobachtungen erhielten die Kosmologen dieses Spektrum der Temperaturfluktuationen (oben). Große Winkelabstände entsprechen kleinen Multipolen l . Die rote Kurve ist ein Fit an die Daten im kosmischen Standardmodell mit unendlichem flachem Raum. Die WMAP-Daten sind auch mit einem endlichen Torus-Universum verträglich (unten). Die Simulation (orange, mit Standardabweichung) unterscheidet sich oberhalb von $l=20$ nicht mehr vom Standardmodell.

mathematischer Gleichungen lediglich die lokalen Eigenschaften der Raumzeit, verknüpft also an jedem gegebenen Punkt die Krümmung der Raumzeit mit der Materiedichte.

Zur Untersuchung der Topologie und damit der großräumigen Gestalt des Universums untersuchen die Kosmologen vielmehr, wie unterschiedliche Raumpunkte zueinander in Beziehung stehen. Die Antwort ist dann nicht nur für die Frage nach der Endlichkeit des Raumes von Bedeutung, sondern eröffnet auch Einblicke in die Physik jenseits der allgemeinen Relativitätstheorie. Dabei wird in der Regel die Annahme gemacht, dass Raumkrümmung und Topologie Unveränderliche sind, sich also nicht zeitlich ändern. Durch die präzise Untersuchung der kosmischen Hintergrundstrahlung mit dem WMAP-Sa-

telliten bekam die Idee eines endlichen Universums 2003 überraschenderweise neuen Auftrieb.

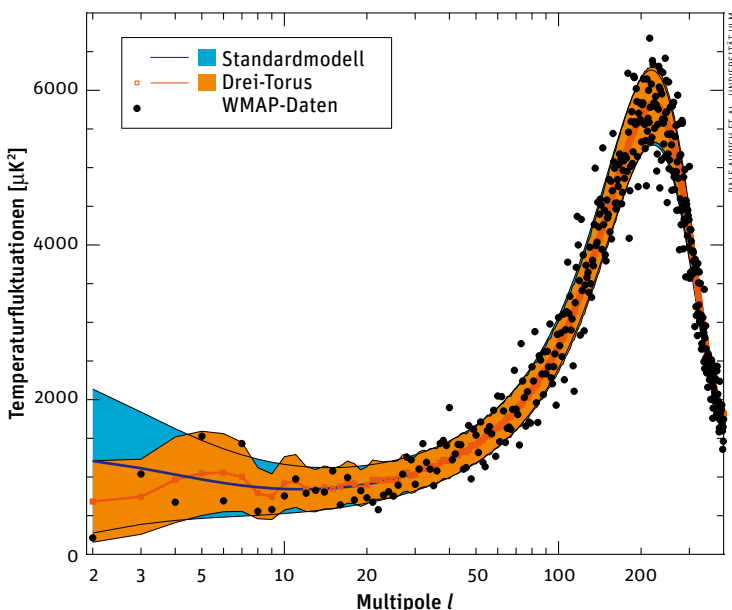
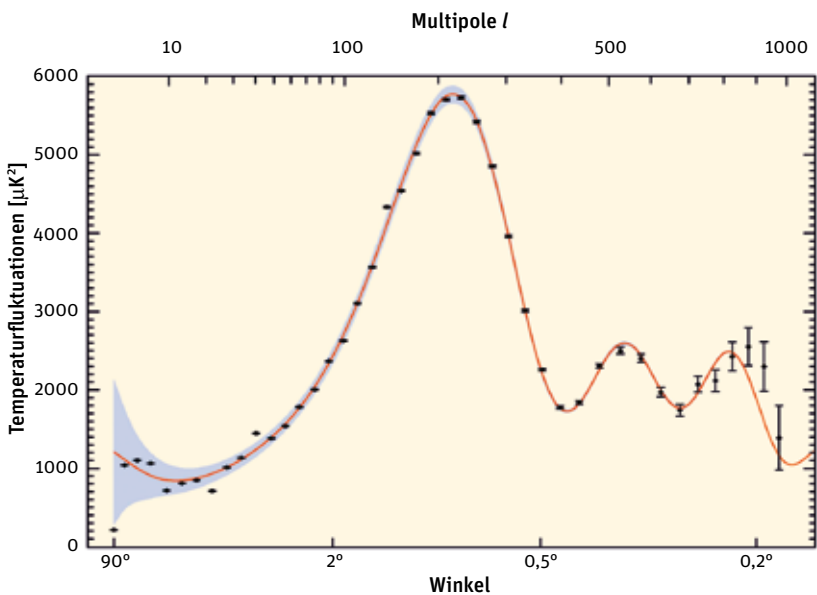
Etwa 380 000 Jahre nach dem Urknall passierten mehrere Dinge gleichzeitig. Das heiße Universum hatte sich durch die kosmische Expansion so weit abgekühlt, dass sich freie Protonen und Elektronen zu neutralen Wasserstoffatomen vereinen konnten. Strahlung und Materie waren von da an »entkoppelt«: Das Weltall wurde für die Strahlung durchsichtig, da sie nicht mehr an freien Elektronen gestreut wurde. Diese Strahlung dringt seitdem fast ungehindert zu uns. Die Astronomen empfangen sie mit ihren Teleskopen hauptsächlich als Mikrowellen.

Diese Mikrowellenstrahlung leuchtet noch heute, wenn auch stark abgekühlt wie ein Feuerball. Physikalisch hat sie im Mittel das Spektrum eines schwarzen Körpers, das sich durch eine Temperatur – 2,725 Kelvin – kennzeichnen lässt. Dennoch sind bereits mit dem WMAP-Vorgängersatelliten COBE in der Strahlung kleine und kleinste Temperaturschwankungen entdeckt worden – geringfügig heißere und kältere Flecken, verteilt über den Himmel. Sie spiegeln die Dichteschwankungen im frühen Universum wider und protokollieren damit die unregelmäßige Materie- und Energieverteilung zum Zeitpunkt der Entkopplung.

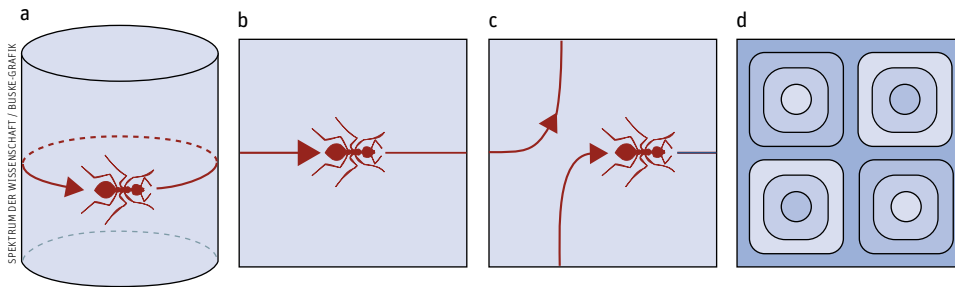
Ein flaches, unendliches Universum, das sich beschleunigt ausdehnt

Die Temperaturschwankungen in der Hintergrundstrahlung kommen unter anderem dadurch zu Stande, dass Photonen, die aus dichteren Materieregionen stammen, gegen die Gravitationsanziehung anlaufen und deshalb »kälter« im Sonnensystem ankommen als andere, die aus weniger dichten Regionen stammen. Detaillierte Modellrechnungen amerikanischer Kosmologen haben gezeigt, wie dreidimensionale Dichtefluktuationen die beobachteten zweidimensionalen Temperaturschwankungen am Mikrowellenhimmel erzeugen können. Die Astronomen rechnen die Größe und Häufigkeit dieser Flecken in so genannte Multipole l um. Diese drücken mathematisch die Winkelverteilung der Temperaturfluktuationen am Himmel aus. Je höher die Multipolzahl, desto kleinräumiger und komplexer die Winkelverteilung: Dipol ($l=1$), Quadrupol ($l=2$), Oktupol ($l=3$) und so weiter.

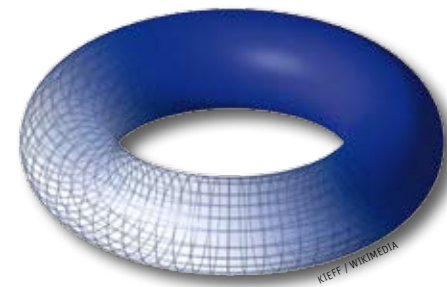
Ein unendliches Universum enthält, so ergeben es die Berechnungen, alle Wellenlängen in gleicher Stärke. Die Daten zeigten – auch in ihrer neuesten Auswertungsrunde nach



FLACHE ENDLICHE RÄUME – ZYLINDER UND TORUS



Auf der Zylinderoberfläche (a) bewegt sich ein zweidimensionales Lebewesen nach Osten und kommt schließlich wieder am Ausgangspunkt an; in (b) ist der zurückgelegte Weg am aufgeschnittenen und geglätteten Zylinder gezeigt. Schneidet man analog einen flachen Torus auf, verläuft der Weg um die geglättete Torusoberfläche wie in (c). In einem torusförmigen Universum können Wellenlängen nicht größer sein als die Seitenlänge des Quadrats (d). Bei einem Drei-Torus in drei Raumdimensionen entspricht dies der Kantenlänge eines Würfels.



Ein endliches Universum könnte die Topologie eines Drei-Torus haben, dem dreidimensionalen Analogon zum hier gezeigten Zwei-Torus, der wie ein Donut aussieht.

fünf Jahren Beobachtungszeit – aber bereits 2003, dass die kleinen Multipolzahlen schwächer ausgeprägt sind als erwartet, und bestätigten damit ältere COBE-Resultate. Abgesehen davon sind diese Daten verträglich mit einem unendlich ausgedehnten flachen Universum, dessen Raum unter dem Einfluss der »Dunklen Energie« weiter beschleunigt expandiert. Die Abstände zwischen den Galaxien wachsen im Mittel entsprechend rascher an als noch vor etwa fünf Milliarden Jahren. Tatsächlich favorisieren heute die meisten Wissenschaftler das Modell eines unendlich ausgedehnten flachen Raums.

Den möglichen Hinweisen auf ein endliches Universum – insbesondere der Unterdrückung der kleinen Multipole – sind inzwischen mehrere Wissenschaftlergruppen nachgegangen, zuletzt 2007/8 die Gruppe um Frank Steiner von der Universität Ulm. Sie hat seit 1999 verschiedene räumliche Formen des Universums untersucht, neuerdings insbesondere einen so genannten Drei-Torus, der dreidimensionalen Version des uns vertrauten zweidimensionalen Rings oder Zwei-Torus. Als Modell unseres Kosmos wäre ein Drei-Torus die einfachste nicht triviale Geometrie eines endlichen flachen Raums.

Ähnlich wie sich die von einem Instrument erzeugten Töne als Überlagerung von harmonischen Grundtönen darstellen lassen, kann man die beobachteten Temperaturfluktuationen der kosmischen Hintergrundstrahlung als Summe vieler Frequenzkomponenten modellieren. Die relative Stärke der tiefsten Frequenzen bestimmen beim Musikinstrument zusammen mit den Obertönen die Tonqualität – deshalb klingt dieselbe Note auf einer Blockflöte auch anders als auf einem Saxofon. Analog bestimmen bei der

Mikrowellenkarte des Himmels die Grundfrequenzen und ihre relative Stärke, das so genannte Winkelleistungsspektrum, Physik und Topologie des »Instruments« – in diesem Fall die des ganzen Universums. Das Fluktuationspektrum ist das grundlegende Werkzeug zum Test theoretischer Modelle.

Das erste Maximum bei Multipolen jenseits von $l=200$ entspricht Winkelabständen von etwa einem Grad. Es zeigt, dass im frühen Universum Schallwellen der entsprechenden, relativ kurzen Wellenlänge dominiert haben müssen – ähnlich wie eine Saite bestimmter Länge vor allem eine ganz bestimmte Note erzeugt. Das zweite und dritte Maximum (bei etwa bei $l=510$ und $l=800$) sind »Obertöne« oder »Harmonische« des ersten. Daraus können Kosmologen ebenfalls wichtige Informationen ableiten (siehe G. Börner »Die Dunkle Energie und ihre Feinde«, SdW 11/2008, S. 38).

Diskrepanz bei großen Winkeln

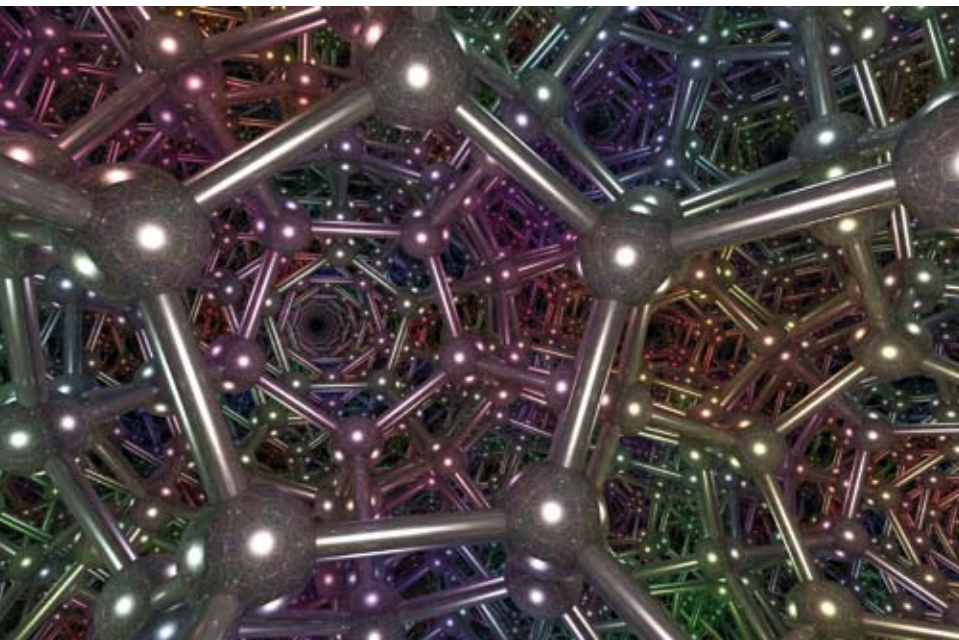
Probleme mit dem gängigen Modell des unendlichen flachen Universums gibt es bei niedrigen Multipolzahlen, was Winkelskalen von über 60 Grad entspricht. Der niedrigste Multipol nach dem Monopol ($l=0$) ist der Dipol mit dem Multipolmoment $l=1$. Dieser Winkelanteil lässt sich in der Hintergrundstrahlung nicht beobachten, weil die Bewegung unserer Galaxie im Mikrowellenhintergrund ebenfalls ein Dipolfeld erzeugt, das hundertmal stärker ist als der kosmologische Effekt der Fluktuationen. Daher subtrahieren die Kosmologen diesen Anteil.

Der erste beobachtbare Multipol ist deshalb der bereits erwähnte Quadrupol mit $l=2$, entsprechend Winkelabständen von $180/2$ Grad=90 Grad. Im Modell des unendlich

UMSTRITTENER KOSMOS

Die moderne Kosmologie begann mit Albert Einstein, aus dessen Gravitationstheorie Alexander Friedmann ein Modell des expandierenden Universums ableitete. Erste Beobachtungen von Edwin P. Hubble in den 1920er Jahren bestätigten diese Vorhersage. Die Expansion sollte sich demnach aber stets weiter verlangsamen und vielleicht sogar einmal wieder umkehren.

Heute hat sich die Lage wieder verkompliziert. Vor etwa fünf Milliarden Jahren setzte der Kosmos offenbar zu einer beschleunigten Expansion an, die noch andauert. Die Ursache für dieses erstaunliche Phänomen ist die so genannte Dunkle Energie, deren genauer physikalischer Ursprung bisher unbekannt ist.



PAUL NYLANDER (WWW.BIGANT123.COM)

Für ein endliches Universum wurde von Jean-Pierre Luminet und seiner Gruppe auch ein Dodekaeder-Raum vorgeschlagen: Mathematische Modelle eines sphärischen Universums, das durch gekrümmte Fünfecke begrenzt wird, erzeugen ebenfalls die in der kosmischen Hintergrundstrahlung beobachteten Muster. In diesem Modell ist die Raumkrümmung leicht positiv.

ausgedehnten flachen Universums lässt sich seine Stärke exakt berechnen – die WMAP-Beobachtungen zeigen aber nur etwa ein Siebtel dieses Resultats – eine deutliche Diskrepanz. Der nächste Winkelbeitrag vom Oktupoltyp ($l=3$) entspricht Winkelspannen von etwa $180/3 = 60$ Grad und passt, wie auch die Messkurve belegt, bereits weitaus besser zum theoretisch vorhergesagten Wert des Standardmodells. Die nächsthöheren Multipole mit $l=4$ bis $l=9$ weichen wieder vom Standardmodell ab. Erst die noch höheren Multipole stimmen damit wieder gut überein. Von allen alternativen theoretischen Modellen, die dagegen ein endliches Universum annehmen, wird deshalb bei kleinen Winkelabständen eine ähnlich gute Übereinstimmung gefordert.

Schon Karl Schwarzschild hatte die Idee eines Torus-Universums

Theoretiker, die kosmologische Modelle mit endlichem Raum bevorzugen, haben also in den detaillierten WMAP-Daten ihren Prüfstein: Ihre Modelle müssen den beobachteten schwachen Quadrupolanteil und die Multipole bis $l=9$ möglichst gut wiedergeben. Gleichzeitig dürfen ihre Modelle bei kleineren Winkeln nicht schlechter abschneiden als die unendliche Standardgeometrie.

Modelle endlicher Universen lösen das Problem des schwachen Quadrupolanteils, das bereits der COBE-Satellit in den 1990er Jahren entdeckt hatte, auf natürliche Weise. Denn ähnlich wie die Wellenlänge einer schwingenden Saite nicht größer sein kann als die Saite selbst, ist auch durch die endliche Ausdehnung des Raums eine Grenze für die

größtmögliche Wellenlänge vorgegeben. Die fehlenden größeren Wellenlängen unterdrücken den Quadrupol.

Die große Mehrzahl theoretisch möglicher räumlicher Topologien eines endlichen Universums lassen sich nicht mit den WMAP-Daten der Temperaturfluktuationen in Übereinstimmung bringen. Dagegen haben Wissenschaftler einige Modelle vorgeschlagen, die sehr gut zu den Daten passen. Ein Beispiel liefert die 2003 von dem französischen Kosmologen Jean-Pierre Luminet und Kollegen vorgestellte Topologie mit der Geometrie eines Dodekaeders mit gekrümmtem endlichem Raum (Bild links). Ein neueres Beispiel bietet der von Frank Steiner und seinem Team analysierte Drei-Torus mit flachem endlichem Raum.

In all diesen Fällen wäre das (endliche) Universum – dessen Volumen beschränkt ist – aber grenzenlos. Denn nirgends stößt man an ein Ende. Wie bei einer Reise auf einem Großkreis um einen Globus würde man in jeder beliebigen Richtung irgendwann wieder am Ausgangspunkt anlangen. Im Prinzip könnte man sogar seinen eigenen Hinterkopf sehen. Auch am Himmel könnten entfernte leuchtende Objekte, ähnlich wie in einer Spiegelgalerie in unterschiedlichen Richtungen mehrfach abgebildet erscheinen.

Die Idee eines Torus-Universums ist dabei keineswegs neu. Der Astrophysiker Karl Schwarzschild hat sie bereits im Jahre 1900 vorgeschlagen, der russische Theoretiker Yakov B. Zel'dovich hat sie 1973 näher untersucht, und seitdem ist sie immer wieder von Forschern aufgegriffen worden. Neu an den Ulmer Untersuchungen ist jedoch die vollständige Berechnung mit den ersten 5,5 Millionen Schwingungen und der detaillierte Vergleich mit den aktuellen kosmologischen Beobachtungen, speziell den Fluktuationen der kosmischen Hintergrundstrahlung, und die gute Übereinstimmung der Simulationen mit den WMAP-Beobachtungen.

Das Drei-Torus-Modell gilt zwar unter Experten als mathematisch relativ einfach, ist aber unserem räumlichen Vorstellungsvermögen dennoch nur schwer zugänglich. Deutlicher wird es, wenn wir wieder die Oberfläche eines zweidimensionalen Torus als Analogon zum dreidimensionalen Fall betrachten: Wie bei einem Zylinder können Wellenlängen dort nicht größer sein als die Seitenlänge des entfalteten Torus.

Entsprechend diesem zweidimensionalen Modell setzt man den dreidimensionalen Raum aus so genannten Vielfächern zusammen, fachlich Polyedern. Als einfachsten Fall kann man Sechsfächner benutzen, besser be-

Die Lichtgeschwindigkeit ist zwar die Grenze, aber nicht für die Ausdehnung des Raums

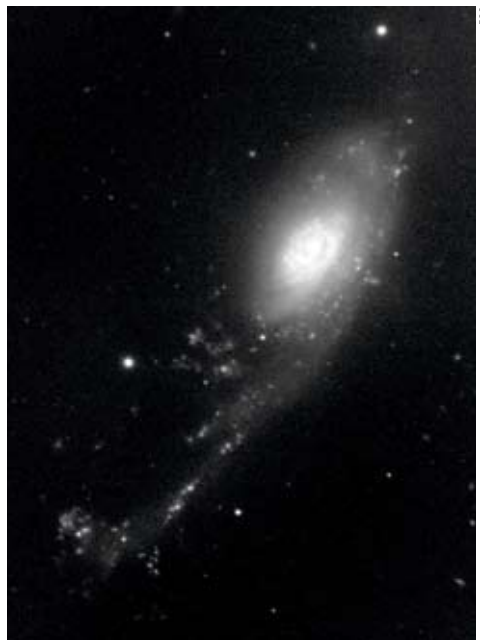
kannt als Würfel. Dabei werden die gegenüberliegenden Seiten derart miteinander identifiziert, so dass – wie beim zweidimensionalen Analogon – ein Objekt, welches den Polyeder durch eine Oberfläche verlässt, durch die gegenüberliegende Seite wieder in den Polyeder eintritt. In einem derartigen Raum sind stehende Wellen möglich, deren genaue Gestalt sowohl von der Geometrie des Polyeders als auch von der genauen Art der Identifikation gegenüberliegender Seiten abhängt. Doch auch hier gilt, dass die Wellenlänge nicht größer als die Seitenlänge des Polyeders sein kann. So erreichen Wellenlängen eine bestimmte maximale Größe, genau wie von COBE und WMAP beobachtet.

In der Analyse von Frank Steiner, Ralf Aurich und Mitarbeitern von der Universität Ulm wird in Übereinstimmung mit den WMAP-Daten ein endlicher flacher Raum vorausgesetzt und dann das Drei-Torus-Universum mit den Daten detailliert verglichen. Zunächst betrachten sie bestimmte Eigenschaften der Hintergrundstrahlung, sowie zwei weitere Effekte, die bereits von anderen Forschern vorgeschlagen worden waren und die Topologie des Mikrowellenhimmels auf noch andere Weise testen.

Das Ulmer Modell

Das Drei-Torus-Modell eines endlichen flachen Raums stimmt sehr gut mit den WMAP-Daten überein, in manchen Teilen passt es sogar besser als das Standardmodell mit unendlichem flachem Raum. Die Seitenlänge der kosmischen Einheitszelle, die den Torus erzeugt, beträgt in dem Ulmer Modell etwa 55,6 Milliarden Lichtjahre. Verdoppelt man die Seitenlänge, unterscheiden sich die Ergebnisse kaum mehr vom unendlichen Raum. Ein derartiges endliches Universum wäre dann aber deutlich größer als der für uns sichtbare Anteil. Dieser für uns beobachtbare Teil des Kosmos ist durch das »Alter des Universums« von 13,7 Milliarden Jahren begrenzt – ein Wert, der ebenfalls aus der Analyse der WMAP-Daten für ein flaches Weltall stammt.

Da sich der Raum ausdehnt, natürlich auch während das Licht zu uns unterwegs ist, hat eine Strahlungsquelle am Rande des sichtbaren Universums eine etwa dreimal größere Entfernung als der Abstand, der sich aus der Reisezeit des Photons ergibt. Im expandierenden Raum nimmt die Fluchtgeschwindigkeit linear mit der Entfernung zu und übersteigt oberhalb der so genannten Hubble-Entfernung die Lichtgeschwindigkeit. Die Lichtgeschwindigkeit ist zwar Grenzgeschwindigkeit für die Signalausbreitung, aber nicht für die Raumdehnung.



Je weiter ein kosmisches Objekt von uns entfernt ist, desto schneller bewegt es sich von uns fort. Schließlich erreicht es einen »Horizont«, jenseits dessen uns sein Licht nicht mehr erreicht: die Grenze des sichtbaren Universums. Jenseits dieses Horizonts kann das Universum unendlich, oder endlich sein.

Vom Satelliten Planck der europäischen Raumfahrtagentur Esa, der Anfang 2009 starten soll, wird ein wesentlich verbessertes Spektrum der Temperaturschwankungen bei kleinen Winkelskalen erwartet. Diese Beobachtungen werden eine bessere Entscheidungsgrundlage zur Topologie des Universums liefern. Diese wäre bei großen Winkelskalen (also kleinen Multipolwerten) zu erwarten.

Aber auch eine höhere erwartete Genauigkeit der Planck-Beobachtungen bei kleineren Winkelskalen könnte die Entscheidung über die Topologie des Kosmos voranbringen. Insbesondere würde sie bei der Suche nach den vorhergesagten Kreisen helfen – ein idealer Test der kosmischen Topologie.

Immerhin wird man dann zumindest den älteren Vorschlag eines endlichen Universums mit Dodekaeder-Geometrie besser bewerten können – denn der setzt einen leicht positiv gekrümmten Raum voraus, oder das bereits 1999 von der Ulmer Gruppe eingehend untersuchte »Picard-Universum«, das einen leicht negativ gekrümmten Raum voraussetzt.

Der Satellit Planck hat jedoch das Ziel, den flachen Raum anhand der gemessenen Energiedichte auf weniger als ein Prozent genau zu vermessen – und damit besser als der heutige Raumpäher WMAP. Bestätigt sich der bisher favorisierte Wert, dann bliebe ein Torus-Universum die derzeit einzige bisher solide überprüfte Alternative zum unendlichen Raum. Wie also wird der Wettstreit zwischen der Standardkosmologie und dem etwas ketzerischen Torus-Gegenmodell ausgehen?

Wie der Ulmer Kosmologe Frank Steiner kürzlich sagte: »Die Beobachtungen müssen es entscheiden!«



Georg Wolschin ist theoretischer Physiker und wissenschaftlicher Geschäftsführer des SFB/Transregio Bonn-Heidelberg-München »The Dark Universe« an der Universität Heidelberg.

Aurich, R., et al.: Do We Live in a »Small Universe«? In: Classical and Quantum Gravity 25, Nr. 125006, 2008.

Luminet, L. et al.: Dodecahedral Space Topology as an Explanation for Weak Wide-Angle Temperature Correlations in the Cosmic Background Radiation. In: Nature, 425, S. 593–595, 2003.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/974631.

Lesen im Kaffeefleck

Nur ein leidiger Klecks? Von wegen: Seine ausgeprägten Ränder offenbaren nichts weniger als ein universelles (Potenz-)Gesetz.

In dieser neuen Rubrik erklärt Physikdidaktiker H. Joachim Schlichting physikalische Phänomene des Alltags.



Wird Eis durch Streusalz zum Schmelzen gebracht, bleiben nach der Verdunstung des Wassers häufig gleich mehrere Salzränder zurück. Ihre Staffelung rührt von der Unterbrechung des Tauvorgangs durch den Tag-und-Nacht-Wechsel her.

Der erste deutsche Professor für Experimentalphysik beschäftigte sich nicht nur mit Geodäsie, Astronomie und Chemie. Nein, der Göttinger Georg Christoph Lichtenberg (1742–1799) ließ seine Gedanken sogar um eine »Theorie der Falten in einem Kopfkissen« kreisen. In diesem Sinn nehmen wir hier künftig Alltagsphänomene in den Blick, die unsere physikalische Intuition herausfordern.

Zum Beispiel etwas so Unspektakuläres wie die Kaffeeflecken auf einem Tischtuch. Erstaunlicherweise nämlich scheinen die Ränder dieser Flecken wie von Kinderhand mit kräftigem Strich nachgezeichnet zu sein. Erstaunlich deshalb, weil vielmehr zu erwarten wäre, dass die Tönung zum Rand hin allmählich schwächer würde. Denn die Schichtdicke des zum Fleck ausgelaufenen Tropfens und mit ihr die Menge der gelösten Kaffeeteilchen nehmen nach außen hin kontinuierlich ab.

Was also lässt sich aus der Struktur des Kaffeeflecks lesen? Ist ein Kaffeetropfen erst

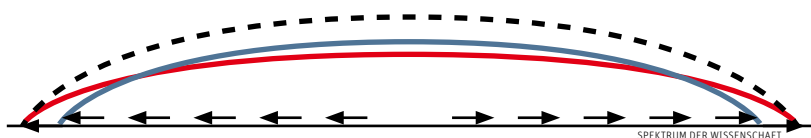
zwar flacher, behält aber bis zum Schluss seine Randform und bedeckt dieselbe Fläche.

Schließlich bleiben nur die gelösten festen Kaffeeteilchen zurück. Besonders viele Teilchen versammeln sich am Rand des Flecks. Zwar ist die Verdunstungsrate auch dort nicht größer als im übrigen Tropfen, dank des Flüssigkeitsstroms von der Mitte zum Rand fließen aber ständig Kaffeeteilchen nach. Zum Erliegen kommt der Teilchenstrom erst, wenn der Tropfen zu einem hauchdünnen Flüssigkeitsfilm geschrumpft ist. Dann ist es endgültig geschehen: Von nun an verunziert eine schwach getönte Fläche, umgeben von einer kräftigen Randlinie, die Tischplatte – zumindest bis zum nächsten Wischen.

Alle Achtung!

Statt bei Kaffeekränzchen lässt sich eine Variante des Phänomens auch auf winterlichen Straßen beobachten, nämlich bei eingetrocknetem Schmelzwasser. Rückt man Schnee und Eis mit Salz zu Leibe und wird der Tauvorgang dann durch den Tag-und-Nacht-Wechsel unterbrochen, zeigen sich sogar mehrere ineinandergeschachtelte Salzränder.

Zu einem überraschenden Ergebnis kamen Forscher, die das Eintrocknen von Tropfen mit gelösten Stoffen quantitativ untersuchten: Die Masse des Rands als Funktion der Zeit wächst nach einem bestimmten Potenzgesetz an, völlig unabhängig von der jeweiligen Unterlage, der Trägerflüssigkeit und den gelösten Feststoffen. Die Eigenschaften von Kaffeeflecken – und nicht nur von diesen – verdanken sich demnach einem universell gültigen Gesetz. Und steigen so vielleicht doch noch in unserer Achtung. ◀



Statt infolge von Verdunstung allseitig zu schrumpfen (blaue Kontur), bleibt der Tropfen auf der ursprünglichen Fläche fixiert (rote Kontur). Dies ist nur möglich, weil Flüssigkeit von innen nach außen (Pfeile) nachfließt. Die gestrichelte Linie stellt den ursprünglichen Tropfen dar.

einmal gefallen, läuft er auf dem Tisch zu einem mehr oder weniger großen Klecks auseinander. Dabei wird Energie frei. Denn zum einen nimmt die potenzielle Energie des Tropfens ab. Zum anderen wachsen die Grenzflächen, was Energie erfordert. Zwischen Tisch und Wasser ist dabei weniger Grenzflächenenergie als zwischen Luft und Wasser erforderlich. Das Auseinanderlaufen kommt genau dann zum Stillstand, sobald sich Energiezunahme und -abnahme die Waage halten.

Das sich einstellende dynamische Gleichgewicht fixiert die Fläche, die der Tropfen fortan auf dem Tisch einnimmt, auch wenn er durch Verdunstung nun an wässriger Substanz verliert. Daraus folgt zwangsläufig, dass das von Austrocknung bedrohte, flach auslaufende Randgebiet von der Tropfenmitte aus mit Flüssigkeit versorgt wird – in dem Maß, in dem Wasser verdunstet. So wird der Tropfen



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

Deegan, R. D. et al.: Contact Line Deposits in an Evaporating Drop. In: Physical Review E 62(1), S. 756–765, 2000.

SERIE: EVOLUTION

Teil I: Evolution – Gruppe oder Individuum?	SdW 1/2009
Teil II: Missverständnisse um Darwin	SdW 2/2009
Teil III: Der Ameisenforscher. Bert Hölldobler im Porträt	SdW 3/2009
Teil IV: Evolution und Religion	SdW 4/2009

TITELTHEMA

EVOLUTION – *Gruppe oder Individuum?*

Eine in Misskredit geratene Vorstellung – die Idee der Gruppenselektion – kommt in neuer Form wieder zu Ehren. Einige Lebensformen lassen sich anders nicht erklären. Auch die menschliche Evolution wurde sicherlich von Selektionsvorgängen auf Gruppenebene beeinflusst.

Von David Sloan Wilson und
Edward O. Wilson

Gibt es Gruppenselektion? – Seit mehreren Jahrzehnten pflegen Verhaltensforscher und Evolutionsbiologen zu betonen: Anpassungen »zum Wohl der Gruppe« kämen bei den von ihnen studierten Phänomenen nicht in Betracht. Damit beziehen sie eindeutig dazu Stellung, ob der evolutive Wettstreit ums Überleben mitunter Teamsache sein könnte oder ob er sich letztlich rein zwischen Individuen abspielt.

Außer Frage steht heute, dass die natürliche Auslese oder Selektion auf der Organismenebene wirkt, also bei den Individuen ansetzt. Damit ist gemeint: Wer die günstigeren Merkmale trägt, gibt seine Gene mit höherer Wahrscheinlichkeit an die nächste Generation weiter als weniger günstig ausgestattete Individuen. Nur – kann Gleiches unter Umständen auch für andere Ebenen der biologischen Hierarchie gelten? Können Selektionsprozesse Merkmale fördern, die zwar nicht dem Individuum nützen, aber einer sozialen Gemein-

schaft, wie einer Herde oder einer Kolonie? Womöglich sogar der ganzen Art? Oder einem Ökosystem aus vielen Arten? Gibt es also biologische – erbliche – Eigenschaften, die dem Gruppenwohl dienen?

Frühere Biologen vertraten diese Vorstellung recht unkritisch. Da hieß es etwa, Huf-tierherden würden über Anpassungen verfügen, dank derer sie ihre Weidegründe auf lange Sicht nicht unmaßig ausbeuteten. Dadurch würden sie eher überleben als Herden, die ihre Nahrungsressourcen überstrapazierten. Später entdeckten Forscher in diesem Bild einen wunden Punkt: Denn Betrüger, die sich mehr als den ihnen fairerweise zustehenden Teil ein-verleiben, könnten das System unterwandern.

Wegen solcher Überlegungen fiel das Konzept der Gruppenselektion etwa Mitte der 1960er Jahre in Ungnade. Forscher waren jetzt bestrebt, Verhalten, das äußerlich dem Gruppen- oder Artwohl zu nutzen schien, mit reiner Individualektion zu begründen. Um Kooperation und Hilfeleistungen unter Art-genossen zu erklären, entstanden Konzepte wie das einer Verwandtenselektion (wer Verwandten hilft, der hilft in gewissem Maß auch

**Gibt es biolo-
gische – erbliche –
Eigenschaften,
die dem Gruppen-
wohl dienen?**



DPA / LANDOV / ADRIANO MACHADO

seinen eigenen Genen) oder das vom reziproken Altruismus (späterer Gegenleistung). Verbirgt sich also hinter scheinbarem Altruismus in Wahrheit purer Eigennutz?

Die früheren naiven Vorstellungen von einer Gruppenselektion sind nach heutigem Verständnis sicher unhaltbar. Trotzdem sollten wir den Ansatz vorsichtig und unvoreingenommen neu überdenken. Denn wie wir sehen werden, bringt die Evolution durchaus Eigenschaften hervor, die zwar dem Gemeinwohl dienen, dem Einzelnen aber Kosten verursachen. Dass Betrüger solche Erscheinungen ausnutzen könnten, muss nicht bedeuten, dass die Schwindler in der Population überhandnehmen. Denn der Konkurrenz zwischen den Individuen steht die zwischen verschiedenen Gruppen gegenüber. Welcher der beiden Effekte am Ende überwiegt, hängt von deren Kräfteverhältnis ab. Somit sollte man das Gruppenselektionskonzept nicht grundsätzlich verdammen, sondern im Einzelfall das Gleichgewicht zwischen den verschiedenen Selektionsniveaus ergründen.

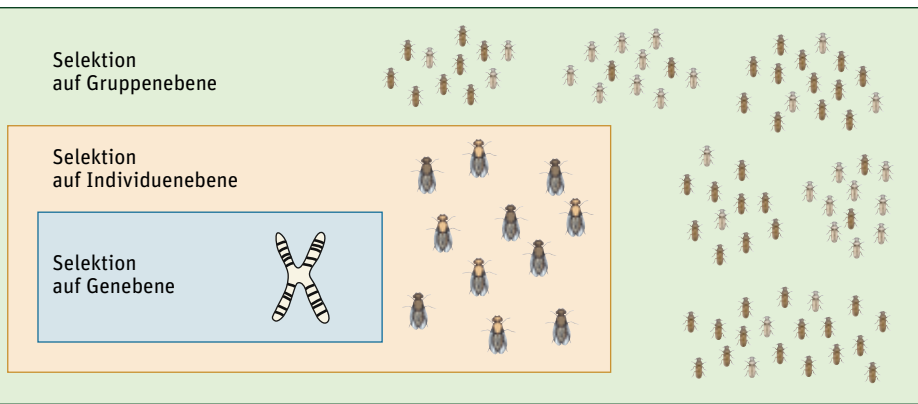
Beim Konzept der Selektion auf Individual-ebene zählt der Fortpflanzungserfolg von Ein-

zelnen im Vergleich zueinander, ihre so genannte – relative – Fitness. Doch eine Auslese auf Gruppenebene kann dem Einzelnen Nachteile im Verhältnis zu anderen bringen. Zwar könnten auch umsichtige Herdenmitglieder davon profitieren, dass sie Futterressourcen schonen – doch noch mehr würden die Egoisten der Herde gewinnen. Deren Fitness würde also durch die Zurückhaltung der anderen wachsen. Wieso gibt es dann in der Population überhaupt noch umsichtige Mitglieder? Wir sagen: offenbar wegen des Fitnessunterschieds auf einer höheren Ebene. Als Ganzes haben Gruppen aus redlichen Individuen eine höhere Fitness als Gruppen aus Gaunern.

Wie bei den russischen Matroschkas, bei denen in jeder Puppe wieder eine kleinere steckt, gibt es offensichtlich hierarchische Selektions- und Evolutionsstufen (Bild S. 34). Die Selektionsebenen stehen untereinander in Wechselbeziehungen, aber jede begünstigt andere Anpassungen. Innerhalb einer Gemeinschaft mögen die Schurken besser davonkommen, auch wenn ihr Verhalten der Gruppe als Ganzem schadet. Aber in der Gesamtpopulation schneiden Gruppen besser ab, die sich so

Traditionelle Gesellschaften wie diese brasilianischen Urwaldindianer legen in der Regel großen Wert auf Gruppenrituale. Sie sind auf einen engen Zusammenhalt angewiesen.

► Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio



Selektion kann auf verschiedenen Ebenen stattfinden: zum Beispiel zwischen Genen innerhalb von Organismen; oder zwischen Individuen; oder zwischen Gruppen von Individuen; und selbst auf noch höheren biologischen Ebenen.

In Kürze

- In den letzten Jahrzehnten glaubten die meisten Biologen, dass eine **Gruppenselektion** in der Evolution keinen Einfluss hat. Danach tritt allein die Individualselektion in Erscheinung.
- Ein neues Konzept besagt jedoch, dass **Selektionskräfte** auf verschiedenen Ebenen wirken können. Gruppeneigenschaften – die den Einzelnen gegenüber Gruppengenossen durchaus benachteiligen können – bilden sich unter Umständen heraus, wenn **die Gemeinschaft als Ganzes** dadurch gegenüber anderen Gruppen Vorteile hat. Dieser Mechanismus dürfte auch in der menschlichen Evolution wichtig gewesen sein.

verhalten, dass sie an Fitness insgesamt andere Gruppen übertrumpfen. Diese hier günstigen Eigenschaften könnten wiederum auf einer noch höheren Selektionsebene Nachteile bringen, etwa in ökologischen Systemen.

Die Hierarchie reicht auch nach unten noch jenseits der Individualebene. Forscher fragen zum Beispiel, wie die Gene eines Organismus miteinander konkurrieren. Als Faustregel gilt: Die Anpassungen auf einer bestimmten Ebene erfordern entsprechende Selektionsvorgänge auf derselben Ebene. Zugleich werden sie oft von Ausleseprozessen auf tieferen Ebenen unterlaufen. Forscher nennen diesen Denkansatz Multilevel-Selektion – Selektion auf mehreren Ebenen. Der Begriff selbst ist zwar jünger als das Wort Gruppenselektion. Doch die Vorstellung von ineinandergeschachtelten Ebenen geht letztlich schon auf Charles Darwin zurück.

Vielleicht hätte Darwin das Phänomen gar nicht interessiert, wäre er nicht auf Verhaltensweisen gestoßen, die dem Einzelnen in der Gemeinschaft Selektionsnachteile bringen. In seinem Buch »Die Abstammung des Menschen« schreibt er, innerhalb der eigenen Horde seien anständige Menschen gegenüber unredlichen nicht erkennbar im Vorteil. Allerdings würden Horden aus anständigen Mitgliedern andere Gruppen klar übertrumpfen, »und das wäre natürliche Selektion«. In der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts haben andere Evolutionsforscher diese Idee ausgebaut, und die Populationsgenetiker haben sie damals auch mathematisch untermauert. Leider kannten in jener Zeit viele Biologen diese neuen Arbeiten nicht, so dass oft eine naive Sicht der Gruppenselektion die Oberhand gewann.

Wieso aber geriet das Konzept später dermaßen in Misskredit? Ende der 1950er Jahre gehörte die University of Chicago zu den Orten, wo solche unkritischen Vorstellungen blühten. Der junge Forscher George C. Williams geriet dort damals in ein Seminar eines Termitenspezialisten, der gern die ganze Natur mit einem Termitenstaat verglich. Wil-

liams war von dessen Weltbild entsetzt. Er beschloss darum, ein Buch zu schreiben, in dem er die Begriffe Anpassung und Selektion klarstellen und deren Missbrauch aufzeigen wollte. Während er noch daran arbeitete, erschien 1962 eine Monografie des schottischen Biologen Vero C. Wynne-Edwards. Dieser deutete eine Vielzahl an sozialen Verhaltensweisen von Tieren als Anpassungen, die einen Raubbau an Ressourcen verhinderten.

Wynne-Edwards erkannte durchaus, dass dergleichen Eigenschaften ihren Trägern innerhalb der Gruppe selbst zum Nachteil gereichen konnten. Doch der Forscher postulierte, eine Gruppenselektion fördere solches Verhalten. Seine Thesen wurden in Forscherkreisen heftig und kontrovers diskutiert. Als dann 1966 Williams' Buch erschien, sehnten sich die Evolutionsbiologen allmählich nach einem Ende des Streits.

Streit um die wirkmächtigen Selektionsebenen

Die Schlussfolgerungen, die Williams unterbreitete, waren einem kleinen Expertenkreis schon vertraut. Er schrieb: Zwar könnten rein theoretisch Merkmale evolvierten, die dem »Gruppenwohl« dienten. Allerdings müssten die dafür erforderlichen Selektionskräfte stark genug sein, um die Selektionskräfte zu überwinden, die zwischen den Individuen auftreten. Auch bräuchte man, um eine Gruppenauslese zu erklären, eine eigene Theorie. Denn Gruppenanpassungen erforderten Selektionsprozesse auf Gruppenebene. Williams formulierte ganz klar: »Gruppenspezifische Anpassungen existieren faktisch nicht.« Eine Gruppenselektion möge es zwar geben, doch fast zwangsläufig wirke sie viel zu schwach, gemessen an der Kraft der Individualselektion.

Wie Wynne-Edwards erkannte Williams somit die Existenz unterschiedlicher Selektionsebenen an. Doch die beiden Forscher gewichteten die Bedeutung der einzelnen Ebenen, ihren Einfluss im Vergleich zu den anderen Stufen, völlig verschieden. Letztlich fanden viele Evolutionsbiologen Williams' Ansatz überzeugender, und er setzte sich im Evolutionsdenken durch. So geriet das Gruppenselektionskonzept in Verruf.

Im Nachhinein erscheinen jedoch beide Positionen als zu extrem. Denn offenbar können die Kräfte bald auf der einen, bald auf der anderen Selektionsebene stärker sein. Nicht immer ist die Auslese auf Gruppenebene vernachlässigbar, sondern mitunter sogar ausgesprochen massiv. Dann entstehen veritable Superorganismen. Einer einfachen Regel folgt die Gewichtung allerdings nicht. Vielmehr muss man den Einzelfall ergründen.

Nun einige Beispiele für Anpassungen auf Gruppenebene: Viel Stoff zum Nachdenken bieten die zahlreichen koloniebildenden, wirbellosen Meerestiere, bei denen viele Einzelorganismen physisch verbunden sind.

Bei manchen, wie den Korallen, bleiben die Einzeltiere dabei eigenständig und alle gleichartig. Bei anderen aber differenzieren sie sich für unterschiedliche Aufgaben im Gesamtgebilde – so bei den filigranen Staatsquallen, zu denen die Portugiesische Galeere gehört. Bei den größten Arten, die fast 50 Meter lange Fangfäden ausbilden können, erreicht der Gesamtkörper über zwei Meter Durchmesser. Einige Kolonienmitglieder besorgen die Fortbewegung, andere betäuben und fangen Beute. Wieder andere kümmern sich um Verdauung und Nährstoffaufnahme. Selbst so etwas wie ein einfaches Nervensystem ist vorhanden. Kurz – hier scheint die Grenze zwischen Individuum und Gruppe zu verwischen. Aus in Organe umgewandelten einfacheren Organismen erschaffen Staatsquallen eine neue Sorte von Organismus. Handelt es sich um Anpassungen »zum Wohl

der Kolonie«, so wie Organe dem »Wohl des Individuums« dienen?

Die meisten Evolutionsbiologen würden das so wohl bejahen. Erhellend sind allerdings die Argumente, mit denen Forscher die Existenz von Staatsquallen ohne Gruppenselektion erklären. Da heißt es, die Mitglieder der Kolonie entstünden doch durch Knospung, seien somit genetisch gleich. Selbstverständlich dürfe man das Gebilde als adaptive Einheit ansehen, einem vielzelligen Organismus vergleichbar.

Man könnte das Phänomen aber auch anders bewerten – nämlich gemäß den postulierten verschachtelten Selektionsebenen argumentieren: Innerhalb solch einer Kolonie, zwischen den genetisch identischen Organismen, wirke keine Auslese. Folglich träte bei solchen Arten keine Individualselektion auf, sondern allein eine Gruppenselektion – zwischen verschiedenen Kolonien. Aber auch diese Erklärung berücksichtigt die Gegebenheiten noch nicht wirklich. Denn vermutlich sind die Kolonienmitglieder genetisch nicht völlig identisch. Schließlich sind schon die Zellen eines

Bei den Staatsquallen übernehmen die Einzelorganismen verschiedene Funktionen, sie differenzieren sich gewissermaßen in verschiedene Organe. Hier eine Art der Tiefsee, *Marrus orthocanna*. Oben sieht man den Schwimmkörper, die Schwimmglocken darunter dienen auch der Fortbewegung. Die langen zusammengeschnurrten Tentakel gehören zu Nährpolyphen. Die Fäden oben rechts sind Nesselzellen.



CASEY DUNKL, BROWN UNIVERSITY

In Notzeiten bilden viele Einzelorganismen des Zellulären Schleimpilzes *Dictyostelium discoideum* eine gemeinsame Masse. Daraus formt sich ein pilzförmiger Fruchtkörper. Nur Zellen des Köpfchens werden zu Sporen, die sich verbreiten können. Die Zellen des Stiels sterben ab (links ein Querschnitt).



vielzelliger Organismus in der Hinsicht nicht wirklich gleich (schon Einzelquallen sind Vielzeller). Mit jeder Zellteilung tauchen Mutationen auf, was auch für eine Selektion innerhalb der Kolonie Material liefert. Bei Vielzellern verhindern ausgeklügelte Anpassungen, dass im Organismus Selektionskräfte auf Gene oder Zelllinien wirken. Gleiches dürfte bei den Staatsquallen auch für die Kolonienmitglieder gelten. Unter dem Strich bildete sich die Arbeitsteilung innerhalb einer Portugiesischen Galeere somit heraus, weil Selektionsvorgänge die Kolonien als Ganzes bewerten.

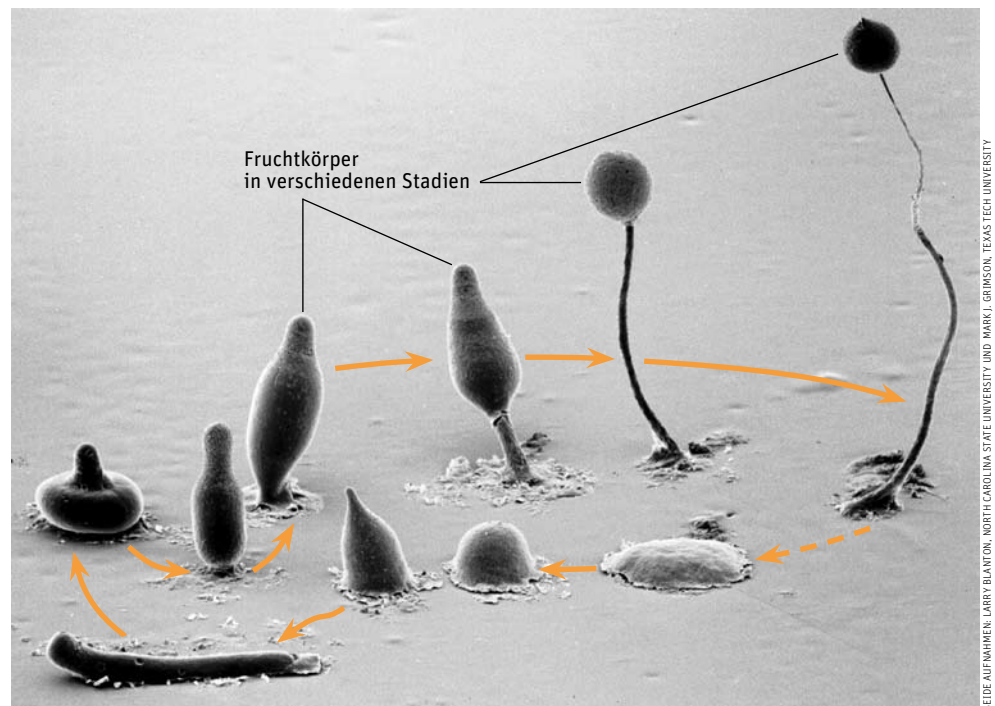
Ein mindestens ebenso faszinierendes Beispiel stellt das merkwürdige Wechselwesen *Dictyostelium discoideum* dar, das heute meist den Zellulären Schleimpilzen zugerechnet wird. Die meiste Zeit lebt dieser Organismus als Amöbe, als Einzeller im Boden und frisst Bakterien und andere Kleinstlebewesen. Doch wenn die Nahrung knapp wird, kommen die Amöben zu Zigtausenden zusammen und bilden zunächst einen unförmigen Körper, der dem Licht zukriecht, bis zu 20 Zentimeter weit. Zuletzt differenziert sich diese Zellmasse in einen strukturierten Fruchtkörper: eine Bodenplatte, einen langen, dünnen Stiel und ein Köpfchen mit Sporen. Einzig die Sporen überdauern harsche Zeiten. Sie können von Tieren verbreitet werden und bringen später die nächste Amöbengeneration hervor, während die Zellen des Stiels absterben.

Seit Jahrzehnten untersuchen Forscher an diesem Organismus Entwicklungsprozesse. Offenbar interessierte sie aber zunächst weni-

ger, dass sich hier viele Zellen für das Wohl des Ganzen opfern. Erst viel später erkannten sie, dass sich diese Lebewesen hervorragend als Modell eignen, um die Theorie von den verschiedenen Selektionsebenen zu ergründen. Schon um einen gemeinsamen Körper zu bilden, der sich koordiniert orientiert, müssen die Zellen eine Klebmasse absondern und kommunizieren. Das Gebilde kriecht, indem sie sich darin spiralig bewegen. Schlechterdings geht es hier um eine Gruppenanpassung, denn zwar muss jede Zelle ihr Teil beitragen, aber letztlich zählt, dass der Gesamtkörper einen guten Ort mit Verbreitungschancen für die Sporen findet.

Wer muss sich opfern?

Das Erstaunlichste an diesem Zellulären Schleimpilz ist aber, dass sich die Zellen, die den Stiel bilden, sozusagen für andere opfern. Anscheinend besitzen sie alle eine starke Tendenz, Sporen zu werden. Tatsächlich kennen Forscher aus dem Freiland wie aus dem Labor Stämme, die dazu übermäßig neigen. Doch zur Verbreitung ist der lange Stängel nun einmal hilfreich. Die Selbstopferung zu erklären ist allerdings nicht so einfach. Sind die Zellen, die sich zusammenfinden, alle mehr oder weniger genetisch identisch, abgesehen von neuen Mutanten? Dann hätte eine Individualselektion natürlich wenig Gewicht. Oder verteilen sich die Zellen wie bei einer Lotterie zufällig auf Stängel und Kopf? Auch hierzu würde eine Individualselektion nichts beitragen. Doch nach neuen Studien werden beide Er-

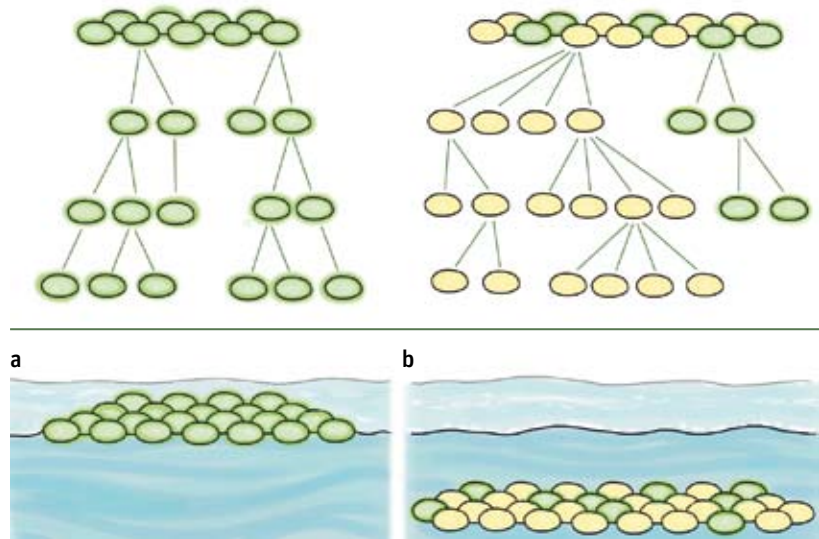


klärungen dem Phänomen nicht völlig gerecht. In einem gewissen Maß wirkt bei dem Zellulären Schleimpilz tatsächlich auch eine Individualauslese, also eine Konkurrenz zwischen den beteiligten Zellen. Und die so geförderten Merkmale schaden ohne Frage dem Gruppenganzen.

Einige der Aspekte, die uns bei Staatsqualen und bei den Schleimpilzen staunen machen, kommen auch bei dem Bakterium *Pseudomonas fluorescens* vor. Kultiviert man es in einer Nährlösung, ohne umzurühren, so herrscht in tieferen Schichten bald Sauerstoffmangel. Nur nah an der Oberfläche können die Mikroben noch gedeihen. Wenn eine bestimmte Spontanmutation auftritt, sondern sie ein zellulosehaltiges Polymer ab, und es bildet sich ein Film, in dem sie die Oberfläche besiedeln können. Weil aber die Produktion des Films den Stoffwechsel beansprucht, sind Betrüger, die diese Mutation nicht aufweisen, davon jedoch profitieren, fitnessmäßig zunächst im Vorteil – sie vermehren sich stärker. Doch ein zu hoher Anteil von Faulpelzen macht alles zunichte: Der Film zerfällt, und die Mikroben versinken allesamt in sauerstoffarme, lebensfeindliche Tiefen. Wie Paul B. und Katrina Rainey experimentell nachwiesen, hält sich die Mutation zu Gunsten der Polymerproduktion durch Gruppenselektion in der Population. Alle drei beschriebenen Beispiele lassen erkennen, welch erhebliche Evolutionskraft von einer Auslese zwischen Gruppen ausgehen kann. Offenbar gibt es tatsächlich Anpassungen auf Gruppenebene zum gemeinsamen Vorteil (siehe auch Artikel S. 16).

Springen wir nun zur Ebene der Gene. Normalerweise haben zwei einander entsprechende Gene eines Chromosomenpaars bei der Reifeteilung (Meiose) eine gleiche Chance, den Keimzellen zugeordnet zu werden – somit auch eine gleich hohe Chance, in der nächsten Generation vertreten zu sein. Es ist sozusagen ein fairer Vorgang, welcher eine Selektion auf Genebene unterbindet, sie vielmehr auf die Individualebene schiebt, wenn nicht noch höher, und uns zu Recht von Organismen als Funktionseinheiten sprechen lässt.

Aber manche Gene unterwandern dieses Fairnessprinzip. Forscher nennen das Segregationsverzerrung (englisch *meiotic drive*). So sorgt ein Genkomplex bei der Taufliege *Drosophila* dafür, dass Spermien, die ihn aufweisen, Spermien ohne diesen Komplex mit giftigen Substanzen schwer schädigen. In der nächsten Generation besitzen dann überverhältnismäßig viele Tiere ebendiese Gene. Allerdings sind Fliegenmännchen, welche die Erbanlagen doppelt erben, also von beiden Eltern, oft unfruchtbar. So ein Phänomen gereicht also



nicht dem Individuum zum Guten, sondern bestimmten Genen. Andererseits gibt es natürlich auf Genen beruhende Eigenschaften, die dem Individuum nützen. Als Beispiel führen Biologen gern den Schildkrötenpanzer an.

Warum verständigten sich die Evolutionsforscher bisher nicht auf einen ausgewogenen Ansatz, bei dem der Einfluss der verschiedenen Selektionsebenen in jedem Fall einzeln zu bewerten ist – statt strikt einseitig Partei für oder gegen die Existenz von Gruppenselektion zu ergreifen? Teilweise hängt das von der Perspektive ab, aus der man die Phänomene betrachtet. Viele Biologen wählen eine Sichtweise, in der die verschachtelten Selektionsebenen keinen Platz haben.

Perspektive des »egoistischen Gens«

Die Gene für den Panzer einer Schildkröte besitzen, allein auf dasselbe Tier bezogen, keine höhere Fitness als seine anderen Gene. Doch sie können entsprechende Gene anderer Populationsmitglieder übertrumpfen. Anders gesagt: Diese Gene evolvieren. Und der Panzer, wenn man das so sehen will, evolviert durch Selektion auf Genebene. Bei dieser Ausdrucksweise entscheidet man sich, nicht zu berücksichtigen, dass die betreffenden Gene letztlich durch eine Auslese zwischen Individuen gefördert werden.

Das gleiche Gedankenspiel können wir auf Individuen als Mitglieder von Gruppen anwenden. Bei den film- oder mattenbildenden Bakterien haben die Mitglieder desselben Stamms, die gemeinsam so einen Film bilden, zwar untereinander keine Fitnessvorteile. Doch unter bestimmten Umweltbedingungen kann ein solches Verhalten, also ein genetisches Merkmal, in der Gesamtpopulation Vorteile bringen. Auf diese Weise darf man Anpassungen auf einer Evolutionsebene immer auch

Zellen des Bakteriums *Pseudomonas fluorescens* überleben in sauerstoffarmem Wasser nur an der Oberfläche als Film (a) – dank eines Klebstoffs, den sie produzieren (grüne Zellen, links). Doch das kostet sie Energie. Mutanten, die sich das sparen (gelbe Zellen), vermehren sich schneller (rechtes Bild oben). Nehmen sie allerdings überhand, löst sich das Gebilde auf – alle gehen zu Grunde und sinken ab (b).

AMERICAN SCIENTIST / STEPHANIE FREESE, NACH PAUL B. UND KATRINA RAINEY



CHE / FOTOLIA

Ameisen sind zu erstaunlichen Gemeinschaftsleistungen fähig. Gruppenanpassungen beruhen oft auf geringen genetischen Veränderungen, die im Zusammenspiel vieler Individuen ganz neue Eigenschaften hervorbringen.

als Anpassungen auf einer niedrigeren Ebene auffassen. Letztlich sind natürlich alle Merkmale, die evolvierten, Anpassungen auf dem Genniveau – auch wenn die Selektion auf einer höheren Ebene greift. Für Populationsgenetiker war darum die Genperspektive immer wichtig. Sie betrachten Veränderungen im Verhältnis von einander entsprechenden Genen in der Gesamtpopulation. Der englische Biologe Richard Dawkins prägte dafür das Schlagwort vom »egoistischen Gen«.

Wer das Geschehen in dieser Weise sieht, deutet alles, was die Evolution hervorbringt, als Anpassung auf Genebene. Nur – sogar Vertreter der Theorie von den egoistischen Genen müssen dazwischen unterscheiden können, ob ein Gen für einen Schildkrötenpanzer herhält oder ob es dafür sorgt, dass nicht damit ausgestattete Spermien verschwinden. Um beides zu unterscheiden, bemühen sie ein »Gefährt« (*vehicle*) für die Selektion. Im Fall des Schildkrötenpanzers stellt das individuelle Tier das Beförderungsmittel für die involvierten Erbanlagen dar. Letztlich aber bezeichnet dieses Konzept auch nichts anderes, als dass verschiedene hierarchische Selektions Ebenen existieren.

Allerdings darf man die Perspektive keineswegs beliebig wählen. Viele Evolutionstheoretiker haben Vorschläge unterbreitet, um die Evolution von Altruismus und anderem Sozialverhalten ohne Gruppenselektion zu erklären. Schaut man sich ihre Modelle genauer an, so klingen die Argumente zwar anders als bei unserem Schema; doch drückt man dieselben Inhalte in unseren Begriffen aus, erscheint eine Gruppenselektion dafür letztlich notwendig.

Sollte das Konzept der Gruppenselektion irgend Bestand haben, dann wohl am ehesten für die so genannten eusozialen Insekten, also

die Staaten bildenden Ameisen, Wespen, Bienen und Termiten – sollte man zumindest meinen. Der amerikanische Entomologe William Morton Wheeler (1865–1937) nannte solche Insektenstaaten 1911 Superorganismen. Trotzdem wurden gerade sie zum Paradebeispiel für Versuche, alles mit Sicht auf die Individuen zu betrachten.

Im Zentrum dieses Ansatzes steht die so genannte Verwandtenselektion, ein Konzept, das der britische Evolutionsbiologe William D. Hamilton in den 1960er Jahren als Alternative zur Gruppenselektion entwarf. Die Grundidee damals: Anderen beizustehen, kann unter Umständen die Verbreitung von Altruismusgenen fördern, doch ob und wie stark, hängt neben anderen Aspekten vom Verwandtschaftsgrad untereinander ab. Denn mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit, die zu entfernter Verwandten hin abnimmt, besitzen diese Individuen Gene gleicher Herkunft wie man selbst. Wer nah Verwandten hilft, kann damit unter bestimmten Voraussetzungen seine eigene Fitness steigern. Nun sind die Mitglieder mancher Staaten bildenden Insekten auf Grund besonderer Fortpflanzungsprinzipien teils ungewöhnlich nah miteinander verwandt – was laut Hamilton gut erklären würde, wieso sie sich füreinander aufopfern, statt sich selbst fortzupflanzen.

Später erkannte er, dass es nicht dasselbe ist, ob die Menge eines Altruismusgens in der Gruppe zunimmt oder aber die Fitness von Altruisten im Vergleich zu Nichtaltruisten in einer Gruppe. In den 1970er Jahren formulierte Hamilton seine Theorie zusammen mit dem Theoretiker George Price um, diesmal unter dem Gesichtspunkt von Selektionsebenen. Zu seiner Überraschung stellte sich heraus, dass altruistisches Verhalten gegenüber Gruppenmitgliedern Fitnessnachteile bringt, selbst dann, wenn die Mitglieder eng miteinander verwandt sind. Aber den Berechnungen zufolge können Ausleseprozesse zwischen verschiedenen Gruppen in der Gesamtpopulation Altruismus fördern. Somit zählt nicht einfach, dass die Angehörigen einer Gruppe miteinander verwandt sind, sondern es kommt allgemeiner auf den Grad der genetischen Unterschiede zwischen den einzelnen Gruppen an.

Trotz dieser damals verblüffenden Erkenntnisse beharrten viele Forscher auf der etablierten Lehrmeinung, es gäbe nur Individualselektion. Doch aus heutiger Sicht erklären sich die weitaus meisten Eigenheiten, auf Grund derer ein Insektenstaat funktioniert, mit Gruppenselektion. Daneben gibt es auch einige Merkmale, die offenbar auf eine Auslese innerhalb der Angehörigen einer Kolonie zurückgehen. Solche Erscheinungen stören al-

WANN TRITT GRUPPENSELEKTION AUF?

Sehr oft steht tatsächlich die Individualselektion im Vordergrund. Doch ist das offenbar nicht bei allen Anpassungen die stärkste Selektions Ebene. Eine Reihe von Erscheinungen lassen sich mit Gruppenselektionsmechanismen plausibler erklären. Dies betrifft insbesondere so genannte Superorganismen wie die Staatsquallen und die Staaten bildenden Insekten.

lerdings meist eher die Funktion des Gesamtgebildes.

Einer von uns (E. O. Wilson) beschrieb Insektenstaaten als Fabriken in Festungen. Ob die Struktur eines Termitenbaus, die sozialen Kasten von Ameisen, die Verteidigungstaktiken von Wespen oder das System der Futtersuche von Honigbienen – immer handelt es sich um Gemeinschaftsaktivitäten. Deren Effizienz für das Kollektiv lässt sich ganz ähnlich bestimmen wie beim Einzelorganismus der Wert seiner ihm eigenen Anpassungen für dieses Individuum. Wird ein Termitenbau beschädigt, so beeilen sich Arbeiter, das Loch wieder zu schließen. Das erinnert stark daran, wie in unserem Körper verschiedene Zellen schnell dafür sorgen, eine Hautwunde zu beheben.

Die Evolution solchen Verhaltens bei Termiten mit einer Auslese auf Gruppenebene zu erklären, erscheint wesentlich plausibler, als sie auf die Individualektion innerhalb eines Sozialverbands zurückzuführen. Denn Gruppen, bei deren Mitgliedern Gene hierfür vorherrschen, sind gegenüber anderen Gruppen ohne solche Gene im Vorteil.

Selbstorganisation bei Staaten bildenden Insekten

Das Konzept der Verwandtenselektion hilft zwar viele Phänomene in der Natur besser zu verstehen. Jedoch führt es völlig in die Irre, wenn man es dort als Gegenmodell setzt, wo eigentlich eine Selektion zwischen Insektenstaaten stattfindet. Nach jenem Konzept sollte gleiches Verhalten zur genetischen Ähnlichkeit proportional sein. Benehmen sich Gruppenmitglieder gleich, besitzen sie demnach auch gleiche Gene. Dagegen ist zu sagen: Die Anpassungen, deretwegen ein Insektenstaat als Ganzes funktioniert, basieren gewöhnlich auf Prinzipien der Selbstorganisation. Einfache Verhaltensregeln auf der Individualebene ergeben auf Kolonieebene komplexe Muster. Zudem bewirken in selbstorganisierenden Systemen kleine Veränderungen auf tieferer Ebene oft große Umbrüche im Gesamtsystem. Somit können bei sozialen Insekten geringe genetische Unterschiede ein ganz anderes Verhalten des Staats zur Folge haben – und so einer Selektion auf Kolonieebene Material liefern.

Es gibt solitäre Bienen, die sich spontan Aufgaben teilen, wenn man sie zwingt, zusammenzuleben. Normalerweise besorgen sie alles allein: Nahrungssuche, Nestgraben, Bewachung und so weiter. Stößt eine solche Biene aber auf eine Artgenossin, die bereits eine bestimmte Arbeit ausführt, dann wechselt sie zu einer anderen Beschäftigung. Diese Arten verfügen über eine weitere so genannte Präadaptation (Voranpassung) für ein Zusammen-



MIT FROLD. GEN. VON BARBARA L. THORNE, UNIVERSITY OF MARYLAND

leben: Sie können Dominanzbeziehungen erstellen. In ihrem Fall resultiert daraus eine Rollenaufteilung, wer sich in der erzwungenen Gemeinschaft fortpflanzt und wer nicht. Man kann sich vorstellen, dass aus solchen Vorgaben mit wenig zusätzlichen Änderungen Insektenstaaten entstehen.

Die Idee, dass eine Gruppe einen gemeinsamen, kollektiven Verstand besitzt, ist nicht so verrückt, wie es klingen mag. Sie entspringt direkt dem Modell der Selektionsebenen. Auch kennen wir von Studien an eusozialen Insekten eindrucksvolle Beispiele dafür. Man vergleiche eine Entscheidungsfindung bei Honigbienen mit der eines Rhesusaffen. Nehmen wir an, der Affe habe zu bewerten gelernt, ob auf einem Monitor die Mehrzahl der wandernden Lichtpunkte nach rechts oder nach links zieht. Dorthin muss er den Kopf wenden. Die Entscheidung hängt davon ab, für welche Richtung mehr seiner Hirnneurone votieren. Vergleichbar bewerten schwärmende Bienen im Kollektiv mögliche neue Neststandorte.

Aber die gemeinsame Entscheidungsfindung beschränkt sich vermutlich keineswegs nur auf die Staaten bildenden Insekten. Auch wo die Gruppenmitglieder ansonsten miteinander konkurrieren, können gemeinsam erbrachte Beschlüsse allen nützen. Hinweise dafür fanden Forscher bei ganz verschiedenen Arten, darunter Kaffernbüffel und die Kaulquappen einer amerikanischen Kröte. Oft pflegen Biologen einen Gruppenkonsens als eigennütziges Verhalten jedes Einzelnen zu werten, weil dabei alle gewinnen. Nur erzielen die Gruppenmitglieder untereinander dann keine Fitnessunterschiede – das Merkmal könnte so nicht evolvieren. Folglich erfordert die Evolution von kollektiver Entscheidungsfindung eine Gruppenauslese.

Hier richten Termiten der Art *Nasutitermes corniger* ein neues Verbindungsstück von ihrem Nest zu einer Futterquelle ein. Die Arbeiter sind am größeren Körper und helleren Hinterleib erkennbar. Die Soldaten sind kleiner und dunkler. Sie halten am Rand Wache. Solches Verhalten kann sich nur durch den Vorteil erklären, den es dem gesamten Staat bringt.

Veranstaltungen im Darwin-Jahr unter: www.darwin-jahr.de

Tierzüchter sollten einkalkulieren, ob sie Individual- oder Gruppenselektion ausüben. Das Ergebnis ist oft ganz verschieden

Wenn Tierzüchter die unterschiedlichen Auswirkungen einer Individual- oder Gruppenselektion nicht einkalkulieren, erzielen sie manchmal unerwartete Ergebnisse. Ein Beispiel lieferte William Muir von der Purdue University in West Lafayette (Indiana). Der Verhaltensgenetiker züchtete Hühner auf höhere Legeleistung. Immer hielt er mehrere Hennen pro Käfig. In einer Serie verwendete er für die Weiterzucht jeweils die legefrohdigste Henne eines jeden Käfigs – er übte sozusagen eine Individualselektion aus. In einer zweiten Serie wählte er stets alle Hennen von Käfigen mit besonders hoher Gesamtlegeleistung aus – eine Gruppenselektion. Nach sechs Generationen war bei Einzelauswahl ein höchst aggressiver Hühnerstamm entstanden. Diese Hennen schikanierten einander bis aufs Blut – und legten mit jeder Generation weniger Eier, obwohl stets nur die legefrohdigsten Tiere weiterverwendet worden waren. Der Hintergrund: Wer im Käfig die meisten Eier legt, pflegt das seiner Dominanz zu verdanken, was in dem Fall mit einer ausgeprägten Tendenz einhergeht, die Käfiggenossinnen unterdrücken zu können. Bei der zweiten Versuchsserie stieg dagegen die Legeleistung um 160 Prozent, und diese Hühner gaben sich friedfertig.

Auch eine Selektion von Artengemeinschaften lässt sich austesten. In den 1990er Jahren ersann Charles Goodnight von der University of Vermont in Burlington geniale Experimente mit Reismehlkäfern. Von zwei ihrer Arten – A und B – gab er jeweils gleich viele Tiere zusammen in kleine Gefäße und ließ sie sich einige Wochen darin vermehren. Dann wählte er für den nächsten Durchgang die Schalen

mit den meisten Käfern der Art A. Das heißt, er selektierte auf eine hohe Dichte von Art A als Merkmal der Artengemeinschaft. Der Forscher setzte daraus aber wiederum gleich viele Käfer beider Arten in die neuen Gefäße. Beide zusammen bildeten somit eine Selektionseinheit. Mit der Zeit stieg die Anzahl – die Dichte – der Käfer von Art A immer mehr an. Man hätte annehmen können, dies sei das Ergebnis einer Selektion auf ein Merkmal der Art A. Als Goodnight aber die selektierten Käfer von Art A mit neuen Tieren von Art B zusammenbrachte, trat der Effekt nicht auf. Die höhere Dichte von Art A erwies sich somit als gemeinsame neue Eigenschaft beider Arten: Beide hatten sich genetisch verändert.

Kefir – ein selektiertes Ökosystem

Auf einer tieferen Selektionsebene wäre so etwas nichts Besonderes. Wenn Genetiker versuchen, die Flügellänge von Tauffliegen zu beeinflussen, verändern sich normalerweise Erbanlagen auf mehreren Chromosomen. Im übertragenen Sinn vertreten im geschilderten Experiment die beiden Käferarten zusammenspielende Gene verschiedener Chromosomen.

Eine noch höhere Selektionsebene erprobten William Swenson von der State University of New York und einer von uns (D. S. Wilson). Wir untersuchten, wie sich Ökosysteme von Mikroorganismen in kleinen Glasbehältern weiterentwickeln. Alle diese Ökosysteme stammten vom selben, gut durchmischten Tümpelwasser, so dass sie sich anfangs genetisch praktisch nicht unterschieden. Doch sehr bald wichen sie in messbaren Eigenschaften voneinander ab, etwa im pH-Wert oder darin, ob sie ein bestimmtes Gift abbauen konnten. Solche Merkmale verstärkten wir dann gezielt noch weiter, indem wir zur Weiterzucht jeweils Proben aus den Gläsern verwendeten, bei denen ein gewünschtes Merkmal am deutlichsten auftrat.

Wahrscheinlich entstanden die Hefe- und Bakteriengemeinschaften, mit denen das Sauermilchgetränk Kefir hergestellt wird, durch Selektion auf dieser Ebene. In jenem Fall richtet sich die Auslese nach dem Geschmack und der Gesundheitswirkung. Die Mischkulturen der »Kefirkörner«, mit denen die Milch beimpft wird, haften sogar von allein zusammen. Sicherlich könnte man ebenso für andere Zwecke Artengemeinschaften und Ökosysteme aus Mikroorganismen heranzüchten, zum Beispiel zum gezielten Giftabbau. Auch erwarten wir, dass bald natürliche Fälle von Selektion auf Arten- und Ökosystemebene gefunden werden.

Was uns Menschen betrifft, so sind individualistische Verhaltenstheorien erst seit einem halben Jahrhundert Mode. Davor verglich

Zu Recht nennen Entomologen Insektenstaaten Superorganismen. Komplexes Verhalten wie beim Nestbau – hier eine Wespenkolonie in Venezuela – erwächst durch Prinzipien der Selbstorganisation.



GARTENDEICHESE / FOTOLIA



DPA, PANZETI

Viele Verhaltenserscheinungen bei Menschen konnten Anthropologen mit Individualektion erklären. Trotzdem dürfte die Gruppenselektion wesentlichen Anteil an unserer Evolution gehabt haben.

man menschliche Gemeinschaften üblicherweise mit Organismen. Tatsächlich erinnern vom sozialwissenschaftlichen Funktionalismus geprägte Ansätze stark an naive Herangehensweisen in der Biologie bezüglich der Gruppenselektion. Beim Menschen unkritisch ein »Gruppenwohl« zu bemühen, ist aber natürlich genauso wenig gerechtfertigt wie bei anderen Lebewesen. Denn eine Selektion zwischen einzelnen Gruppen kann nur dann hervorscheinen, wenn sie stärker ist als die Individualektion unter den Gruppenmitgliedern.

Dies vorausgesetzt, behaupten wir dennoch einen starken Einfluss von Gruppenselektion auf die genetische und kulturelle Evolution des Menschen. Die Anzeichen mehren sich, dass als entscheidender Unterschied zu anderen Primaten bei unseren Vorfahren Fitnessunterschiede zwischen Gruppenangehörigen weitmöglichst in den Hintergrund gedrängt wurden. An Stelle dessen geriet die Selektion auf Gruppenniveau in den Vordergrund. Wildbeutergesellschaften geben sich streng egalitär. Man teilt zum Beispiel Fleisch ganz gewissenhaft untereinander. Männer mit Dominanzbestreben werden in die Schranken verwiesen. Eigennütziges Benehmen wird sanktioniert. Behaupten konnten sich diese Gesellschaften nur dank ihres ausgeprägten Gemeinsinns – dank Teamwork.

In der Evolution des Menschen dürfte die Selektion auf gemeinschaftliches Handeln schon früh eingesetzt haben. Menschenkinder weisen oft von sich aus auf Dinge, nur um sie jemandem zu zeigen. Das tun Schimpansen nie. Symbolisches Denken, Sprache und Informationsweitergabe stellen grundlegende Gemeinschaftsaktivitäten dar, die vertrauens-

würdige Sozialpartner voraussetzen. Zweifellos gibt es auch in diesen Verbänden Ausbeutung, Betrug und Ausnutzung anderer. Doch höchst bemerkenswert erscheint, wie stark alles Derartige von den anderen kontrolliert wird. Dass wir Selbstsucht schnell als höchst bedrohlich empfinden, mag auch auf dem uns innewohnenden Bestreben beruhen, solche Erscheinungen zu unterdrücken. Wir agieren da wie ein aufmerksames Immunsystem.

Gemeinsames Handeln half unseren Vorfahren, sich zu verbreiten und andere Menschenarten zu verdrängen. Obwohl die heutigen Menschen alle zur selben Art gehören, wurden sie kulturell so vielfältig, dass sie Hunderte ökologischer Nischen einnehmen. Zudem brachten Landwirtschaft und Sesshaftigkeit neue hierarchische Ebenen, so dass wir heute gleichzeitig unter- und übergeordneten Gruppierungen angehören. Gibt es auch in der kulturellen Evolution Anpassungen zum Wohl der Gruppe? Die Antwort lautet unbedingt: Ja. Anzunehmen, beim Menschen überwiege die Individualektion, ist für Homo sapiens genauso absurd wie für die Staaten bildenden Insekten.

Es kommt immer wieder vor, dass Dispute über Evolutionsmechanismen in heftige Gefechte ausarten. Werden sie später beigelegt, verstehen die Forscher die Aufregung bisweilen nicht mehr. Der Streit über die Evolutionsebenen ist noch nicht beigelegt. Als George Williams seine Thesen unterbreitete, half er einerseits schwierige wissenschaftliche Fragen klarer zu sehen. Andererseits erwies er der Wissenschaft keinen Dienst damit, dass er Anpassungen auf Gruppenebene jegliche Existenz absprach. Wir sollten endlich weniger extreme Selektionsmodelle siegen lassen. ◀



David Sloan Wilson (links) und **Edward O. Wilson** sind beide Evolutionsbiologen – und nicht miteinander verwandt. D. S. Wilson hat an der Binghamton University in New York eine Professur für Biologie und Anthropologie inne. E. O. Wilson ist als Ameisenforscher berühmt. Am Museum of Comparative Zoology der Harvard University in Cambridge (Massachusetts) ist er Professor und Kurator für Entomologie.

Wilson, D. S., Wilson, E. O.: Rethinking the Theoretical Foundation of Sociobiology. In: The Quarterly Review of Biology 82, S. 327 – 348, 2007.

Wilson, D. S.: Evolution for Everyone. Delacorte Press 2007.

Hölldobler, B., Wilson, E. O.: The Superorganism. Norton & Company, New York 2009.

© American Scientist
www.americanscientist.org

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/974634.

Den **KODE** **DES LEBENS** erweitern

Alles Leben basiert auf nur 20 Standard-Aminosäuren als Bausteinen der Eiweißmoleküle. Diese Auswahl wollen Wissenschaftler künstlich stark erweitern. Sie betreiben dazu eine Art Kode-Evolution im Labor – und erhoffen sich davon einen enormen Fortschritt für Biotechnologie und Medizin.

Von Nediljko Budisa
und Marc-Denis Weitze

Aus dem grün fluoreszierenden Protein einer Qualle ging durch gentechnische Veränderung das zyan fluoreszierende Protein (unten, türkis) hervor, hergestellt in Bakterien. Durch anschließende »kodetechnische« Manipulation entstand daraus eine goldorange wirkende Variante (rechts). Solche Leuchtproteine sind wichtige Forschungswerkzeuge.

Das entscheidende Experiment gelang am 27. Mai 1961 um drei Uhr morgens: Der deutsche Biochemiker Heinrich J. Matthaei, Mitarbeiter von Marshall Nirenberg an den National Institutes of Health in Bethesda (Maryland), hatte das erste Kodewort des genetischen Kodes entschlüsselt – mit Hilfe einer fingierten Genbotschaft. Fünf Jahre später war der komplette Kode geknackt, die Bauvorschrift des Lebens nun lesbar (siehe Abbildung S. 44).

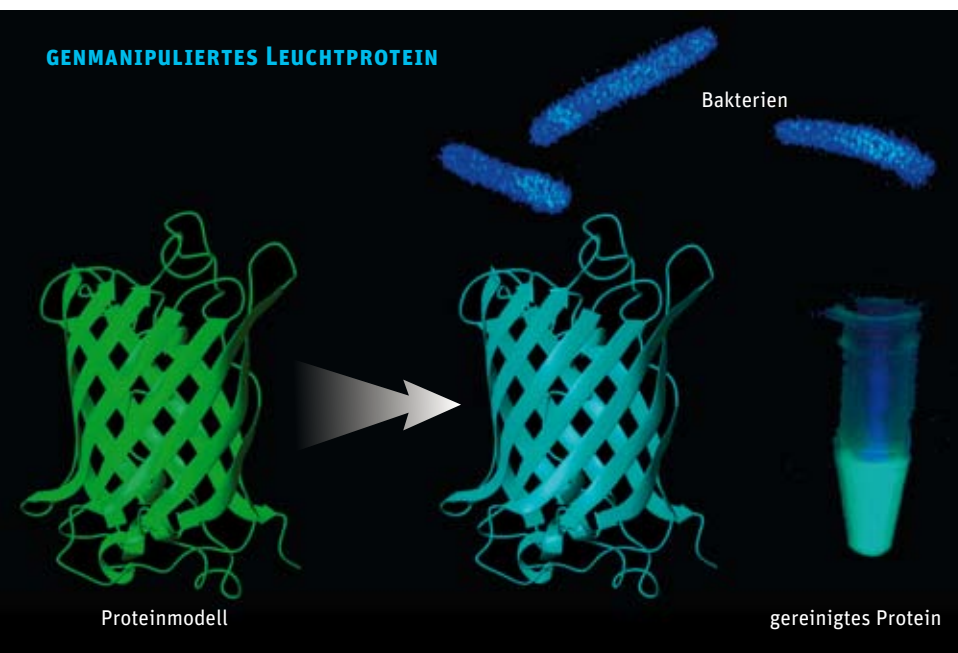
Das Erstaunliche an diesem Kode: Er wird von allen bekannten Lebensformen genutzt,

ob nun Virus, Bakterie, Pilz, Pflanze oder Tier, einschließlich des Menschen. Francis Crick, der 1953 mit James Watson die Doppelhelix-Struktur der DNA aufgeklärt hatte, stellte 1968 die Hypothese vom *frozen accident* auf, vom eingefrorenen Zufall – einmal festgelegt, schien die Sprache des Lebens für alle Zeiten unveränderbar (SdW 7/2004, S. 86).

Aber auch diese Sprache lebt, und längst sind natürliche Varianten des Kodes bekannt. An seinem Grundprinzip ändert sich aber dadurch nichts: Er ist ein Regelwerk, das jeder der 20 Standard-Aminosäuren für Proteine mindestens eines seiner möglichen Kodewörter zuordnet. Forscher aus dem Bereich der synthetischen Biologie arbeiten inzwischen daran, die Kodierungskapazität gezielt zu erweitern, um die Verwendung zusätzlicher und sogar unnatürlicher Bausteine für maßgeschneiderte neuartige Proteine zu ermöglichen (siehe Randspalte S. 44). Solche Eiweißmoleküle könnten von enormem Nutzen sein:

- etwa als Werkzeuge für die Forschung, um die Mechanismen des Lebens und die Prozesse bei der Entstehung von Krankheiten besser zu untersuchen;
- zur Diagnose oder zur Behandlung von schwer wiegenden Erkrankungen wie Krebs,
- zur Herstellung von neuen umweltfreundlichen Materialien oder beispielsweise von maßgeschneiderten Biomaterialien mit Eigenschaften und Funktionen, die in der Natur nicht vorkommen.

Im Wesentlichen steht dahinter die Hoffnung, dass kultivierbare Zellen mit erweitertem genetischem Kode einmal ein gewünschtes Produkt schnell, effizient und billig erzeugen können – wenn es gelingt, sie so auszustatten, dass sie nur Wasser, Salze, Spurenelemente und einfache Kohlenstoffquellen dazu benötigen.



ABBILDUNGEN DIESER DOPPELSEITE MIT FRIEDRICH GEN. VON NEDILJKO BUDISA

Das »erlaubte« Aminosäure-Repertoire des Kodes zu erweitern, um neuartige Proteine zu schaffen, ist daher nicht nur wissenschaftliche Herausforderung und Chance, sondern darüber hinaus von enormem wirtschaftlichem Interesse. Das Forschungsfeld ist zwar noch recht neu; es hat sich erst in den letzten zwei Dekaden entwickelt. Aber dank der großen Fortschritte in der Gentechnologie rückt nun auch eine »Kodetechnologie« näher – und damit die Schaffung von Designerzellen, in denen nicht nur der Gertext gezielt verändert wurde, sondern überdies sein Übersetzungsschlüssel.

Was auf den ersten Blick wie die gewagte Idee eines Sciencefictionautors anmuten mag, ist gar nicht so abwegig. Denn es gibt Organismen, bei denen sich im Lauf ihrer Evolution die Interpretation des Kodes ein wenig geändert und sogar das Aminosäure-Repertoire etwas erweitert hat.

Am Übersetzungsschlüssel drehen

So wiesen Forscher Mitte der 1980er Jahre nach, dass ein Bakterium eine 21. Aminosäure auf raffinierte Weise im Code zu berücksichtigen vermag: das Selenocystein. Mittlerweile kennt man mehrere natürliche Proteine mit diesem ungewöhnlichen Baustein – nicht nur bei herkömmlichen Bakterien, sondern auch bei Archaeen (früher Archaeobakterien genannt) und sogar bei höheren Organismen bis hin zum Menschen. Demnach handelt es sich um keine zufällige Ausnahme, sondern vielmehr um eine evolutionär sinnvolle Ergänzung des biologischen Grundrepertoires. Im Jahr 2002 kam sogar noch eine 22. Aminosäure für Proteine hinzu: Pyrrolysin, hergestellt von einigen Archaeen; sie bauen es in bestimmte Enzyme ein, die der Erzeugung von Methan dienen. Was in der Natur möglich ist, sollte sich auch im Labor für eine künstliche Erweiterung des Kodes nutzen lassen – sofern man die Schlüsselstellen kennt, die es zu manipulieren gilt.

Der genetische Text ist bekanntlich mit einem Alphabet aus nur vier chemischen Buchstaben verfasst (siehe Randspalte S. 45) und enthält in Form dreibuchstabiger Kodewörter die verschlüsselte Bauanweisung für Proteine. Insgesamt sind 64 verschiedene Dreierkombinationen möglich, auch Triplets oder Codons genannt. Davon dienen 61 als Kodewörter für die 20 Standard-Aminosäuren und drei in der Regel als Stoppsignale am Ende der Bauanweisung für ein Protein (siehe Grafik S. 44). Der natürliche Code ist also nicht der Text selbst, sondern eine Art Übersetzungsschlüssel der Gensprache in die Proteinsprache, mit einer ziemlichen Redundanz.

Nun sind lebende Zellen komplexe Gebilde, die nicht jede Manipulation verkraften. Angenommen, man will mindestens eines der Kodewörter zweckentfremden und einer unnatürlichen Aminosäure zuordnen. Dann ist in aller Regel dafür zu sorgen, dass diese Neuordnung hauptsächlich ein einzelnes Protein betrifft – und das zum richtigen Zeitpunkt, da unnatürliche Aminosäuren meist das Zellwachstum hemmen. So etwas ist nur im Rahmen gentechnischer Verfahren machbar, die eine Kontrolle über die biologische Produktion erlauben. Sonst würde der Zellhaushalt von Anfang an völlig durcheinandergebracht, der Organismus also in seinen Lebensfunktionen schon wesentlich beeinträchtigt, bevor er biotechnologisch Nützliches vollbringt.

Wie ließe sich nun eines der normalen Kodewörter – ein Aminosäure- oder ein Stopp-Codon – in lebenden Zellen zweckentfremden? Welche molekularen Akteure gilt es zu beeinflussen? Betrachtet man zunächst die üblichen Abläufe bei der Übersetzung der genetischen Bauanweisung in ein Protein (siehe Grafik S. 45), so wird schnell klar: Dreh- und Angelpunkt ist eine Familie von Enzymen mit dem komplizierten Namen Aminoacyl-tRNA-Synthetasen. Ohne diese enzymatischen Helfer kann die genetische Bauanleitung nicht vorschriftsgemäß ausgeführt werden.

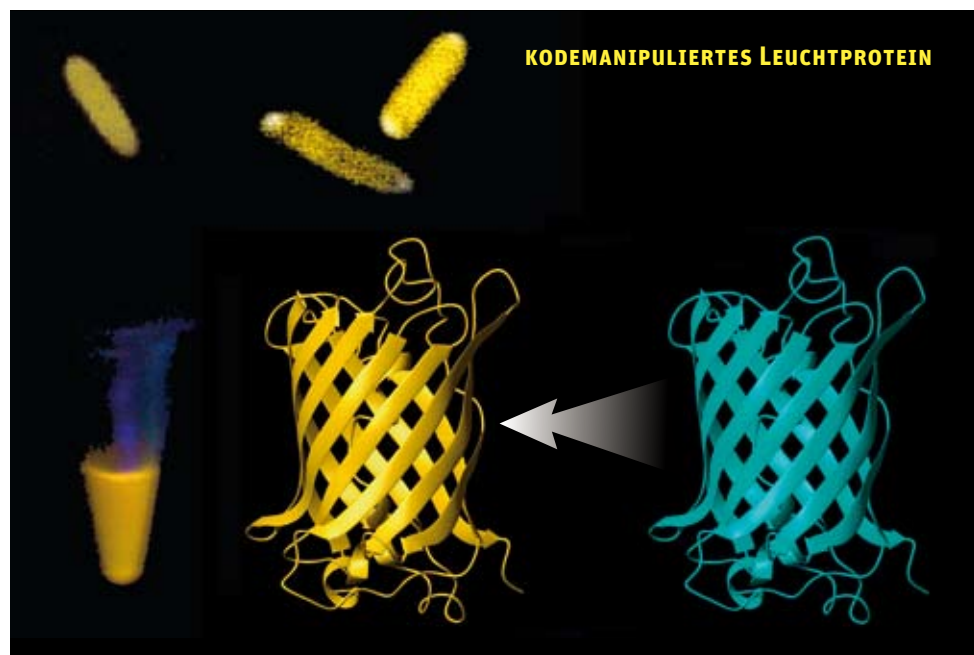
Von der Originalbauanleitung auf der Erbsubstanz DNA wird zunächst eine chemische Blaupause angefertigt, die so genannte Boten-RNA. Sie wandert zu den Eiweißfabriken der Zelle. Dort wird sie gelesen und in eine Abfolge von Aminosäuren übersetzt. Dies geschieht je-

In Kürze

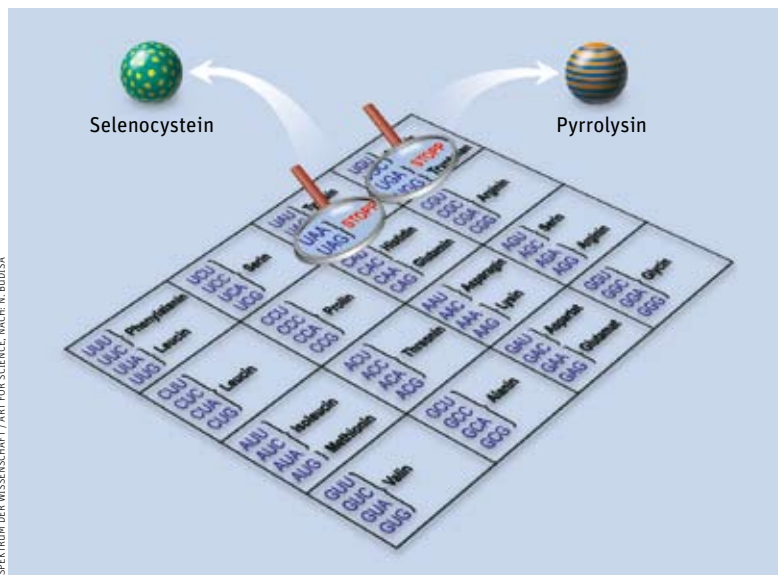
► **Herkömmliche Gentechnik** verändert zwar den genetischen Text, nicht aber den zugehörigen Übersetzungsschlüssel: den genetischen Code. Darin ist jeder der 20 Standard-Aminosäuren für Proteine mindestens ein Kodewort zugeordnet.

► Wissenschaftler sind nun dabei, den genetischen Code zu erweitern, um den **Einbau unnatürlicher Aminosäuren** in Eiweißstoffe zu ermöglichen.

► Diese »**Kodetechnologie**« verkörpert wie kein anderes modernes Forschungsfeld einen Übergang von der klassischen gentechnischen Ära zum **Zeitalter der synthetischen Biologie**.



DER GENETISCHE KODE



Je drei aufeinander folgende Basen der DNA

beziehungsweise der Boten-RNA bilden ein Kodewort. Drei dieser so genannten Codons (UAG, UAA und UGA) dienen normalerweise als Stoppsignal, die anderen stehen für eine der 20 Standard-Aminosäuren, die in Proteine eingebaut werden können. Wie für die Stoppsignale gibt es auch für die meisten Aminosäuren mehr als ein Codon. Der Kode ist also redundant. Zwei weitere Aminosäuren (Kugeln) werden in ausgewählte Proteine eingebaut, wenn ein bestimmtes Stoppsignal im Kontext einer Zusatzsequenz auftritt.

Von diesem Zuordnungsschema sind natürliche Abweichungen bekannt. Forscher versuchen, künstliche Abweichungen mit unnatürlichen Aminosäuren zu erzielen, also den Kode und damit das nutzbare Aminosäure-Repertoire zu erweitern.

doch nicht direkt, sondern mittels eines Sortiments von Adaptermolekülen: den Transfer-RNAs (kurz tRNAs), die jeweils eine bestimmte Aminosäure als Fracht erhalten. Hier kommen die Aminoacyl-tRNA-Synthetas ins Spiel, die das korrekte Beladen des Frachters übernehmen. Für jedes Nicht-Stop-Codon existiert ein eigenes Adaptermolekül mit dazu passendem Beladungsenzym, das die richtige Aminosäure auflädt. Das jeweilige Enzym dient somit gleichzeitig als Helfer und als Kontrollinstanz für die Korrektheit der Übersetzung.

Will man nun ein Codon für andere Zwecke nutzen, gilt es eben diesen Beladungshelfer auszutricksen. Er arbeitet zwar sehr genau, und ihm stehen zudem eine ganze Reihe weiterer Kontrollinstanzen zur Seite, um Fehler zu vermeiden, doch gibt es offenbar ein paar Schlupflöcher, die Wissenschaftler zur Koderweiterung nutzen können.

So lässt sich der Beladungshelfer unter Umständen überlisten, wenn die gewünschte unnatürliche Aminosäure seiner natürlichen sehr ähnlich ist, letztere aber fehlt. Das Resultat: Statt des normalen Bausteins würde beim Auftreten eines bestimmten Codons dann der von den Forschern bevorzugte Ersatz in ein Protein eingebaut werden. Denkbar wäre auch, das Helferenzym selbst durch geschickte Mutation derart zu verändern, dass es andere Bausteine als seine Standard-Aminosäure akzeptiert. Und schließlich könnte man die Kontrollinstanz der Ladehelfer umgehen – etwa durch nachträgliche enzymatische oder chemische Veränderung einer Aminosäure, die bereits an ihrer Transfer-RNA hängt.

So viel zur Theorie. Wie aber lässt sich all dies praktisch bewerkstelligen, ohne den ganzen Zellhaushalt durcheinanderzubringen?

Eine naheliegende Möglichkeit besteht darin, die nötige Maschinerie einfach gänzlich aus der lebenden Zelle ins Reagenzglas zu verlegen und bedarfsgerecht zu manipulieren. Auf ebendiese Weise hatten Matthaei und Nirenberg in den frühen 1960er Jahren mit ihrer künstlichen Boten-RNA das erste Kodewort zu entschlüsseln vermocht.

Besser: lebende Produzenten

Die Verlegung ins Reagenzglas, ein noch immer beliebter Weg für verschiedene Zwecke, bietet einen entscheidenden Vorteil: Die Experimentatoren müssen keinerlei Rücksicht nehmen auf Einschränkungen durch die Gegebenheiten in einer Wirtszelle. So wird es auch möglich, mit künstlich synthetisierten Aminosäuren zu arbeiten, die sonst Probleme machen: weil sie auf Grund ihrer chemischen Anhängsel so groß sind, dass Zellen sie gar nicht aufnehmen, oder weil sie in einer Weise mit zellulären Komponenten reagieren, so dass sie lebenswichtige Mechanismen stören.

Ein Experimentator kann heute beispielsweise zunächst auf chemischem oder gentechnischem Weg eine gezielt veränderte Transfer-RNA herstellen – beladen mit jeder beliebigen Aminosäure, die wahlweise eine große Zahl verschiedener chemischer Anhängsel mit unterschiedlichsten gewünschten Eigenschaften trägt. Das Konstrukt wird dann in einem Reagenzglassystem, das die Blaupause für ein interessierendes Zielprotein enthält, während der

INFO I

► **Proteine** sind Ketten von Aminosäuren, deren Abfolge letztlich die Funktion des Eiweißstoffs bestimmt. Eine Vielzahl von **Aminosäuren** kommt in der Natur vor, Zellen verwenden aber nur 20 standardmäßig für Proteine. Für diese Bausteine gibt es ein eigenes Kodewort im genetischen Kode. Sie heißen daher auch kanonische Aminosäuren.

► Wenn im Artikel von »**unnatürlichen**« Aminosäuren die Rede ist, dann sind sowohl synthetische Verbindungen gemeint als auch natürliche Aminosäuren, die für Proteine sonst unüblich sind.

Übersetzung – der Translation – für den Einbau der neuartigen Aminosäure sorgen. Die Blaupause wiederum lässt sich so konzipieren, dass sie das fragliche Codon nur an den Stellen enthält, wo der neue Baustein im Produkt erscheinen soll; immer dort aber, wo die ursprüngliche Bedeutung erhalten bleiben soll, trägt sie eines der synonymen, redundanten Codons.

Doch die Sache hat einen Haken: Die Proteinsynthese läuft im Reagenzglas selbst bei normalen Komponenten so ineffizient ab, dass es derzeit nicht möglich ist, auf diese Weise Eiweißmoleküle in großem Maßstab herzustellen. Vorerst bleibt die synthetische Translation daher eine Methode, die ausschließlich zum Experimentieren im Labor taugt. Was aber vielleicht nach Spielerei aussieht, trägt entscheidend dazu bei, die Prinzipien des Lebens besser zu verstehen, und zu prüfen, auf welche Weise sich der Kode zumindest theoretisch auch in der lebenden Zelle beeinflussen ließe.

Will man dagegen in größerer Menge neue Proteine mit alternativen Bausteinen herstellen, so braucht es biotechnologisch nutzbare Produktionszellen – nebst einigen Kunstgriffen, um überhaupt Kodewörter umwidmen zu können. Einen Weg wiesen die Zellen selbst. Schon seit der Aufklärung des genetischen Kodes sind Transfer-RNAs bekannt, die ein Stopp-Codon ausgleichen können, wenn es durch Zufallsmutation inmitten einer Bauanweisung für Proteine auftritt. Sie setzen dann immer eine bestimmte Aminosäure als Lückenbüsser ein, unterdrücken also das störende Stopp-Codon.

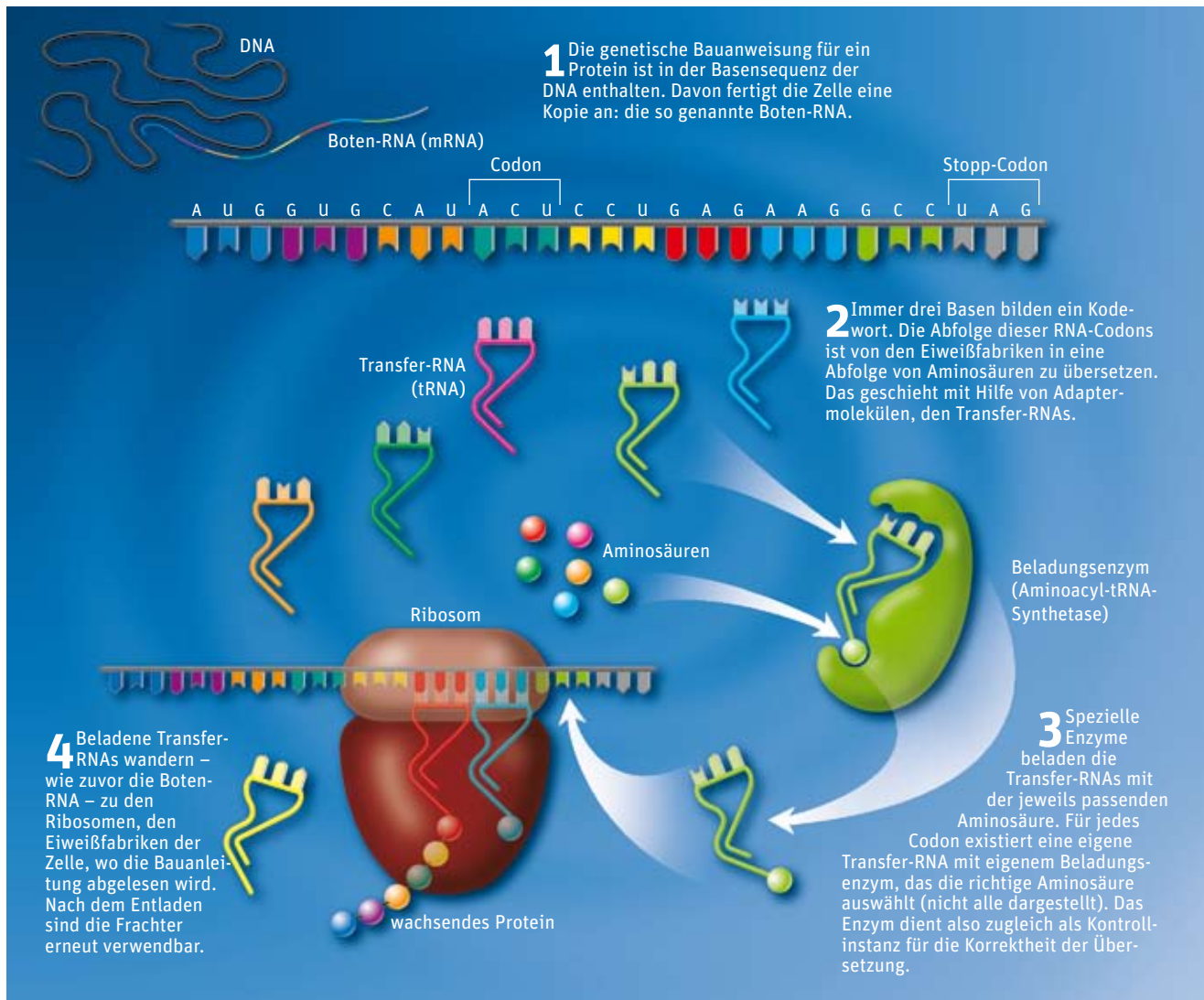
Ein ähnliches Prinzip nutzen Wissenschaftler neuerdings bei Mikroorganismen wie Bakterien oder Hefen für ein künstliches Umbelegen des Kodes – aber kontrolliert für ein einzelnes zu erzeugendes Zielprotein. Ohne ausgefeilte Gentechnik wäre das nicht möglich. Einerseits muss eine Transfer-RNA so umkonstruiert werden, dass sie das gewählte Stopp-Codon erkennt, und andererseits das

INFO II

► Die Erbsubstanz DNA ist eine Art Buch: Die Abfolge ihrer Basen A (Adenin), T (Thymin), G (Guanin) und C (Cytosin) stellt den genetischen Text dar.

► In der chemischen Abschrift der DNA, der Boten-RNA, ist der Buchstabe T durch U (Uracil) ersetzt.

Bei der normalen Biosynthese von Proteinen spielen die Enzyme, welche die Transfer-RNAs beladen, eine Schlüsselrolle, da sie zugleich die Korrektheit der Übersetzung kontrollieren.



zugehörige Beladungsenzym so manipuliert werden, dass es nur die gewünschte künstliche Aminosäure auflädt. Allerdings bedarf es einiger Umwege, um die Korrekturmechanismen der Zelle auszutricksen.

Dazu macht man sich die Tatsache zu Nutze, dass Lebewesen zwar im Wesentlichen denselben genetischen Code verwenden, sich aber in den ihn übersetzenden Molekülen unterscheiden können – sogar erheblich, wenn zwei Organismen evolutionär gesehen weit ge-

nug auseinanderliegen. Das ist etwa zwischen dem Darmbakterium *Escherichia coli* und der einzelligen Bäckerhefe der Fall, zwei beliebten Studienobjekten von Molekularbiologen. Ein Beladungsenzym des Bakteriums wird seine Aminosäure mit der zugehörigen arteigenen Transfer-RNA koppeln. Mit der entsprechenden Transfer-RNA aus einer Hefezelle weiß das Enzym jedoch nichts anzufangen.

Zur Erweiterung des Kodes ist es somit sinnvoll, auf ein interessierendes Frachter-Ladehelfer-Paar aus einem fremden Organismus zurückzugreifen – also etwa aus einer Hefezelle, wenn das Aminosäure-Repertoire eines Bakteriums wie *E. coli* aufgestockt werden soll. Zunächst wird die gewählte fremde Transfer-RNA auf Gen-Ebene verändert, damit ihr Adapterkopf das vom Bakterium selten genutzte Stopp-Codon UAG erkennt. Parallel dazu entwickelt man in mehreren gezielten Mutationsrunden ein entsprechendes Beladungsenzym, bis es in der Lage ist, die neue unnatürliche Aminosäure auf den Frachter zu packen (siehe untere Reihe Kästen links). Die Gene für dieses Paar werden mit Schaltelementen versehen und in den gewünschten Mikroorganismus eingeschleust. Im Idealfall erkennt das Frachter-Ladehelfer-Gespann dort exklusiv die eigene unnatürliche Aminosäure und beteiligt sich nur auf Kommando an der ebenfalls steuerbaren Synthese des Zielproteins – was die Wirtszelle vor vorzeitigen Schäden bewahrt.

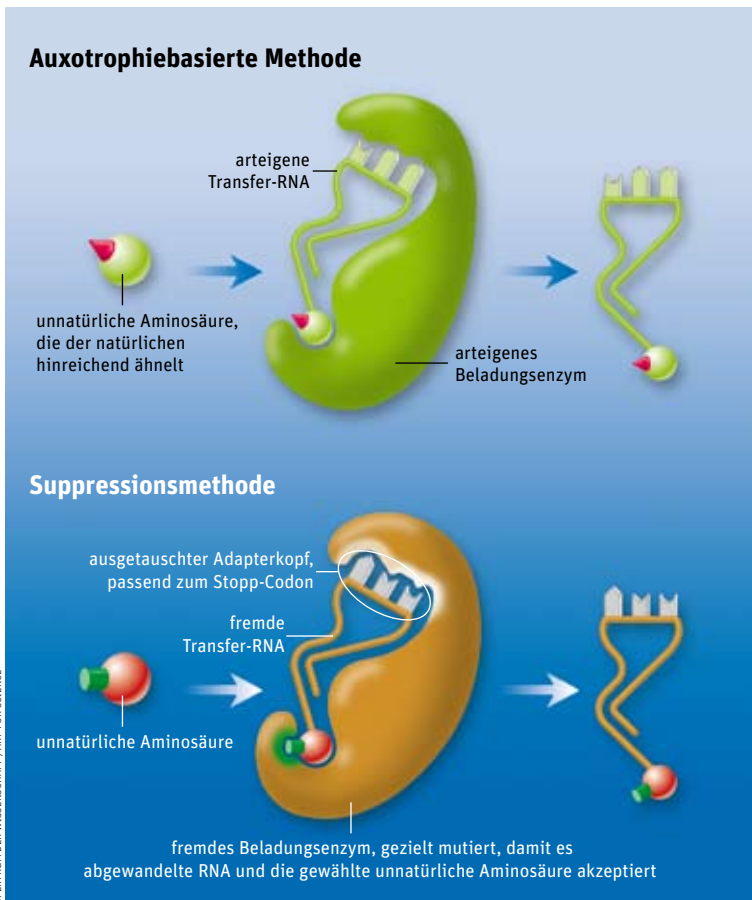
Ein solches Experiment, basierend auf einer Reihe von Vorarbeiten verschiedener Wissenschaftler, gelang erstmals 1997 Rolf Furter an der University of Massachusetts in Amherst. Als sein manipulierter Laborstamm des Darmbakteriums das Zielprotein herstellte, übersetzte die Zellmaschinerie das UAG-Stopp-Codon hocheffizient mit Fluoro-Phenylalanin (eine abgewandelte Aminosäure mit Fluoratom). In das Proteingen hatte der Forscher zuvor an gewünschter Stelle ein solches Stoppsignal eingefügt. Allerdings funktioniert das Ganze nur, wenn der fremde Baustein mit der Nährlösung zugeführt wird, da ihn das Bakterium nicht selbst herstellen kann.

Vier Jahre später verbesserten und perfektionierten Peter G. Schultz und seine Mitarbeiter vom Scripps Institute in La Jolla (Kalifornien) dieses Verfahren. Sie entwickelten ein ausgeklügeltes Selektionsverfahren, das eine relativ schnelle Evolution von geeigneten artfremden Frachter-Ladehelfer-Gespannen ermöglicht. Darüber hinaus gelang ihnen nach einigen weiteren geschickten Eingriffen ins Erbgut, dass das Bakterium die gewünschte unnatürliche Aminosäure auf Befehl sogar selbst herstellt.

DIE INTERPRETATION VON CODONS VERÄNDERN

Es gibt zwei Hauptansätze, um gezielt die Bedeutung von Codons in lebenden Zellen zu verändern und das Repertoire an Aminosäuren für biotechnologisch erzeugte Proteine aufzustocken. Der eine basiert auf so genannten auxotrophen Mikroorganismen, die nur eine bestimmte natürliche Aminosäure nicht mehr herstellen können. Hier lässt sich dem zuständigen Beladungsenzym (grün) eine unnatürliche Aminosäure unterschieben, wenn diese dem Vorbild hinreichend ähnelt.

Der andere Ansatz basiert auf einem Stopp-Codon, das gewissermaßen unterdrückt und einer künstlichen Aminosäure zugeordnet wird. Er führt über eine artfremde Transfer-RNA samt Beladungsenzym (orthogonales Paar genannt; braun), die man beide überdies manipulieren muss. Das Gen für das Protein, das biotechnologisch erzeugt werden soll, erhält zudem an der Position das gewählte Stopp-Codon, wo später die unnatürliche Aminosäure steht. Bei beiden Ansätzen sind weitere Vorkehrungen nötig, damit die Maßnahme sich nicht gleich auf alle Proteine auswirkt und den Zellhaushalt völlig durcheinanderbringt.



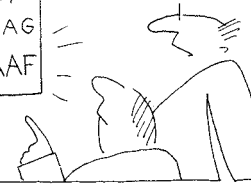
AUF DEM WEG ZUM KÜNSTLICHEN LEBEN

Eine Codon-Umwidmung, die das ganze Proteinsortiment einer Zelle verändert, führt gewöhnlich zum Absterben der Zelle. Selbst wenn Forscher beim Darmbakterium *Escherichia coli* nur das dort am seltensten genutzte der drei Stopp-Codons umbelegen, gibt es gravierende Probleme. Immerhin tragen mehr als 400 *E.-coli*-Gene dieses Stoppsignal (UAG) am Ende. George Church vom Massachusetts Institute of Technology arbeitet daran, jedes UAG durch eines der beiden anderen Stopp-Codons zu ersetzen. Das dann freie UAG könnte als Kodewort für irgendeine bisher beim Kolibakterium nicht vorkommende Aminosäure verwendet werden. Diese ließe sich gezielt in viele der Proteine einbauen: indem man dann in deren Gene das mit neuer Bedeutung belegte Kodewort an den gewünschten Stellen einführt.

Ähnliches ist für synonyme, redundante Kodewörter der natürlichen Aminosäuren denkbar. Für Arginin und einige andere Bausteine beispielsweise gibt es jeweils sechs Codons. Verschiedene Organismen haben aber unterschiedliche Favoriten: So nutzen Hefezellen für Arginin am häufigsten das AGA-Codon, Kolibakterien tun dies am seltensten.

Eine entscheidende Frage ist, ob man die Kodierungsredundanz und die unterschiedliche Nutzungshäufigkeit für eine Kodenerweiterung nutzen kann. Hilfreich wäre eine Technologie, um die Zusammensetzung des Genoms eines Organismus zu kon-

TGAACGTGAA
TACTCGGCGT
AACTTTACT
GCATAGTCAG
TCGATALAAF



WIR HÄTTEN DOCH NICHT EINEN BIOTECHNIKER AUS KÖLN EINSTELLEN SOLLEN!

OH

trollieren oder die Entdeckung einer Zelle, die nicht alle verfügbaren Codons für die Proteinsynthese benutzt. Daran arbeiten einige Wissenschaftler – darunter einer von uns (Budisa) mit seiner Arbeitsgruppe »Molekulare Biotechnologie«.

Eine interessante Alternative könnten anvisierte Designermikroben bieten, die nur noch die zum Überleben absolut nötige Minimalausstattung an Genen enthalten, zusätzlich einiger Gene für eine ausgewählte Funktion (siehe auch SdW 11/2008, S. 82). Diese ließen sich theoretisch von allen redundanten Codon-Varianten befreien, so dass schließlich 43 Kodewörter frei würden – belegbar für neuartige Aminosäuren in zu produzierenden Kunstproteinen. Das ist aber noch Zukunftsmusik.

Geradezu simpel erscheint dagegen eine andere Methode, deren Grundprinzip wiederum bereits aus der vor-gentechnologischen Ära stammt (siehe obere Reihe im Kasten links). Statt dem Repertoire zusätzliche Proteinbausteine hinzuzufügen, wird hier einer der etablierten Bausteine gegen einen neuartigen ausgetauscht. Somit wird die Deutung eines bestehenden Aminosäure-Kodeworts und nicht die eines Stopp-Codons verändert.

Futter für Produktionsbakterien

Grundlage hierfür bilden Bakterienstämme, die eine bestimmte natürliche Aminosäure nicht mehr selbst herstellen können, sondern über das Nährmedium aufnehmen müssen. Man spricht von auxotrophen Stämmen. Im Fall des Darmbakteriums entdeckten Georges Cohen und Dean Cowie am Pariser Pasteur-Institut bereits 1957 eine inzwischen berühmte Besonderheit bei einer »hilfsbedürftigen« Variante: Statt der fehlenden natürlichen Aminosäure Methionin ließ sich dem Stamm das ähnliche unnatürliche Selenomethionin unterschieben – es wurde in alle Proteine des Bakteriums eingebaut, ohne schwer wiegende Probleme zu verursachen!

Dieses Verfahren ist noch heute in der Forschung aktuell. Nützlich erwies es sich beispielsweise zur Aufklärung der räumlichen Struktur von Eiweißmolekülen. Die veränderten Eigenschaften des Moleküls auf Grund

des Selenatoms im ehemaligen Methionin erleichtern die Röntgenstrukturanalyse.

Im Gegensatz zu Selenomethionin behindern aber alle anderen unnatürlichen Aminosäuren das Zellwachstum, gleich ob kultivierte Kolibakterien, Hefe- oder Säugerzellen. Trotzdem lassen sich mit dieser Methode auch dort einzelne Zielproteine effizient mit gewünschten unnatürlichen Aminosäuren ausstatten.

Der Schlüssel ist wiederum die Gentechnologie, die in den 1980er Jahren entwickelt wurde und es ermöglicht, fremde Gene einzuschleusen und die Produktion des gewünschten Produkts von außen steuerbar zu machen. Richtig gefüttert vermehren sich die manipulierten auxotrophen Bakterien weiter. Ein Teil der Zellen wird jeweils in ein Nährmedium überführt, das eine begrenzte Menge der nötigen natürlichen Aminosäure enthält. Ist diese aufgebraucht, teilen sich die Zellen nicht mehr weiter, haben aber bis dahin die gewünschte Stückzahl erreicht. Dann startet man von außen die Massenproduktion des Zielproteins und gibt gleichzeitig die unnatürliche Ersatz-Aminosäure dazu. In geringerer Menge werden jetzt notgedrungen auch die übrigen Eiweißstoffe damit hergestellt. Das Bakterium kann sich zwar so nicht mehr teilen, reichert aber das gewünschte Zielprotein an, bis seine Energiereserven verbraucht sind. Die Zellmasse wird danach gewissermaßen »geerntet«.

Statt dem Repertoire zusätzliche Proteinbausteine hinzuzufügen, wird einer der etablierten Bausteine gegen einen neuartigen ausgetauscht

Freilich ist auch hier die Auswahl der möglichen unnatürlichen Aminosäuren beschränkt. Es kommen zunächst nur solche in Frage, die eine Zelle aufzunehmen vermag. Vor allem aber muss der alternative Baustein zumindest so viel Ähnlichkeit mit seinem natürlichen Vorbild aufweisen, dass das zuständige arteilene Beladungsenzym ihn überhaupt erkennen und mit der entsprechenden Transfer-RNA zusammenführen kann.

Bislang ist bei keiner der geschilderten Methoden ein stabiles, dauerhaftes Zellwachstum mehr möglich, auch wenn die Umwidmung eines Codons überwiegend auf ein einzelnes Protein abzielt. Gelingen es mehr oder weniger schadlos, die Neuordnung bestimmter Kodewörter auf alle Proteine in einer Zelle (ihr gesamtes Proteom also) zu übertragen, so wäre das ein entscheidender Schritt hin zur Schaffung künstlichen Lebens. Davon ist die Kodetechnologie zwar noch weit entfernt, aber erste Ansätze dazu werden unternommen (siehe Kasten S. 47). Auch anomale, beispielsweise vierbuchstabile Kodewörter oder zusätzliche neuartige Basenpaare für die DNA werden inzwischen erprobt, allerdings nur im Reagenzglas (siehe Kasten S. 50).

Gegenwärtig ist aber die Arbeit mit auxotrophen Organismen, denen man andere Proteinbausteine unterschiebt, noch die Methode der Wahl, wenn es um anwendungsorientierte Kodemanipulation geht. Einem von uns (Budisa) ist hier ein entscheidender Durchbruch zu einer konkreten Anwendung der synthetischen Biologie gelungen. Das Ergebnis: eine interessante Variante des grün fluoreszierenden

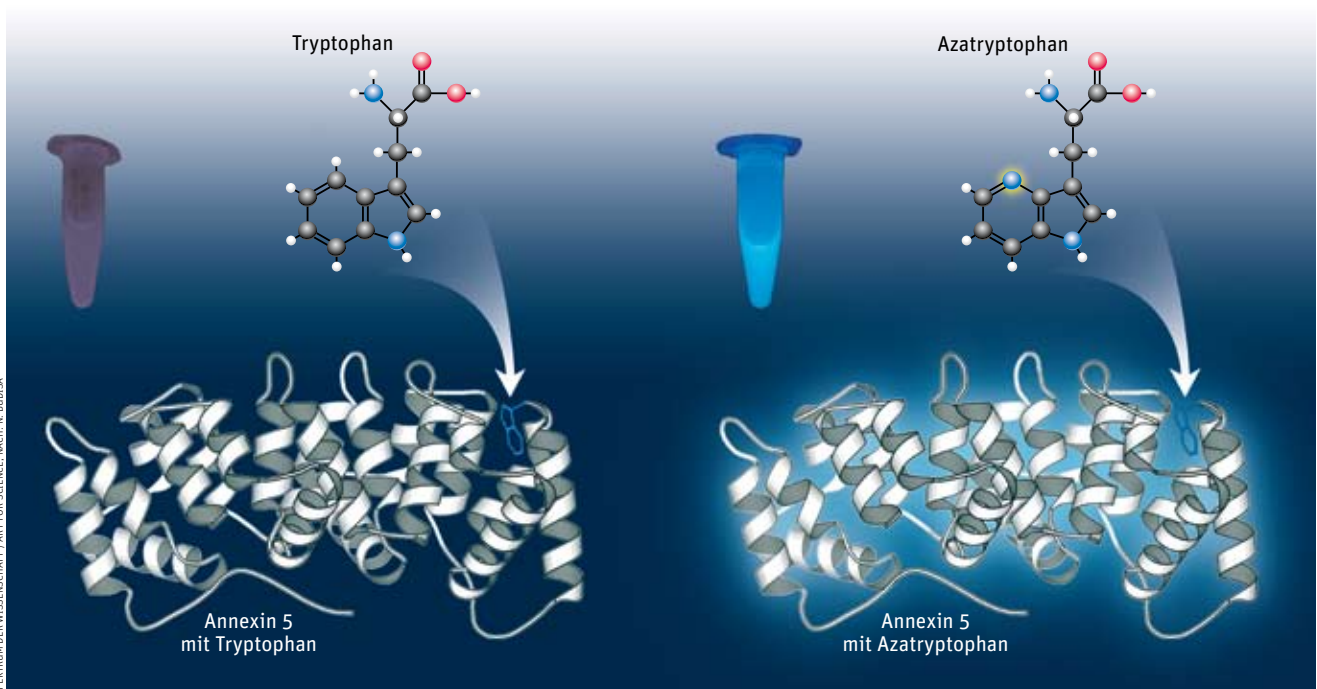
Proteins, kurz GFP genannt. Dabei handelt es sich um ein Eiweißmolekül, das ursprünglich aus der Qualle *Aequorea victoria* stammt. Mit einer herkömmlichen gentechnischen Veränderung hatten andere Forscher eine erste Variante erzeugt, die bei Anregung mit blauem oder ultraviolettem Licht bläulich türkis (zyan) fluoresziert. Das Protein findet in der Zellbiologie Verwendung, etwa um Wanderung und Aufenthaltsort damit markierter Zellstrukturen im Mikroskop zu beobachten (der Nobelpreis für Chemie 2008 drehte sich um GFP und seine Anwendung; SdW 12/2008, S. 14). Für seine Gewinnung in großem Maßstab greift man heute längst auf gentechnisch veränderte Bakterien oder Hefen zurück.

In Gold verwandelt

Einer von uns (Budisa) nutzte mit seiner Arbeitsgruppe entsprechende Kolibakterien für die Zyan-Form, welche die Aminosäure Tryptophan nicht mehr selbst herstellen kann, und »zwang« sie, an Stelle dieses Standardbausteins das ähnliche Aminotryptophan aus der Nährlösung aufzunehmen. Es weist wegen seiner zusätzlichen Aminogruppe andere physikalisch-chemische Eigenschaften auf. Davon erhoffte sich das Team einen neuen biologischen Leuchtstoff, ohne dass sich die natürliche räumliche Struktur des Proteins grundlegend verändert, wie das bei einer herkömmlichen Genveränderung oft der Fall wäre. Tatsächlich lässt das Aminotryptophan, einmal in das Zyan-Fluoreszenzprotein eingebaut, dieses goldorange statt bläulich türkis leuchten (siehe Abbildungen S. 42 und 43). Damit war

- Sauerstoff
- Kohlenstoff
- Stickstoff
- Wasserstoff

Für Forschungszwecke wäre es bei kleinen nicht leuchtenden Proteinen ideal, könnte man sie selbst zur Fluoreszenz bringen, ohne ihre räumliche Struktur zu verändern. Einer der Autoren zwang Produktionsbakterien dazu, ein Codon anders zu interpretieren. Diese bauten dann die zugeführte unnatürliche Aminosäure Azatryptophan in das zu erzeugende Fremdprotein ein, das daraufhin deutlich blau fluoreszierte. Die Bakterien stellen inzwischen auf Kommando den unnatürlichen Grundbaustein sogar selbst her.



nature

Explore nature.com/nature and access these great features online now!

Authoritative content



Online archives



Regular supplements



Web focuses



Nature Podcasts



Video streaming



Nature News



Blogs

www.nature.com/nature

nature publishing group 

SUPERKODES UND QUADRUPLЕТTS



Abgekoppelt von den biologischen Gesetzen, die in einer Zelle herrschen, ist es sogar denkbar, ein neues Codesystem zu kreieren, etwa durch »Verlängern« der dreibuchstabigen Codewörter – der Basen-Triplets – mit einem der normalen vier Buchstaben des genetischen Alphabets. Ansätze wie der Vierfachkode der japanischen Forscher um Masahiko Sisido von der Universität Okayama eröffnen völlig neue Dimensionen: Statt der 64 (4 x 4 x 4) natürlich vorkommenden Triplet-Variationen erlauben die Quadruplets ganze 256 (4 x 4 x 4 x 4) Kombinationen. Damit ließen sich weit mehr unnatürliche Aminosäuren verschlüsseln als durch Umwidmung redundanter Codons. Die Umsetzung verlangt aber nicht bloß neue Transfer-RNAs samt deren Helferenzymen. So konstruierte Jason Chin von der britischen Universität Cambridge neue Ribosomen, die ein Leseraster aus Quadruplets statt Triplets überhaupt bearbeiten können – alles freilich nur im Reagenzglas.

Wissenschaftler um Peter G. Schultz vom kalifornischen Scripps Institute beispielsweise tüfteln an einer künstlichen Erweiterung des genetischen Alphabets um ein weiteres, neuartiges Basenpaar. Mit sechs Variablen, statt wie bisher vier, ließe sich der genetische Kode auf 216 (6 x 6 x 6) Triplet-Kombinationen ausweiten. Allerdings hätte die Einführung eines zusätzlichen künstlichen Basenpaars weit reichende Folgen für die Struktur der DNA – eine Kompatibilität mit der zellulären Lese- und Übersetzungsmaschinerie zu erzielen, dürfte mehr als schwierig werden.

Um den Text des Lebens neu zu erfinden, reicht es eben nicht, an einer einzigen Schraube zu drehen. Es gilt, auch Lösungen für die Folgen zu finden, die sich aus einer einzelnen Veränderung im gesamten System ergeben.



Nediljko Budisa ist Nachwuchsgruppenleiter am Max-Planck-Institut für Biochemie in Martinsried bei München. Geboren in Kroatien, studierte er Chemie, Biologie, Molekularbiologie und Biophysik an der Universität Zagreb. Er promovierte 1997 in der Gruppe von Nobelpreisträger Robert Huber am Max-Planck-Institut für Biochemie und habilitierte im Jahr 2005 an der TU München. **Marc-Denis Weitze** promovierte 1997 an der TU München in Theoretischer Chemie und schloss kurz darauf an der Universität München ein Philosophiestudium ab. Nach langjähriger Tätigkeit am Deutschen Museum in München arbeitet er seit 2007 als wissenschaftlicher Referent bei der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften (acatech).

Budisa, N.: Engineering the Genetic Code: Expanding the Amino Acid Repertoire for the Design of Novel Proteins. Wiley-VCH, Weinheim 2006.

Freeland, S. J., Hurst, L. D.: Der raffinierte Code des Lebens. In: Spektrum der Wissenschaft, S. 86–93, Juli 2004.

Kay, L. E.: Das Buch des Lebens. Suhrkamp, Frankfurt 2005.

Witschi, B., Budisa, N.: Natural History and Experimental Evolution of the Genetic Code. In: Applied Microbiology and Biotechnology 74 (4), S. 739–753, März 2007.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/974635.

der Übergang von einer klassischen gentechnischen Veränderung zu einer kodetechnischen Veränderung geschafft.

Das gold fluoreszierende Protein, wie die neue Variante getauft wurde, ist ein nützliches Werkzeug, wenn Forscher bei Untersuchungen unter dem Fluoreszenzmikroskop mehrere zelluläre Strukturen gleichzeitig verfolgen wollen: Beide Formen des Leuchtproteins absorbieren Licht derselben eingestrahlten Wellenlänge.

Eines der nächsten großen Ziele ist nun, das Bakterium genetisch so auszurüsten, dass es den synthetischen Baustein selbst auf Kommando herzustellen vermag. Außerdem will die Arbeitsgruppe von einem von uns (Budisa) durch Einsatz anderer alternativer Aminosäuren mit anderen chemischen Eigenschaften weitere Farbvarianten schaffen – nicht nur beim Fluoreszenzprotein.

Das Molekül ist nämlich nicht immer ideal, weil es wie ein Klotz am Bein des zu markierenden Eiweißstoffs hängt. Für ein kleines Protein durchaus hinderlich – warum es also nicht selbst zum Leuchten bringen? Die Arbeitsgruppe hat daher in einem kleineren Eiweiß lediglich ein einziges Tryptophan gegen das ähnliche unnatürliche Azatryptophan ausgetauscht: Bei ihm ist ein einziges Kohlenstoffatom durch ein Stickstoffatom ersetzt. Danach fluoreszierte dieses Protein tatsächlich selbst deutlich blau (siehe Grafik S. 48).

Nach ähnlichen Prinzipien wollen Wissenschaftler künftig auch andere Eiweißmoleküle mit neuen, wünschenswerten Eigenschaften versehen, die für den therapeutischen oder dia-

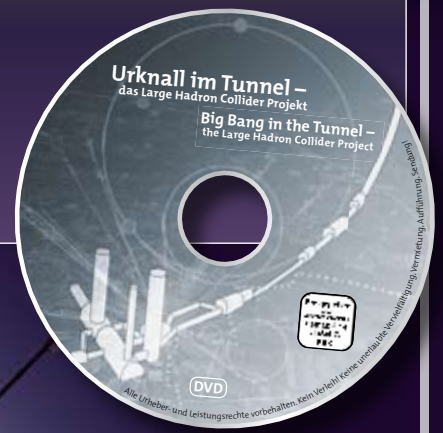
gnostischen Einsatz bestimmt sind. Denkbar wäre etwa, ein therapeutisches Protein mit Aminosäuren auszustatten, die ein Fluoratom enthalten. So stabilisiert könnte der Eiweißstoff im Körper länger seiner Aufgabe nachgehen. Ferner könnte die Erforschung von Krankheiten von derartigen synthetischen Proteinen profitieren, etwa indem diese Moleküle es erlauben, entscheidende Prozesse und Fehlsteuerungen im Krankheitsgeschehen genauer zu beobachten. Noch befinden sich die Methoden im Frühstadium ihrer Entwicklung, und deshalb dienen hauptsächlich erst Mikroorganismen wie Bakterien und Hefen als experimentelle Wirtszellen. Doch ihr Ausweiten auf beispielsweise pflanzliche Zellen in Kultur ist denkbar.

Schließlich visieren die Vertreter der synthetischen Biologie auch die biotechnische Herstellung völlig neuer Werkstoffe an. Stabile Materialien, die körpereigenen Substanzen jedoch sehr ähnlich sind, könnten in Zukunft zum Beispiel die Grundlage für verbesserte Zahnimplantate oder künstlichen Knorpel- und Knochenersatz bilden. Vorstellbar ist etwa, für die Züchtung von Ersatzknorpel Gerüstsubstanzen herzustellen, auf denen dann passende Zellen wachsen.

Wie gut sich solche Visionen tatsächlich umsetzen lassen, hängt von der Entwicklung der Methoden ab. Doch stehen diese erst einmal bereit, wird die synthetische Biologie zu Produkten führen, die von Chemikern oder Molekularbiologen allein nie zu erreichen wären. <

Der Large Hadron Collider – Film ab!

Er könnte das Higgs-Boson, die Supersymmetrie und möglicherweise sogar zusätzliche Dimensionen entdecken: Auf den Large Hadron Collider (LHC) richten sich die Erwartungen vieler Teilchenphysiker bei ihrer Suche nach einer »neuen Physik«. Hier stellen wir Ihnen die DVD zur »Weltmaschine« vor.



Diese DVD für Ihre
Schulklasse?
www.wissenschaft-schulen.de/lhc



»SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT« PRÄSENTIERT IHNEN den »Urknall im Tunnel«, einen einstündigen Film, der Sie in die unterirdischen Gänge und Hallen der gigantischen Beschleunigeranlage LHC und zu den Detektoren ATLAS, CMS, LHCb und ALICE führt. Renommierte Forscher berichten darin exklusiv über ihre Arbeit, darunter Peter Jenni, langjähriger Sprecher der ATLAS-Kollaboration, Christoph Rembser, ebenfalls ATLAS-Forscher, Helmut Burkhardt, der für den Beschleuniger mitverantwortlich zeichnet, Frank Hartmann von der CMS-Detektor-Gruppe und Siegfried Bethke.

Bethke war es auch, der die Dreharbeiten am LHC in die Wege geleitet hat. Er ist Direktor am Max-Planck-Institut für Physik (MPP) in München und Stellver-

tretender Vorsitzender des Komitees für Elementarteilchenphysik (KET). Das KET vertritt die Interessen deutscher Forscherinnen und Forscher in dieser Disziplin, »und dazu gehört natürlich, dass wir die Öffentlichkeit über wichtige Ereignisse aus der Teilchenphysik informieren«, so Bethke.

DER FILM, DEN DAS MPP gemeinsam mit dem Bundesforschungsministerium und dem Deutschen Elektronen-Synchrotron finanzierte, zeichnet die Arbeiten am LHC seit dem Jahr 2003 nach. Seit damals begleiten Kamerafrau Ayshin Eralp und Autor Roland Schenke von der Münchner Filmproduktionsfirma spinfilm die Baufortschritte am europäischen Teilchenforschungszentrum CERN, der

Heimat des LHC. Im September 2008 erlebten sie schließlich auch dessen Inbetriebnahme. Seither gelten beim Zugang allerdings strengste Sicherheitsvorkehrungen. »Bei meinem letzten Besuch gingen allein drei Stunden«, berichtet Schenke, »bis der Augenscanner endlich funktionierte.« Und danach musste sich Kamerafrau Eralp erst einmal »mit den Kranführern gut stellen«. Weil die Detektoren die riesigen Kavernen fast vollständig ausfüllen, lassen sie sich nur mit Mühe filmen – es sei denn, »es fährt einen jemand an der Maschine entlang«.

Übrigens: Am LHC arbeiten 24 deutsche Universitäts- und Forschungsinstitute von Hamburg bis München mit. Der Film zeigt Ihnen die »Weltmaschine« vor allem auch aus ihrer Perspektive.



DVD

BLUTKONSERVE

Lebenssaft im Beutel

Gespendetes Blut wird heute nach Komponenten getrennt. Der Patient erhält nur, was er wirklich braucht.

Von Stefanie Reinberger

Leben zu retten ist gar nicht so schwer: Ein kleiner Stich in die Vene, einige Minuten still liegen, und eine weitere Blutspende steht bereit. 3,5 bis 4 Millionen Freiwillige stellen sich allein dem Deutschen Roten Kreuz alljährlich zur Verfügung, weitere spenden

in Kliniken und kommerziellen Blutbanken. »Momentan deckt die Menge ungefähr den Bedarf«, resümiert Eberhard Weck, Sprecher des DRK Blutspendedienstes Baden-Württemberg-Hessen, »aber es werden immer mehr Blut- und Blutbestandteilprodukte benötigt.«

Blutgruppe des Empfängers	O	A	B	AB
Passendes Spenderblut	O	A, O	B, O	AB, A, B, O

Meist wird etwa ein halber Liter abgezapft. Diesen Verlust kann ein gesunder Erwachsener gut verkraften – pro Kilogramm Körpergewicht fließen 70 bis 80 Milliliter Blut durch seine Gefäße. Nach etwa einer halben Stunde hat sich der Kreislauf meist wieder stabilisiert, innerhalb von zwei Tagen ist die verlorene Menge ersetzt, der Eisenhaushalt nach zwei Monaten ausgeglichen.

Erythrozyten tragen auf ihrer Oberfläche Moleküle, die nach einer Transfusion das Immunsystem auf den Plan rufen können. Die Blutzellen werden zerstört, dabei freigesetzte Stoffe können zum Tod führen. Deshalb werden vor jeder Übertragung die Blutgruppen von Empfänger- und Spenderblut noch einmal bestimmt, um Fehler bei der Herstellung und Beschriftung der Konserve auszuschließen.

Um jede Blutspende optimal zu nutzen, aber auch um Komplikationen etwa wegen unerkannter Infektionen des Spenders zu vermeiden, werden meist nur bestimmte Blutbestandteile übertragen – rote Blutkörperchen (Erythrozyten) beispielsweise nach starkem Blutverlust infolge von Unfall oder Operation, und Blutplättchen (Thrombozyten) bei Gerinnungsstörungen; aus dem Plasma stellt man ebenfalls gerinnungsfördernde Präparate her. Schon bei der Entnahme wird das Blut deshalb in einem Mehrkammer-

WUSSTEN SIE SCHON?

- ▶ **Die erste erfolgreiche Bluttransfusion** gelang dem englischen Arzt Richard Lower im Februar 1666 – bei Hunden. Die erste Mensch-zu-Mensch-Transfusion fand am 1. September 1818 in einem Londoner Hospital statt, doch der Empfänger überlebte nicht. Der Wiener Pathologe Karl Landsteiner entdeckte 1901 das ABO-Blutgruppensystem, 1939/40 wurde der Rhesusfaktor (positiv oder negativ) als weiteres Kriterium möglicher Unverträglichkeit erkannt.
- ▶ **Während der Spende** wird zusätzlich Blut in separaten Röhrchen abgenommen, um Blutgruppe und Rhesusfaktor zu bestimmen sowie auf Krankheitserreger zu testen. Der Spender gibt zudem eine Selbstauskunft über sein Befinden, eventuelle Einnahmen von Arzneimitteln und Reisen.
- ▶ **Plasma oder Thrombozyten** lassen sich auch gezielt spenden. Sie werden schon während der Entnahme abgetrennt, der Rest umgehend in den Körper zurückgeleitet. Während Vollblut-

spenden bei Männern alle acht, bei Frauen alle zwölf Wochen möglich sind, dürfen Thrombozyten alle 14 Tage entnommen werden. Bei Plasma wird lediglich ein Abstand von einer Woche zwischen zwei Spenden empfohlen – sofern das Gesamtvolumen nicht mehr als 25 Liter im Jahr beträgt.

▶ **Drogenmissbrauch** oder ein erhöhtes Risiko für die Creutzfeldt-Jakob-Krankheit, etwa nach längeren Aufenthalten in Großbritannien zwischen 1980 und 1996, schließen von der Blutspende dauerhaft aus. Zeitlich befristete Rückstellungen gibt es nach Infektionserkrankungen, Impfungen oder Medikamenteneinnahmen.

▶ **Mindestens 50 Kilogramm Körpergewicht** und ein Alter zwischen 18 und 68 Jahren (für eine Erstspende bis 59) sind Voraussetzung für eine Spende, zudem ein Gesundheitscheck, bei dem etwa Herz und Lunge abgehört sowie Körpertemperatur, Blutdruck und Puls gemessen werden.



Blutkonserven gelten als Medikament und benötigen deshalb eine Zulassungsnummer. Zudem informiert eine Kennung – als Zahl und als Barcode – über Spendezentrum und Spender, um bei Komplika-

tionen die Ursache ermitteln zu können. Weitere Angaben auf dem Etikett für Arzt und Pflegepersonal: die Art des Blutprodukts sowie der Rhesusfaktor.

beutelsystem aufgefangen, das während des gesamten Verarbeitungsprozesses verschlossen bleibt, um Kontaminationen auszuschließen. Natriumzitrat und andere Chemikalien verhindern ein Gerinnen.

Innerhalb von 24 Stunden muss die Weiterverarbeitung erfolgen, eine Zentrifuge trennt dabei die verschiedenen Komponenten nach ihrem Gewicht auf. In Rotation versetzt sammeln sich die schweren Erythrozyten in der untersten Schicht des Auffangbeutels, in der darüber liegenden weiße Blutkörperchen (Leukozyten), Blutplättchen und defekte Zellen, ganz oben reichert sich das Plasma an. Anschließend werden diese drei Phasen in separate Kammern gepresst.

Der Anteil mit roten Blutkörperchen wird gefiltert, um eventuell verbliebene weiße abzutrennen. Als Bestandteil des Immunsystems könnten sie Krankheitserreger enthalten. Aus dem Gemisch der Mittelschicht, im Fachjargon *buffy coat*, gewinnt man Thrombozyten. Dazu werden *buffy coats* von sechs Spendern gemischt und erneut zentrifugiert – diesmal stärker als bei der ersten Aufarbeitungsrunde. Dabei trennen sich die Thrombozyten vom Rest ab. Das Blutplasma muss nicht weiterverarbeitet werden.

Pro Spende beträgt die Ausbeute etwa 200 Milliliter Erythrozyten-, ebenso viel Plasma- und 80 Milliliter Thrombozytenkonzentrat. Dank einer Stabilisatorlösung, die neben Kochsalz auch Nährstoffe für rote Blutkörperchen enthält, können diese bei vier Grad Celsius bis zu 35 Tage gelagert werden, Thrombozyten halten bei 20 bis 24 Grad Celsius fünf Tage lang. Blutplasma wird bei minus 30 bis minus 40 Grad Celsius tiefgefroren und ist bis zu zwei Jahre lang verwendbar.

Für besondere Anwendungen werden Erythrozytenkonzentrate noch weiter behandelt. Mehrfach mit einer Kochsalzlösung versetzt und erneut zentrifugiert, wird verbliebenes Plasma ausgewaschen, denn darin gelöste Proteine könnten allergische Reaktionen hervorrufen. Solche Produkte erhalten Patienten mit einer entsprechenden Vorgeschichte bei früheren Transfusionen. Neugeborene oder Erwachsene, deren Immunsystem nicht ausreichend arbeitet, bekommen aus dem gleichen Grund sogar bestrahlte Konzentrate: Beta- und Gammastrahlen zerstören Zellen, die Erbsubstanz enthalten, dazu zählen weiße, nicht aber rote Blutkörperchen.

STEFANIE REINBERGER ist freie Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg.

EIN PHILOSOPH, *der über das Gehirn nachdenkt*

Lässt die moderne Hirnforschung von Begriffen wie Bewusstsein, Ich, Autonomie und Handlungsfreiheit am Ende nichts mehr übrig? Michael Pauen warnt vor einem »naturalistischen Missverständnis«.

Von Michael Springer

Kürzlich hielt sich ein unkonventionelles Sachbuch über Philosophie viele Monate lang auf den Bestsellerlisten. Unter dem Titel »Wer bin ich – und wenn ja, wie viele?« versuchte Richard David Precht die altherwürdigen Fragen nach dem Wesen von Mensch, Welt und Moral in modernem Licht zu behandeln (siehe meine Rezension in Spektrum der Wissenschaft 8/2008, S. 100). Eingangs fragte der Autor: »Wie passen die philosophischen, die psychologischen und die neurobiologischen Erkenntnisse über das Bewusstsein zusammen? Stehen sie sich im Weg,

oder ergänzen sie sich? Gibt es ein ›Ich‹? Was sind Gefühle? Was ist das Gedächtnis? Die spannendsten Fragen standen gar nicht auf dem philosophischen Lehrplan, und daran hat sich, soweit ich sehe, bis heute viel zu wenig geändert.«

Doch die Zeiten ändern sich, denn genau diese spannenden Fragen hat sich der Philosoph Michael Pauen vorgenommen. In zahlreichen Publikationen und als Sprecher der Berlin School of Mind and Brain an der Berliner Humboldt-Universität untersucht er, wie die Befunde der Neurowissenschaften sich mit unserem traditionellen Menschenbild vertragen. Bedeuten die viel diskutierten Experimente des amerikanischen Hirnforschers Benjamin Libet tatsächlich, dass unser Wille nicht frei ist? Besteht eine unüberbrückbare »Erklärungslücke« zwischen der physiologischen Beschreibung einer Farbwahrnehmung und dem subjektiven Farberlebnis? Bilden wir uns nur ein, als autonomes Ich Entscheidungen zwischen Richtig und Falsch, Gut und Böse treffen zu können? Kurz, erscheinen wir im Spiegel der modernen Hirnforschung bloß als seelenlose Automaten, als pure Reizreaktionsmaschinen, als Zombies?

Anhand historischer Beispiele zeigt Michael Pauen, dass wissenschaftliche Einsichten zunächst immer wieder als Bedrohung des spezifisch Menschlichen empfunden wurden. Erst mit wachsender Erkenntnis gewöhnen wir uns allmählich daran, neue Erklärungen für uns selbst zu akzeptieren. Das wird nach Pauens Überzeugung auch mit der modernen Hirnforschung nicht anders sein – sofern es gelingt, das »naturalistische Missverständnis« aufzulösen, das sie derzeit noch umgibt. Was das ist, versuchen wir in angeregtem Gespräch zu klären.



ZUR PERSON

Michael Pauen studierte Philosophie in Marburg, Frankfurt und Gießen, Musik in Hamburg; er promovierte 1989 und habilitierte sich 1995. Derzeit ist er Professor am Institut für Philosophie der Humboldt-Universität zu Berlin sowie Sprecher der Berlin School of Mind and Brain. Er war Gastprofessor am Institute for Advanced Study in Amherst (Massachusetts) und Fellow an der Cornell University in Ithaca (New York) sowie am Hanse-Wissenschaftskolleg in Delmenhorst. 1997 wurde er mit dem Ernst-Bloch-Förderpreis ausgezeichnet. Sein Forschungsinteresse gilt der Philosophie des Geistes, dem Problem der Willensfreiheit, dem Verhältnis von Neurowissenschaften und Philosophie sowie den Konsequenzen der neurowissenschaftlichen Forschung für Menschenbild und Ethik.



ALLE FOTOS DES ARTIKELS: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / PHILIPP RÖTBE

Spektrum der Wissenschaft: Herr Professor Pauen, waren Sie der Typ, bei dem die Eltern sich Sorgen machen, dass er zu viel Zeit mit Büchern verbringt und zu wenig an die frische Luft kommt?

Pauen: Eigentlich nicht. Ich habe immer mehrere Sachen gleichzeitig gemacht. Von Anfang an interessierte ich mich für Musik und dafür, wie bestimmte Dinge funktionieren. Ich habe sie auseinandergenommen, bis ich es heraus hatte, und nachher versucht, sie wieder zusammenzubauen – was nicht immer geklappt hat. Und da ich sehr religiös erzogen worden bin, beschäftigten mich religiöse Fragen besonders stark; ich fing aber relativ früh an, mich davon zu lösen. Das war ein langwieriger, bewusster Prozess, und ich habe bis heute einen sehr großen Respekt für religiöse Überzeugungen behalten.

Spektrum: Was war zuerst da: das Interesse an Philosophie oder das an moderner Hirnforschung?

Pauen: Bei mir war's eigentlich zuerst die Psychologie: Welche Prozesse laufen ab, wenn wir uns von einem Kunstwerk faszinieren lassen. Aber schon seit dem Abitur war mir klar, dass ich zur Philosophie tendiere.

Spektrum: Und dazu gab es für Sie dann keine Alternative mehr?

Pauen: O doch: Lange Zeit und immer wieder war das die Musik. Ich habe alles Mögliche gemacht, spielte elektrische Bassgitarre in einer Marburger Band, und eine Weile verdiente ich mein Geld als Komponist. Die meisten Leute in unserer Band waren blind, die konnten sich nicht so sehr um die Technik kümmern – Kabel ziehen, Lkw kaufen und warten und dergleichen –, und das übernahm ich dann mit mehr oder minder großem Vergnügen.

Spektrum: In den 1990er Jahren nahmen Sie in den USA an einem Cognitive-Studies-Programm teil. Ist Ihnen da ein Mentalitätsunterschied gegenüber Europa aufgefallen?

Pauen: Damals war in den USA die Zusammenarbeit zwischen Philosophen, Psychologen und Neurowissenschaftlern ein ganzes Stück weiter fortgeschritten als bei uns. Ich glaube aber, das hat sich mittlerweile einigermaßen angeglichen. In Deutschland ist »Gehirn&Geist« ein Beispiel aus der Publizistik sowie Studiengänge wie die Berlin School of Mind and Brain.

Spektrum: Stimmt der Eindruck, dass Sie aus dem ominösen Gegensatz zwischen den »zwei Kulturen« – der geistes- beziehungsweise na-

LEXIKON I

Neukantianismus: In der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts wurde in Deutschland unter Bezug auf Immanuel Kants (1724–1804) erkenntniskritische Philosophie versucht, den »Materialismus« der modernen Naturwissenschaften zurückzudrängen. Mit Kant wurde argumentiert, über das »Ding an sich« seien nur indirekte Aussagen möglich, weil unser Erkenntnisapparat all unsere Erfahrungen präformiere. Auch der Physiker Hermann Helmholtz (1821–1894) vertrat diese Ansicht.



»Ich halte die Spannung zwischen Natur- und Geisteswissenschaften für sehr wichtig«



turwissenschaftlichen – gern die Luft herauslassen würden?

Pauen: So würde ich das nicht sagen, denn ich halte die Spannung zwischen Natur- und Geisteswissenschaften – und die Differenz der Methoden – für sehr wichtig. Ich möchte das mit der Arbeitsteilung in der Industrie vergleichen; dort wird die Zusammenarbeit zwischen methodisch immer weiter ausdifferenzierten Arbeitsbereichen systematisch vorangetrieben. Beides ist notwendig, die Spannung und die Zusammenarbeit. In Deutschland ist das durch den Einschnitt der Nazizeit in den Wissenschaften lange Zeit vernachlässigt worden. Es herrschte die Vorstellung, die Philosophie brauche die Naturwissenschaften überhaupt nicht.

Spektrum: Und umgekehrt zimmerten Physiker wie Schrödinger, Heisenberg, Carl Friedrich von Weizsäcker ihre eigene Philosophie.

Pauen: Es hat ja Mitte des 19. Jahrhunderts schon eine ganz ähnliche Auseinandersetzung gegeben. Zunächst sah es aus, als würden die Naturwissenschaften die Philosophie dominieren. Dann gab es im Neukantianismus und durch Edmund Husserls Phänomenologie eine Gegenbewegung, die gezeigt hat: Bei bestimmten Fragen – zum Beispiel bei normativen »Du sollst«-Problemen – können die empirischen Wissenschaften die Geisteswissenschaften nicht ersetzen. Ein interessantes Beispiel für naturwissenschaftliche Selbstüberschätzung bot die Ästhetik: Damals wurde versucht, Geschmacksurteile empirisch zu untersuchen. Man bekam durch Experimente heraus, dass der Reim als Abschluss eines Verses von besonderer Bedeutung ist, oder dass Witze bei wiederholter Präsentation an Effekt verlieren. (Gelächter) Das brachte offensichtlich nichts und bestärkte wiederum die Geisteswissenschaften im Glauben, sie brauchten die Naturwissenschaften nicht.

Spektrum: Damit kommen wir zu dem von Ihnen geprägten Begriff des naturalistischen Missverständnisses. Was verstehen Sie darunter?

Pauen: Historisch betrachtet haben sich die beiden Lager immer wieder in Scheinkonflikten verheddert. Zum Beispiel meinte man in

der Mitte des 19. Jahrhunderts, die naturalistische Erklärung bestimmter geistiger Prozesse stelle die Moral in Frage. Mittlerweile wissen wir: Die Annahme, dass wir keine immaterielle Seele benötigen, beeinträchtigt sicherlich nicht die Geltung moralischer Normen. Allgemeiner gesprochen, sobald neue Erklärungen auftauchen, kommt es zu Konflikten. Die lösen sich erst auf, wenn es gelingt, die neuen Erklärungen in die etablierten Vorstellungen einzubauen. Man sieht dann, dass man durchaus an grundlegenden Merkmalen des Menschlichen festhalten kann – nur werden übernatürliche Erklärungen ersetzt durch naturalistische. Die wesentlichen Unterscheidungen zwischen Mensch und Tier, Belebtem und Unbelebtem bleiben aber bestehen.

Spektrum: Und das nicht einzusehen, ist das naturalistische Missverständnis?

Pauen: Genau. Das Missverständnis ist, zu meinen, der Fortschritt der Naturforschung stelle unser Welt- und Menschenbild grundsätzlich in Frage. Damit steht man scheinbar vor zwei Optionen: Entweder die Naturwissenschaften stoßen irgendwo an eine Grenze, dann können wir an unserem Menschen- und Weltbild festhalten – oder es gibt diese Grenze nicht, dann müssen wir unser Weltbild aufgeben. In diesem Dilemma besteht das naturalistische Missverständnis.

Spektrum: Würden Sie zum Beispiel sagen, dass sich im Licht der modernen Hirnforschung das philosophische Leib-Seele-Problem einfach in Rauch auflöst? Verschwindet die Seele ganz und gar?

Pauen: Die Seele war lange eine sehr plausible Erklärung für viel mehr Merkmale, als heute unter Geist oder Bewusstsein zusammengefasst werden. Sie lieferte zum Beispiel eine Erklärung dafür, dass Organismen belebt sind – eben »beseelt«, englisch »animated«. Psyche, anima, spiritus, flatus – immer ist es der Hauch, der Atem. Hinter Atem steckt etymologisch der Sanskritausdruck »atman«. Göttliche Schöpfungsakte waren ohnedies anerkannt, evolutionäre Theorien hatte man nicht, also war es völlig rational, die Annahme einer göttlich eingehauchten Seele zu machen. Erst in dem Moment, wo naturalistische Erklärungen auftauchen, kommt es im 19. Jahrhundert zu dem erwähnten Konflikt: Scheinbar müssen wir wesentliche, charakteristische Bestandteile des Menschlichen aufgeben.

Spektrum: Sigmund Freud vergleicht ja zu Beginn des 20. Jahrhunderts seine Entdeckung des Unbewussten mit der »kopernikanischen Kränkung«: So wie Kopernikus den Menschen aus der Mitte des Universums vertrieb, sei nach Freud das Ich nun nicht mehr Herr im eigenen Haus.

Pauen: Diese kopernikanische Kränkung hat es nie gegeben! Das war eine Befreiung! Die Erde stand im mittelalterlichen Weltbild an der untersten Stelle der Hierarchie, und Galilei versetzte sie empor an den Sternenhimmel. Doch zurück zur Gegenwart. Im allgemeinen Bewusstsein ist die Tendenz weit verbreitet, charakteristische Merkmale des Menschlichen nichtnaturalistisch zu erklären. Man meint, das Ich und insbesondere die Willensfreiheit müssen aus der naturalistischen Determination herausfallen. Daraus folgt: Entweder stoßen die Naturwissenschaften an eine Grenze bei der Erklärung von Handlungen, dann können wir an Willensfreiheit und Verantwortung festhalten – oder aber das naturwissenschaftliche Programm erweist sich als erfolgreich, dann könnten wir uns diese Merkmale nicht mehr zuschreiben. Das mag zwar auf den ersten Blick sehr plausibel erscheinen, aber wenn man die übernatürlichen Voraussetzungen preisgibt, dann löst sich der Konflikt einfach auf.

Spektrum: Wie sieht das im Fall der Willensfreiheit aus?

Pauen: Man versucht sich darauf zu einigen, was für Freiheit unerlässlich ist, und das sind zwei Momente: erstens die Freiheit von äußerem Zwang, zweitens die Abgrenzung gegen Zufall. Man kann zeigen, dass Zufall unsere Freiheitsspielräume niemals auszuweiten vermag, weil er unsere Kontrolle über Handlungen in Frage stellt. Zudem gilt: Der entscheidende Punkt für Freiheit ist Selbstbestimmung durch eigene Wünsche und Überzeugungen, die Abhängigkeit der Handlung von meiner Person. Und das lässt sich ohne Weiteres naturalisieren. Vermutlich haben die Überzeugungen einer Person natürliche Grundlagen, und man kann Kausalprozesse feststellen, die im Idealfall von neuronalen Grundlagen für Handlungen und Normen zu neuronalen Prozessen der Bewegungssteuerung führen.

Spektrum: Der Hirnforscher Wolf Singer sagt, Willensfreiheit und Verantwortung seien – wenn auch nützliche – soziale Illusionen.

Pauen: Nach meinem Eindruck hat in der Hirnforschung ein gewisses Umdenken stattgefunden, als man einsah, dass philosophische Differenzierungen ganz nützlich sind. Angenommen, ich fasse aus Überzeugung den Beschluss, Geld an eine wohltätige Organisation zu spenden, und mache das dann tatsächlich. Würden Sie jetzt an dieser Stelle die deterministische Beziehung aufheben, dann würden Sie nur die Chance steigern, dass etwas passiert, was meiner Überzeugung widerspricht. Oder ich beschließe, niemals eine Bank zu überfallen; durch Aufhebung der Determination wäre es plötzlich möglich, dass ich gegen

meine tiefsten Überzeugungen doch ein solches Verbrechen begehe. Wie wollte man mir für eine Entscheidung, die nicht nur meinen Überzeugungen widerspricht, sondern auch ohne mein Zutun zu Stande gekommen ist, Verantwortung zuschreiben? Wenn in Ihrer Firma etwas passiert, das sich Ihrer Kontrolle entzieht, dann würde das doch nicht etwa Ihre Freiheit steigern, sondern Ihre Verantwortung einschränken – und genauso ist das mit meinen persönlichen Handlungen natürlich auch.

Spektrum: Wo sehen Sie den Grund für das naturalistische Missverständnis?

Pauen: Der Eindruck eines Widerstreits von Determinismus und Freiheit ergibt sich daraus, dass wir noch ganz starke dualistische Intuitionen haben – dass wir immer noch dazu neigen, unser Ich von natürlichen Prozessen auszunehmen. Wenn mein Gehirn deterministisch funktioniert und ich mein Ich von meinem Gehirn unterscheide, dann hat das Ich keinen Einfluss. Damit es Einfluss hat, müssen die Naturgesetze hübsche kleine Lücken lassen. In diesen Lücken kommt mein Ich ins Spiel und sagt: Jetzt machen wir das einmal so oder so.

Spektrum: Sie haben die Folgerungen kritisiert, die aus den Experimenten von Benjamin Libet für oder besser gegen die Willensfreiheit gezogen wurden. Warum?

Pauen: Libet ließ Versuchspersonen eine einfache Bewegung mit einer Hand ausführen und maß dabei ein bestimmtes neuronales Potenzial, von dem man wusste, dass es mit der Vorbereitung von willentlichen Handlungen zusammenhängt. Zugleich sollten die Probanden sagen, zu welchem Zeitpunkt sie den Entschluss zur Handbewegung gefasst hatten. Libet stellte nun fest, dass das neuronale Potenzial etwa 350 Millisekunden früher auftrat als der willentliche Entschluss; daraus wurde gefolgert: Nicht der Wille bestimmt die neuronalen Prozesse, sondern umgekehrt.

Spektrum: Und Ihre Kritik?

Pauen: Innerhalb dieses Experiments hat es gar keine Entscheidung gegeben, denn die Versuchspersonen konnten ja überhaupt nur eine einzige Handbewegung vollziehen; was passiert wäre, wenn sie die andere Hand bewegt hätten, wurde nicht untersucht. Falls ein Proband eine wirkliche Entscheidung zwischen linker und rechter Hand getroffen hätte, wären seine Daten nicht berücksichtigt worden. Die einzige Entscheidung bestand darin, an den Versuchen teilzunehmen, nachdem man die Instruktion gehört hatte und nun die Aufgabe übernahm, 40-mal hintereinander die Hand zu heben. Es ist kein Wunder, dass das Gehirn dann nach einiger Zeit weiß, was kommt, und entsprechend das Bereitschaftspotenzial aufbaut.



»Die kopernikanische Kränkung hat es nie gegeben! Das war eine Befreiung!«

LEXIKON II

Phänomenologie: Diese von Edmund Husserl (1859–1938) begründete Lehre beansprucht, durch unmittelbare Anschauung und Analyse der Phänomene als solcher eine philosophische Wissenschaft vor jeder empirischen Naturforschung zu begründen. Insbesondere betonte Husserl, dass Logik und Mathematik nicht naturwissenschaftlich, etwa psychologisch, hergeleitet werden können.

LEXIKON III

Qualiaproblem: Lässt sich das »Wie« (lateinisch *quale*, Plural *qualia*) eines subjektiven Farb-, Geruchs- oder Schmerzerlebnisses überhaupt mit objektiven – physikalisch-chemischen und hirnpfysiologischen – Begriffen beschreiben? Die Antworten der Philosophen auf diese Frage reichen von »niemals« bis »selbstverständlich«.

Spektrum: Wie soll es mit der Debatte um Geist und Gehirn, an der Sie ja aktiv teilnehmen, in Zukunft weitergehen?

Pauen: In der Diskussion zwischen Neurowissenschaften und Philosophie halten wir noch allzu sehr an den »alten« Fragen fest: Gibt es ein Ich oder nicht, gibt es Bewusstsein, gibt es Willensfreiheit? Ich glaube, dass das letztlich unproduktive Ja-Nein-Fragen sind, die das Potenzial der empirischen Wissenschaften überhaupt nicht ausschöpfen. Produktiv wird es erst dann, wenn man die ganze Differenzierungsfähigkeit der empirischen Forschung nutzt, um zum Beispiel zu untersuchen: Unter welchen Bedingungen entwickelt sich Verantwortungsfähigkeit, welche Faktoren schränken sie ein, welche fördern sie, welche Grade von Verantwortung gibt es? Solche differenzierten Fragen sind weniger spektakulär als ein Nein zur Willensfreiheit mit der Konsequenz, dass wir am Ende unser gesamtes Rechtssystem und unser Menschenbild verändern sollen, aber sie führen letztlich viel weiter. An der Differenzierung solcher Fragen arbeite ich.

Spektrum: Gehen Sie da rein begrifflich philosophierend vor oder auch empirisch, indem Sie etwa Verantwortungssituationen untersuchen?

Pauen: In zwei jetzt anlaufenden Projekten erforschen wir zum einen den Einfluss von sozialen Situationen auf die kognitive Entwicklung – wir treiben »soziale Neurobiologie«. Entstehung von Selbstbewusstsein hängt ganz offensichtlich zusammen mit sozialen Interaktionen – sowohl gattungsgeschichtlich als auch in der Entwicklung einzelner Individuen. Zum anderen geht es uns um den Begriff Autonomie, auch unter historischem Aspekt. Die Gesellschaft macht seit Langem einen Prozess der Individualisierung durch. Das heißt, sie verlagert Verantwortung immer mehr auf die einzelnen Individuen. Das ist ein offensichtlich erfolgreicher Prozess, aber er hat bestimmte negative Konsequenzen. Zum Beispiel führt der Soziologe Wilhelm Heitmeyer die Entstehung von Rechtsextremismus darauf zurück, dass einzelne Individuen durch diese Verlagerung von Verantwortung überfordert werden. Aber im Großen und Ganzen scheint der Prozess zu funktionieren. Auf der anderen Seite stellen wir in Psychologie, Neurobiologie und Philosophie die Fähigkeit des Menschen, individuelle Verantwortung zu übernehmen, in Frage. Mich interessiert: Wie kann man beides zusammenbringen? Unter welchen Bedingungen hat man diese Fähigkeit, wodurch wird sie eingeschränkt?

Spektrum: Das lässt sich empirisch erforschen?

Pauen: In den berühmten Experimenten des amerikanischen Psychologen Stanley Milgram

zum Autoritätsgehorsam waren die meisten Probanden bereit, auf Anordnung anderer Menschen durch vermeintliche Stromstöße starke Schmerzen zuzufügen. Fast noch verblüffender waren Versuche von Milgrams Lehrer Solomon Asch. Den Probanden wurden drei ganz unterschiedlich lange Geraden präsentiert sowie eine Vergleichsgerade, die so lang war wie die mittlere der drei. Unter normalen Umständen gaben 99 Prozent auf die Frage, welche Geraden gleich lang seien, natürlich die richtige Antwort. Doch dann wurden die Versuchspersonen in eine Gruppe vermeintlicher Mitprobanden gesteckt, die aber alle mit dem Versuchsleiter unter einer Decke steckten und übereinstimmend ein falsches Ergebnis nannten – und unter diesen Bedingungen schloss sich ein gutes Drittel der manipulierten Mehrheitsmeinung an, obwohl sie in evidentem Widerspruch zu den Tatsachen stand. Mich interessiert daran, wie stark unsere Autonomie, unsere Fähigkeit, nach eigenen Prinzipien zu handeln, durch soziale Situationen in Frage gestellt wird.

Spektrum: Sie schreiten also vom einzelnen Hirn zum sozialen Hirn fort ...

Pauen: ... zum Einfluss neuronaler Prozesse auf soziale Interaktion – und umgekehrt! Wir wissen, dass bestimmte soziale Prozesse konstitutiv sind für die normale Entwicklung des menschlichen Gehirns.

Spektrum: Zu den überindividuellen Einflüssen auf unser Denken gehört ja unter anderem der religiöse Glaube.

Pauen: Das wirft gleich mehrere Fragen auf. Erstens: Gibt es naturwissenschaftliche Erklärungen für religiöses Denken? Zweitens: Wie rechtfertigt man Glaubensüberzeugungen? Drittens: Werden diese Überzeugungen durch naturwissenschaftliche Erkenntnisse in Zweifel gezogen? Die erste Frage kann man wohl mit Ja beantworten; Ansätze aus der Evolutionsbiologie zeigen neuerdings, dass religiöse Überzeugungen die Bereitschaft von Individuen fördern, sich bestimmten sozialen Normen zu unterwerfen. Selbst wenn die Mitglieder meiner Gruppe nicht herauskriegen, dass ich irgendwelche Schweinereien anstelle, beaufsichtigt mich Gott von oben und sorgt dafür, dass ich nicht über die Stränge schlage. Spätestens in der ägyptischen Religion sind da mit Seelenlehre und Jüngstem Gericht Vorstellungen entwickelt worden, die später vom Christentum übernommen wurden.

Spektrum: Dieser Sozialbindungsaspekt ...

Pauen: ... scheint für eine natürliche Grundlage religiösen Denkens zu sprechen. Das sagt natürlich überhaupt nichts darüber aus, ob religiöses Denken zu rechtfertigen ist, ob meine religiösen Überzeugungen sinnvoll sind oder

Pauen, M. und Roth, G.: Freiheit, Schuld und Verantwortung. Grundzüge einer naturalistischen Theorie der Willensfreiheit. Suhrkamp, Frankfurt 2008.

Pauen, M.: Was ist der Mensch? Die Entdeckung der Natur des Geistes. DVA, München 2007.

Pauen, M.: Grundprobleme der Philosophie des Geistes. Eine Einführung. 4. Auflage. Fischer, Frankfurt 2005.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/974639.

Das dalango Prinzip: SPRACHE, DIE SPASS MACHT!

NEU
im www!



Schon 15 Minuten Training täglich reichen aus, um deine Lieblingsfremdsprache auf Vordermann zu bringen. Mit unterhaltsamen Videos, praktischen Übungen und vielen Vokabeln. Überzeuge dich selbst und teste jetzt dalango zum einmaligen Einführungspreis von 9,95 Euro im Monat.

www.dalango.de

***dalango***
genau deine Sprache



»Bewusstsein ist sicherlich nicht auf der Ebene von einzelnen Molekülen zu finden«



Michael Springer ist promovierter Physiker, Schriftsteller und freier Mitarbeiter von »Spektrum der Wissenschaft«. Das Interview führte er zusammen mit **Reinhard Breuer**, Chefredakteur von »Spektrum der Wissenschaft«.

nicht. Diese Frage kann man nicht durch Wissenschaft beantworten. Den Bereich des Wissens und den unserer Überzeugungen sollte man sauber voneinander trennen.

Spektrum: Man untersucht Hirnprozesse beim Beten, beim Meditieren ...

Pauen: ... und findet etwas. Was sonst sollte man erwarten? Man findet auch bestimmte neuronale Aktivitäten, wenn man Kunstwerke betrachtet, aber daraus lassen sich natürlich keine ästhetischen Normen ableiten. So ist es mit religiösen Überzeugungen auch; sie können durch naturwissenschaftliche Ergebnisse weder in Frage gestellt noch bestätigt werden.

Spektrum: Aber kann mein subjektiv erlebtes, höchstpersönliches Bewusstsein überhaupt je Thema der empirischen Forschung werden?

Pauen: Das ist wieder ein Beispiel für den naturalistischen Fehlschluss. Scheinbar haben wir Recht mit unserer unmittelbaren Erfahrung aus der Perspektive der ersten Person, dass das etwas Besonderes ist, das sich naturalistischer Erklärung entzieht. Theorien über neuronale Interaktionen scheinen die falsche Art von Theorien zu sein, um die unmittelbare Erfahrung zu erklären, die ich aus der Perspektive der ersten Person mache. Diese Vorstellung einer prinzipiellen Grenze der Naturforschung gibt es bereits in der Antike. Oder ich behaupte, so eine Grenze gibt es nicht. Dann muss ich die Besonderheit dieser Perspektive der ersten Person in Frage stellen und sagen: Im Grunde gibt es da gar nichts Vernünftiges zu erklären.

Spektrum: Das ist das Dilemma.

Pauen: Entweder wir beharren auf den Phänomenen, dann können die Wissenschaften nicht Recht haben, oder die Wissenschaften haben Recht, dann müssen wir die Phänomene aufgeben. Das ist genau wie bei der Willensfreiheit, beim Ich, bei der Seele. Ich halte das für einen Scheinkonflikt, der mit einem bestimmten dualistischen Erbe zu tun hat – das heißt, wir gehen davon aus, unser Bewusstsein sei grundsätzlich getrennt von Vorgängen in unserem Gehirn. Das lässt sich gegenwärtig noch aufrechterhalten, weil unsere empirischen Erkenntnisse über den Zusammenhang zwischen neuronalen Prozessen und Perspektive der ersten Person noch viel zu grob sind. Wir sind aber dabei, das viel enger zusammenzubringen, sowohl auf der Ebene der Psychologie wie auf jener der Neurobiologie, und wenn das erst einmal stärker ins allgemeine Bewusstsein vorgedrungen ist, wird diese Kluft in Frage gestellt werden. Dann wird sich zeigen: Auch Bewusstseinsprozesse sind erklärbar.

Spektrum: Der Philosoph Peter Bieri behandelt das Problem des Bewusstseins allerdings,

ohne sich je auf Hirnforschung oder Neurobiologie zu beziehen.

Pauen: Ich habe seinerzeit Bieris Antrittsvorlesung in Marburg gehört; sie wurde in Ihrer Zeitschrift veröffentlicht (siehe den Artikel »Was macht Bewusstsein zu einem Rätsel?«, Spektrum der Wissenschaft 10/1992, S. 48). Das war ein wunderschöner Vortrag, und Bieri kam immer auf irgendwelche Di- oder Trilemmata; es kam immer etwas heraus, was nicht zu lösen war. Das hat mich schon damals ein bisschen gefuchst. Wenn Bieri Recht hat, dass Bewusstsein ein prinzipielles Rätsel ist, dann gilt das eine Horn des Dilemmas: Wir haben unsere Erste-Person-Erfahrung, und die Wissenschaften stoßen da an eine Grenze. Bieri zitiert Leibniz: Wenn wir durch ein Gehirn spazieren könnten wie durch eine große Maschine, würden wir kein Bewusstsein finden. Da ist ganz intuitiv diese Kluft da zwischen der Erste-Person-Perspektive und einer naturalistischen Erklärung. Aber Bewusstsein ist sicherlich nicht auf der Ebene von einzelnen Molekülen zu finden; es ist ein Zustand der Interaktion zwischen Neuronenverbänden. Das zeigt einfach: Wir müssen über die Dritte-Person-Perspektive viel mehr wissen, dann nähern wir uns einer Erklärung der ersten Person. Philosophisch interessant ist eine Reihe von Gedankenexperimenten, die jene Kluft zu untermauern scheinen – bewusstlose Zombies, die genau wie wache Menschen reagieren, oder die Farbforscherin Mary, die alles über Farben weiß, aber noch nie eine gesehen hat –, aber die enthalten samt und sonders philosophische Fehler.

Spektrum: Oder das Problem der Qualia: Lässt sich aus der Perspektive der Dritten Person neurologisch restlos beschreiben, wie wir in der ersten Person Farben erleben?

Pauen: Das ist, meine ich, eine historische Beschränkung, die vergehen wird. Für uns ist noch nicht vorstellbar, dass neurobiologische Erklärungen das erfassen, was wir in der ersten Person erfahren. Es ist nicht unvernünftig, zu erwarten, dass die Einschränkung zu überwinden ist.

Spektrum: Sie sehen große Zeiten für die Philosophie?

Pauen: Die meisten Philosophen, von Aristoteles über Descartes, Leibniz zu Kant, waren extrem stark interessiert an der Kooperation mit den Wissenschaften. Wir sind dabei, wieder zu dieser Kooperation zurückzufinden, und das wird der Philosophie helfen, ihr Potenzial neu zu entfalten. Die Wissenschaften, gerade die Neurobiologie, werfen so viele neue Fragen auf, da werden wir Philosophen noch eine Weile zu tun haben. ◀

Elliptische Kurven und eine kühne Vermutung

Die Geheimnisse der Zahlentheorie sind verwoben mit nahezu jeder anderen mathematischen Disziplin. Manche von ihnen hofft man mit Hilfe der Theorie spezieller Kurven zu lüften. Doch dazu muss man erst die Vermutung von Birch und Swinnerton-Dyer beweisen, die – obwohl recht jung – bereits zu den sieben Millenniumsproblemen gehört.

Von Peter Meier, Jörn Steuding
und Rasa Steuding

Die erste Begegnung mit den so genannten elliptischen Kurven ist für den Außenstehenden wenig erhellend. Sie werden von den Mathematikern ins Leben gerufen durch eine verwirrend erscheinende Definition; dennoch entpuppen sie sich unter den geduldigen Bemühungen der Fachleute als zentrale Knoten in einem weit gespannten Gedankennetz und helfen so, überraschende Verbindungen zu anderen Bereichen herzustellen.

Ein spektakuläres Beispiel ist der Beweis der legendären fermatschen Vermutung durch Andrew Wiles und Richard Taylor, bei dem elliptische Kurven die entscheidende Rolle spielen (Spektrum der Wissenschaft 8/1993, S. 14, und 1/1998, S. 96). Darüber hinaus finden sie Verwendung für viele zahlentheoretische Probleme, darunter das hartnäckige Kongruenzzahlproblem: Für welche natürlichen Zahlen n gibt es ein rechtwinkliges Dreieck mit rationalen Seitenlängen und Flächeninhalt n ?

Mehr noch: Elliptische Kurven besitzen auch praktische Anwendungen (was für einen Zahlentheoretiker allerdings nicht das vorrangige Kriterium ist, um den Wert seiner Tätigkeit zu beurteilen). Dank einer merkwürdigen algebraischen Struktur, die man auf ihnen findet, kann man Funktionen konstruieren, die leicht berechenbar, aber ohne eine Zusatzinformation praktisch nicht umkehrbar sind.

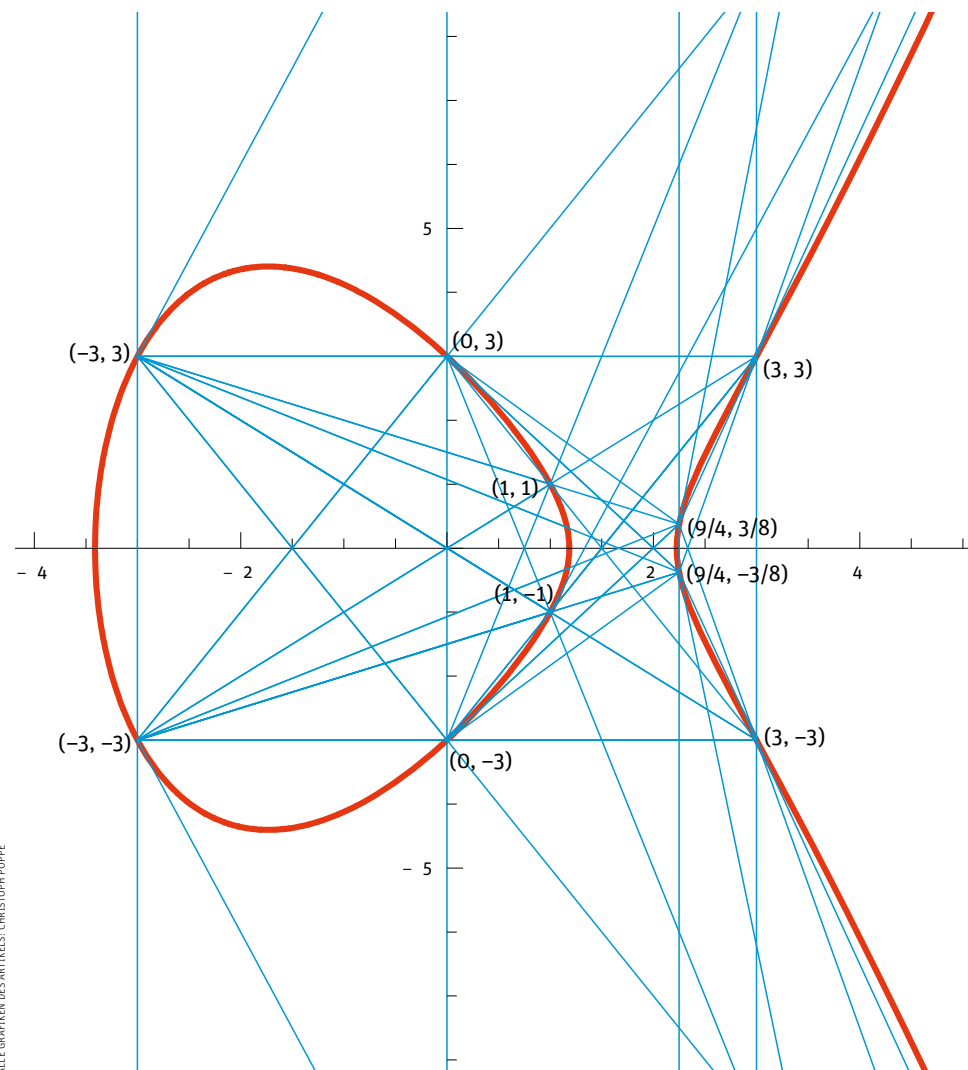
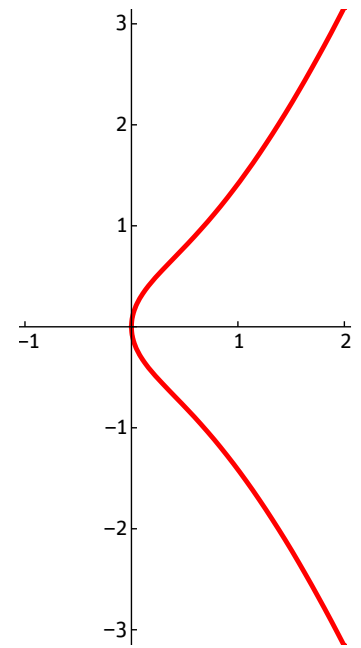
SERIE: DIE GRÖSSTEN RÄTSEL DER MATHEMATIK

Teil I:	Interview mit Gerd Faltings Die riemannsche Vermutung	SdW 09/2008
Teil II:	Das Komplexitätsproblem $P = NP$	SdW 10/2008
Teil III:	Goldbachsche Vermutung und Primzahlzwillingsvermutung	SdW 12/2008
Teil IV:	Die Vermutung von Birch und Swinnerton-Dyer	SdW 01/2009
Teil V:	Das abc-Problem	SdW 02/2009
Teil VI:	Das Yang-Mills-Problem	SdW 03/2009
Teil VII:	Das Navier-Stokes-Problem	SdW 04/2009

Diese »Falltürfunktionen« sind das Herz der Kryptografieverfahren mit veröffentlichtem Schlüssel (*public-key cryptography*). Wer also vertrauliche Kommunikation mit seiner Herzallerliebsten oder – profaner, aber häufiger – mit seiner Bank in Geldgeschäften pflegt, nutzt in vielen Fällen elliptische Kurven, ohne es überhaupt zu bemerken.

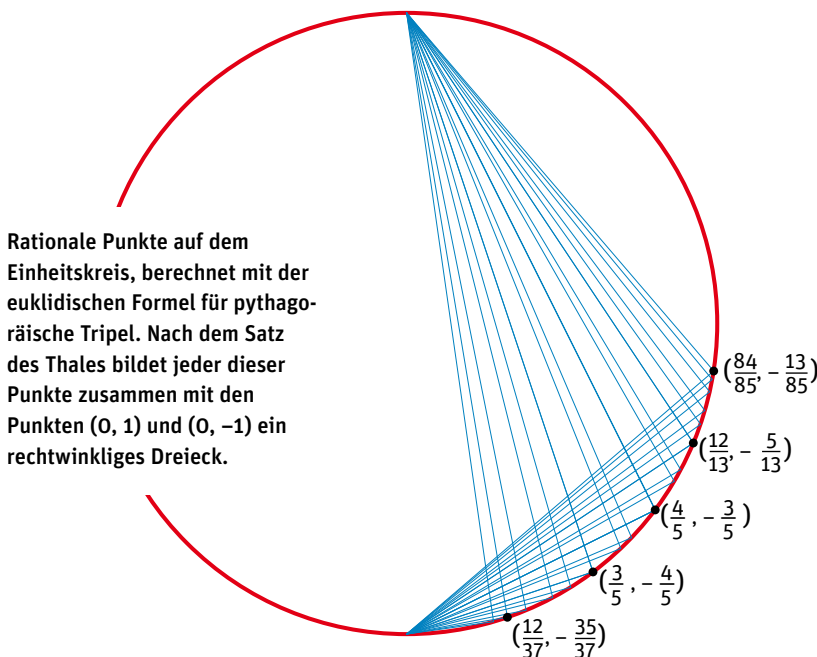
Es ist nicht einfach, hinter die Geheimnisse der elliptischen Kurven zu kommen. Dabei ist alles, was man über ihre Struktur in Erfahrung bringen kann, hilfreich und jedes Mittel dazu willkommen. Eine besonders ergiebige Methode funktioniert so: An Stelle der elliptischen Kurve selbst studiert man vereinfachte Versionen derselben, Karikaturen gewissermaßen. Manche Eigenschaften des Originals kann man in dem verzerrten Bild wiederfinden. Und aus den Eigenschaften sehr vieler Karikaturen hofft man, die des Originals rekonstruieren zu können – so die Idee.

In den 1960er Jahren formulierten die britischen Mathematiker Bryan Birch und Sir Henry Peter Francis Swinnerton-Dyer die Vermutung, dass eine solche Rekonstruktion in Bezug auf gewisse, genau definierte Eigenschaften stets möglich sei. Bislang ist diese Vermutung nicht bewiesen. Ein Alter von etwa 40 Jahren ist für eine unbewiesene Vermutung zwar stattlich, aber längst nicht so ehrwürdig wie das der fermatschen Vermutung, die mehr als 350 Jahre auf ihren Beweis warten musste, der seit 150 Jahren ungelösten riemannschen Vermutung (Spektrum der Wissenschaft 9/2008, S. 86) oder der poincaréschen Vermutung, die immerhin 100 Jahre den Bemühungen der Mathematiker trotzte. Gleichwohl hat das hochrangig besetzte Gremium, das für das Clay Mathematics Institute die sieben Millenniumsprobleme auswählte, die Vermutung von Birch und Swinnerton-Dyer in seine Liste aufgenom-



Links die elliptische Kurve (rot) zu der Gleichung $y^2 = x^3 - 9x + 9$, oben zu der Gleichung $y^2 = x^3 + x$. Alle elliptischen Kurven haben ungefähr eine dieser beiden Formen. Die Punkte auf einer elliptischen Kurve lassen sich »addieren«: Man findet die Summe zweier Punkte, indem man sie durch eine Gerade verbindet und den dritten Schnittpunkt der Geraden mit der Kurve an der x -Achse spiegelt. Bei dieser Addition bleiben Punkte mit rationalen Koordinaten unter sich. Einige solcher Punkte und deren Verbindungsgeraden sind eingezeichnet.

ALLE GRAFIKEN DES ARTIKELS: CHRISTOPH PÖPPE



Rationale Punkte auf dem Einheitskreis, berechnet mit der euklidischen Formel für pythagoräische Tripel. Nach dem Satz des Thales bildet jeder dieser Punkte zusammen mit den Punkten (0, 1) und (0, -1) ein rechtwinkliges Dreieck.



Der französische Jurist Pierre de Fermat war trotz seines Amateurstatus einer der größten Mathematiker. Er starb 1665; neuere Forschungen sprechen dafür, dass sein Geburtsjahr nicht, wie überliefert, 1601, sondern 1607 war.

men. Nach der weit gehend geteilten Auffassung dieser Experten ist also das Problem so schwierig und seine Lösung so wertvoll, dass dafür eine Million Dollar eine angemessene Prämie sind.

Worum geht es? Zunächst um Aussagen über natürliche Zahlen, Teilbarkeit, Zerlegung in Primfaktoren und so weiter. Durch eine einfache Division werden daraus rationale Zahlen, das heißt Brüche mit ganzen Zahlen in Zähler und Nenner. Indem man auf die übliche Weise aus diesen Zahlen Punkte in einem Koordinatensystem macht, transportiert man arithmetische Fragestellungen in die Geometrie. Im Folgenden geht es nun um rationale Punkte – das heißt Punkte, deren beide Koordinaten rationale Zahlen sind – auf gewissen Kurven, insbesondere elliptischen Kurven.

Zur Einstimmung betrachten wir zunächst rationale Punkte auf einer der einfachsten

Kurven überhaupt, dem Kreis, und ihre Beziehungen zu den so genannten pythagoräischen Tripeln. Diese Gedankengänge übertragen wir sodann auf die elliptischen Kurven.

Rationale Punkte auf dem Kreis

Die legendäre fermatsche Vermutung (häufig auch »Fermats letzter Satz« genannt) besagt, dass die Gleichung

$$x^n + y^n = z^n$$

keine ganzzahligen Lösungen hat, sofern der Exponent n größer als 2 ist, außer den »trivialen« Fällen, in denen mindestens eine der drei Zahlen x , y , und z gleich null ist. Wir dividieren beide Seiten dieser Gleichung durch z^n , führen die neuen Unbekannten $u = x/z$ und $v = y/z$ ein und haben damit Fermats letzten Satz in die Aussage umgeformt, dass die Gleichung

$$u^n + v^n = 1$$

für $n > 2$ keine nichttriviale Lösung mit rationalen Zahlen u und v hat.

Für $n = 2$ dagegen gibt es viele rationale Lösungen von $u^2 + v^2 = 1$ oder, in den ursprünglichen Unbekannten ausgedrückt, eine Menge ganzzahliger Lösungen von $x^2 + y^2 = z^2$. Beispielsweise gilt

$$3^2 + 4^2 = 5^2, \quad 5^2 + 12^2 = 13^2,$$

und es ist nicht schwierig, weitere Beispiele zu finden. Bereits die Babylonier hatten vor fast vier Jahrtausenden umfangreiche Listen derartiger Tripel. Sie verwendeten sie zur praktischen Konstruktion rechter Winkel. Denn nach dem Satz des Pythagoras ist ein Dreieck mit den Seitenlängen x , y und z , welche die Gleichung $x^2 + y^2 = z^2$ erfüllen, rechtwinklig. Diese Zahlentripel (x, y, z) werden daher auch pythagoräische Tripel genannt.

Eine erschöpfende Charakterisierung derselben gelang Euklid, der bewies, dass sämtliche pythagoräischen Tripel (x, y, z) durch die Parametrisierung

$$x = k^2 - l^2, \quad y = 2kl, \quad z = k^2 + l^2$$

mit ganzzahligen $k > l$ entstehen. Zum Beispiel liefert $k = 2$, $l = 1$ das Tripel $x = 3$, $y = 4$, $z = 5$. Insbesondere gibt es unendlich viele pythagoräische Tripel.

Euklids Satz kann auf sehr elegante Weise durch Übergang zur Geometrie bewiesen werden, wie der französische Mathematiker Claude Bachet (1581–1638) gezeigt hat: Die pythagoräischen Tripel (x, y, z) entsprechen

DAS GESCHLECHT EINES ZUCKERKRINGELS

Die Topologie befasst sich mit den Eigenschaften geometrischer Gebilde, die unter stetigen Deformationen (ohne Zerschneiden und Zusammenfügen) unverändert bleiben. So sind für einen Topologen ein Krapfen, ein Zuckerkringel (»Donut«) und eine Brezel völlig verschiedene Dinge, während ein Zuckerkringel und eine Tasse mit Henkel im Wesentlichen dasselbe sind. Es kommt auf das topologische Geschlecht an, das heißt die Anzahl der Löcher. Ein Luftballon oder ein Krapfen hat das Geschlecht 0, ein Donut, eine Henkeltasse oder ein aufgepumpter Fahrradschlauch das Geschlecht 1, eine Brezel das Geschlecht 2.



JORN STELDING

durch die Umformung $u=x/z$, $v=y/z$ eindeutig den rationalen Punkten (u, v) auf dem Einheitskreis $u^2 + v^2 = 1$. Ein Punkt (u, v) des Einheitskreises ist genau dann rational, wenn die Gerade durch diesen Punkt und den Punkt $(0, 1)$ eine rationale Steigung m hat. Einsetzen der Geradengleichung $v = mu + 1$ in die Kreisgleichung $u^2 + v^2 = 1$ ergibt

$$(u, v) = \left(\frac{-2m}{m^2 + 1}, \frac{1 - m^2}{m^2 + 1} \right).$$

Mit $m=k/l$ ergeben sich nun die pythagoräischen Tripel.

Man findet rationale Punkte auf einer Kurve, indem man sie mit einer Geraden rationaler Steigung schneidet. Diese Grundidee des Beweises von Bachet gilt es nun auf kompliziertere Kurven anzuwenden.

Elliptische Kurven

Der Name ist möglicherweise etwas irreführend. Eine elliptische Kurve hat mit einer Ellipse nur sehr entfernt etwas zu tun (siehe Bemerkung unten rechts). Für unsere Zwecke genügt es, sie leicht vereinfacht als die Menge aller Zahlenpaare – oder auch Punkte in der Ebene – (x, y) anzusehen, welche die Gleichung

$$y^2 = x^3 + ax + b$$

erfüllen. Dabei seien a und b ganze Zahlen; zusätzlich fordert man, dass $4a^3 + 27b^2 \neq 0$ sein soll, um gewisse unliebsame Sonderfälle (»Singularitäten«) auszuschließen. Diese Bedingung verhindert, dass die Kurve sich selbst überschneidet oder scharfe Spitzen bildet. Aus Gründen, die später klar werden, nimmt man noch einen »unendlich fernen Punkt« hinzu, den wir mit ∞ bezeichnen wollen.

Je nachdem, ob das kubische Polynom $x^3 + ax + b$ eine oder drei reelle Nullstellen hat (etwas anderes kann unter den obigen Voraussetzungen nicht auftreten), sieht die entsprechende elliptische Kurve wie in einem der Bilder auf S. 63 aus.

Bisher haben wir stillschweigend angenommen, dass x und y reelle Zahlen sein sollen. Das ist aber keineswegs zwingend. Die definierende Gleichung erfordert nur, dass x und y (ebenso wie a und b) zu einer Menge gehören, deren Elemente man nach den üblichen Rechenregeln addieren und multiplizieren kann und in der auch die Umkehrungen dieser Operationen, Subtraktion und Division, stets ausführbar sind (mit Ausnahme der Division durch 0). Eine solche Menge nennt man einen »Körper«. Elliptische Kurven be-

ENDLICHE KÖRPER ODER DIE MODULARE BRILLE

Für viele Alltagsprobleme ist die einzig interessante Information der Wochentag und nicht das vollständige Datum. Wenn man einfach die Tage der Reihe nach durchzählt, heißt das: Es kommt nicht auf die Nummer eines Tages an, sondern nur auf den Rest, der bleibt, wenn man diese Nummer durch 7 teilt.

Wer mit Bleistift und Papier zu rechnen gewohnt ist, kennt die »Neunerprobe«: Wenn die Rechnung stimmt, dann muss sie auch stimmen, wenn man statt der Zahlen selbst deren Reste bei der Division durch 9 verwendet (die als Quersumme von der Quersumme ... recht einfach auszurechnen sind). Allgemein gilt: Eine Gleichung mit Additionen und Multiplikationen unter ganzen Zahlen bleibt gültig, wenn man die Zahlen durch ihre Reste bezüglich Division durch eine bestimmte natürliche Zahl p ersetzt.

Nur sehen hier die Rechnungen etwas ungewohnt aus: Wenn zum Beispiel $p=7$ ist, gibt es nur die Zahlen 0 bis 6, und für $5 \cdot 3$ dürfen wir 1 statt 15 schreiben, denn 15 hat den Rest 1 bei Division durch 7, in Formeln: $15 \equiv 1 \pmod{7}$ (»15 ist kongruent 1 modulo 7«). Entsprechend ist $5 + 4 \equiv 2$ und $8 + 6 \equiv 0 \pmod{7}$.

Wenn p eine Primzahl ist, dann ist die Menge der Zahlen von 0 bis $p-1$ mit den genannten Rechenregeln ein Körper. (Für eine Nichtprimzahl wie 6 ergeben sich Gleichungen wie $3 \cdot 2 = 0$, was auf Widersprüche führt.) Man nennt diese Zahlen »Restklassen«. Im Beispiel meint das Symbol 2 die Klasse aller Zahlen, die bei der Division durch 7 den Rest 2 lassen.

Diese Körper erben ihre Rechenregeln durch die Bildung des Restes bei der Division durch p von den ganzen Zahlen, was gewisse Schlüsse erlaubt. So kann eine Gleichung, die in dem endlichen Körper falsch ist, in den ganzen Zahlen nicht richtig sein.

ziehen ihren Reiz unter anderem daraus, dass man ein und dieselbe Formel in Bezug auf verschiedene Körper interpretieren kann. Die zugehörigen »Kurven« haben auf den ersten Blick möglicherweise keine Ähnlichkeit miteinander; dennoch bestehen Beziehungen zwischen ihnen, die man nutzen kann.

Interessante Körper sind in diesem Zusammenhang

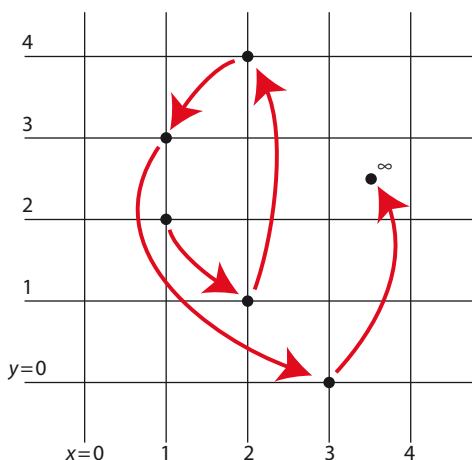
► der Körper der komplexen Zahlen, bestehend aus Zahlen der Form $a + bi$, wobei a und b reell sind und i (die »imaginäre Einheit«) die Gleichung $i^2 = -1$ erfüllt (Spektrum der Wissenschaft 9/2008, S. 86). Interpretiert man wie üblich eine komplexe Zahl $a + bi$ als Punkt (a, b) in der Ebene (der »gaußschen Zahlenebene«), so ist eine elliptische Kurve über den komplexen Zahlen eine zweidimensionale Fläche in einem vierdimensionalen Raum. Im Gegensatz zu ihrem reellen Gegenstück, das aus zwei getrennten Teilen bestehen kann, ist sie stets zusammenhängend. Man kann sie sich nicht mehr anschaulich vorstellen, aber gleichwohl Aussagen über ihre Gestalt treffen. So lassen sich aus ihrem »topologischen Geschlecht«, das heißt der Anzahl ihrer Löcher, wertvolle Aussagen herleiten (Kasten links).

► der Körper der rationalen Zahlen. Eine elliptische Kurve über den rationalen Zahlen ist dasselbe wie die Menge der rationalen Punkte

ELLIPTISCHE KURVEN SIND KEINE ELLIPSEN

Vielmehr haben sie ihren Namen von den elliptischen Integralen. Diese wurden ursprünglich eingeführt, um die Bogenlängen von Ellipsen zu bestimmen und damit auch die Länge von Planetenbahnen zu berechnen; diese sind in der Tat Ellipsen.

Die elliptische Kurve $y^2 = x^3 - 2$ besitzt fünf Punkte mit Koordinaten in dem endlichen Körper mit 5 Elementen, hinzu kommt ∞ . Der Punkt $P = (1, 2)$ erzeugt die ganze Gruppe: $P \oplus P = (2, 1)$, $P \oplus P \oplus P = (2, 4)$ und so weiter. Über den rationalen Zahlen hingegen besitzt diese Kurve nur zwei Punkte mit ganzzahligen Koordinaten.



auf einer elliptischen Kurve über den reellen Zahlen. Allerdings können diese Punkte sehr dünn gesät sein. Es stellt sich sogar die Frage, ob es überhaupt nur endlich viele rationale Punkte auf einer solchen Kurve gibt; dieser Frage wollen wir im Folgenden nachgehen.

► endliche Körper, insbesondere die Körper, die entstehen, wenn man die ganzen Zahlen modulo einer Primzahl p betrachtet (Kasten S. 65). Da eine elliptische Kurve über einem endlichen Körper nur endlich viele Punkte enthalten kann (die ganze »Ebene« besteht nur aus endlich vielen Punkten), sind die Verhältnisse dort häufig übersichtlicher. Von einer Kurve im üblichen Sinn kann allerdings nicht mehr die Rede sein.

Auf der Suche nach rationalen Punkten auf einer elliptischen Kurve folgen wir dem Rezept von Bachet. Nehmen wir an, dass wir bereits zwei rationale Punkte $P = (x_1, y_1)$ und $Q = (x_2, y_2)$ auf der elliptischen Kurve gefunden haben. Wenn nicht gerade $x_1 = x_2$ ist, schneidet die Gerade durch P und Q die elliptische Kurve in einem dritten Punkt $R = (x_3, y_3)$; das liegt im Wesentlichen daran, dass es sich um eine kubische Kurve handelt. Die Koordinaten dieses Punktes lassen sich ausrechnen:

$$x_3 = \left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \right)^2 - x_2 - x_1$$

$$y_3 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} (x_3 - x_1) + y_1$$

Bemerkenswerterweise sind x_3 und y_3 rational, wenn die Koordinaten von P und Q rational sind; auf Letztere werden ja nur die Grundrechenarten angewandt.

Wenn $x_1 = x_2$ ist, gibt es zwei Möglichkeiten. Entweder ist $P = Q$; dann ist die Gerade durch P und Q nicht mehr definiert, und man muss stattdessen die Tangente an die elliptische Kurve im Punkt P nehmen. Auch in diesem Fall lassen sich die Koordinaten von R

ausrechnen und sind ebenso rational wie die von P . Oder es ist $y_2 = -y_1$; dann verläuft die Gerade durch P und Q vertikal und trifft die elliptische Kurve nicht noch einmal. Um diesen Sonderfall in die allgemeine Theorie einzugliedern, interpretiert man den unendlich fernen Punkt ∞ als dritten Schnittpunkt.

Mit dieser Konstruktion gelang es Bachet zu zeigen, dass die Gleichung $y^2 = x^3 - 2$ unendlich viele rationale Punkte besitzt; er zeigte nämlich, dass mit (x, y) auch

$$\left(\frac{x^4 + 16x}{4y^2}, \frac{-x^6 + 40x^3 + 32}{8y^3} \right)$$

eine rationale Lösung ist. Mit dieser Verdopplungsformel ergeben sich unter anderem die Lösungen

$$(3, 5),$$

$$\left(\frac{129}{100}, \frac{-383}{1000} \right),$$

$$\left(\frac{2\,340\,922\,881}{7660^2}, \frac{113\,259\,286\,337\,292}{7660^3} \right).$$

Durch die genannten Berechnungsformeln kann man sich nun gänzlich von der Geometrie verabschieden: Zu je zwei Punkten P und Q einer elliptischen Kurve findet man stets einen dritten Punkt R , dessen Koordinaten demselben Körper angehören wie die von P und Q . Das gilt auch für die elliptischen Kurven über endlichen Körpern, deren Aussehen man mit der üblichen Vorstellung von Kurven nur schwer vereinbaren kann.

Das Gruppengesetz

Henri Poincaré (Bild links) trieb vor gut 100 Jahren diese Idee einen entscheidenden Schritt weiter. Mit dem oben definierten Punkt $R = (x_3, y_3)$ liegt auch dessen Spiegelbild $(x_3, -y_3)$ an der reellen Achse auf der elliptischen Kurve (denn die ist symmetrisch bezüglich der x -Achse). Poincaré definierte nun diesen Punkt als die »Summe« von P und Q , mit dem neuen Rechenzeichen \oplus , also

$$P \oplus Q = (x_3, -y_3).$$

Die so definierte Addition ist vollkommen verschieden von der üblichen Addition rationaler oder reeller Zahlen; aber sie erfüllt Rechenregeln wie Kommutativität

$$P \oplus Q = Q \oplus P$$

und Assoziativität

$$(P \oplus Q) \oplus R = P \oplus (Q \oplus R)$$



Henri Poincaré (1854 – 1912) wurde durch seine bahnbrechenden Arbeiten zum Dreikörperproblem berühmt. Die Poincarésche Vermutung über die Topologie von dreidimensionalen Flächen ist eines der sieben Millenniumsprobleme und wurde vor wenigen Jahren durch Grigori Perelman bewiesen.

(wenngleich der Nachweis der letzten Eigenschaft nicht ganz einfach ist). Mehr noch: Der unendlich ferne Punkt ∞ fungiert als neutrales Element entsprechend der Null bei der herkömmlichen Addition, denn es ist $P \oplus \infty = P$ für jeden Punkt P der elliptischen Kurve. Auch können wir das »Negative« eines Elements erklären: Zu $P=(x_1, y_1)$ ist $-P=(x_1, -y_1)$, denn die Summe dieser beiden Punkte ist ∞ , wie oben beschrieben. Mit dieser Addition bilden die Punkte einer elliptischen Kurve das, was die Mathematiker eine kommutative Gruppe nennen.

Damit konnte Poincaré auf das reichhaltige Arsenal der Gruppentheorie zurückgreifen. So kam er zu der Vermutung, dass man jeden Punkt einer elliptischen Kurve über den rationalen Zahlen als Summe endlich vieler »Basispunkte« ausdrücken könne. Etwas mathematischer ausgedrückt: Eine solche elliptische Kurve ist eine endlich erzeugte abelsche Gruppe. Louis Mordell gelang es 1922, diese Vermutung zu beweisen (Kasten unten).

DIE MORDELL-VERMUTUNG

Die Menge aller Punkte (x, y) , die eine Polynomgleichung $P(x, y) = 0$ erfüllen, bildet eine Kurve C . (Ein Polynom P besteht aus Potenzen der Variablen x und y und Konstanten, die beliebig miteinander multipliziert und zueinander addiert werden dürfen. Beispiel: $P(x, y) = 3(x + y)^4 + x^2/2$.) Sind die Koeffizienten des Polynoms rational, so ist die Frage interessant, ob die Kurve C rationale Punkte enthält. Um komplizierte Sonderfälle auszuschließen, fordert man, dass die Kurve glatt ist, also insbesondere keine Spitzen oder Doppelpunkte enthält.

Mordell vermutete, dass jede derartige Kurve von einem Geschlecht größer als eins höchstens endlich viele rationale Punkte enthält. Dabei ist das Geschlecht gleich der Anzahl der Löcher, wenn man C als Kurve über den komplexen Zahlen auffasst (wo sie eine Fläche ist).

Kegelschnitte, wie zum Beispiel ein Kreis, haben das Geschlecht 0 und stets unendlich viele rationale Punkte. Elliptische Kurven haben sämtlich das Geschlecht 1 und können endlich oder unendlich viele rationale Punkte haben.

Gerd Faltings bewies 1983 Mordells Vermutung mit Methoden der algebraischen Geometrie und wurde dafür auf dem Internationalen Kongress für Mathematik 1986 in Berkeley mit der renommierten Fieldsmedaille ausgezeichnet.

Die zur Fermat-Gleichung gehörige Kurve $u^n + v^n - 1 = 0$ hat das Geschlecht $(n-1)(n-2)/2$. Für $n=2$ ist das Geschlecht also null, und es gibt mit den pythagoräischen Tripeln unendlich viele Lösungen. Ist $n=3$, so ist das Geschlecht eins; für diesen Fall haben bereits Euler und Gauß die Unlösbarkeit bewiesen. Für $n \geq 4$ ist das Geschlecht größer als zwei, und Faltings' Beweis der Mordell-Vermutung zeigt, dass es also zu jedem festen Exponenten n höchstens endlich viele nichttriviale Lösungen in ganzen Zahlen gibt.

Aus der abc-Vermutung, die in der nächsten Folge dieser Serie besprochen wird, folgt die Mordell-Vermutung. Das hat Noam Elkies 1991 bewiesen.



LONDON MATHEMATICAL SOCIETY

Der amerikanische Mathematiker Louis Mordell (1888–1972) machte ab 1922 die Universität Manchester (England) zu einem Zentrum der Zahlentheorie.



Wissenschaftlerinnen mit Unternehmerinnen-geist gesucht!

Starten Sie durch mit NEnA, unserer einwöchigen Business-Akademie für die Chefinnen von morgen.

Entdecken Sie, was in Ihnen steckt, und wie Sie Ihre Forschung zu Geld machen können. Entwickeln Sie Ihre unternehmerischen Kompetenzen. Gemeinsam in Teams, gemeinsam mit uns.

Und gewinnen Sie mit Ihrer Abschlusspräsentation einen mehrmonatigen USA-Business-Aufenthalt. Sind Sie dabei?

**22. – 27. März 2009
NEnA III in Darmstadt**

**Unternehmen Sie was!
Anmeldungen bis 15.1.2009
unter www.nano4women.com**



**NEnA Teilnahmegebühr all-inklusive:
199 Euro. Stipendien möglich.**

NEnA ist als neue Initiative von nano4women Teil des Aktionsprogramms »Power für Gründerinnen« des Bundesministeriums für Bildung und Forschung. Die jeweils einwöchigen Nano-Entrepreneurship-Academies schlagen unter der Federführung der Universität Halle/Saale in Zusammenarbeit mit Uniconsult – Technologietransfer der Universität Paderborn, dem Zentrum für Weiterbildung und der science2public – Gesellschaft für Wissenschaftskommunikation sowie einem starken bundesweit wie regional aktiven Netzwerk aus über 100 Partnern die Brücke zwischen Wissenschaft und Wirtschaft.

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

ist Medienpartner dieser Initiative.



UNIVERSITY OF OXFORD



UNIVERSITY OF CAMBRIDGE

Die britischen Mathematiker Bryan Birch (oben) und Sir Henry Peter Francis Swinnerton-Dyer formulierten in den 1960er Jahren ihre bis heute ungelöste Vermutung.

Damit wird die zunächst undurchsichtige Struktur der Gruppe plötzlich sehr klar. Angenommen, man hat die Basispunkte P_1, P_2, \dots, P_m , dann hat jedes Gruppenelement die Form $n_1P_1 \oplus n_2P_2 \oplus \dots \oplus n_mP_m$, wobei n_1, n_2, \dots, n_m ganze Zahlen sind. (Dabei ist wie üblich $2P$ eine Kurzschreibweise für $P \oplus P$, $3P = P \oplus P \oplus P$, $-2P = (-P) \oplus (-P)$ und so weiter.) Man muss nur angeben, wie oft jeder Basispunkt in die Summe eingeht; auf die Reihenfolge kommt es ja nicht an. Und schon erinnert die ganze Gruppe an einen Vektorraum mit Basisvektoren P_1, P_2, \dots, P_m , in dem jeder Punkt durch seine (ganzzahligen) Koordinaten n_1, n_2, \dots, n_m beschrieben ist.

Allerdings kann es Basispunkte geben, die immer wieder zu sich selbst addiert irgendwann das neutrale Element ergeben. Die Folge $P, 2P, 3P, \dots$ enthält also nicht immer neue Punkte, sondern irgendwann den neutralen Punkt ∞ , und von da an wiederholt sich die Folge, denn $\infty \oplus P = P$. Ein solches Element heißt »von endlicher Ordnung«. Wenn jedes Element der Gruppe nur endliche Ordnung hat, dann hat die ganze Gruppe nur endlich viele Elemente. In der Tat können die rationalen Punkte auf einer elliptischen Kurve eine sehr magere Menge bilden. So liegen auf der Kurve $y^2 = x^3 - x$ nur die Punkte $(0, 0)$ und $(\pm 1, 0)$ zuzüglich ∞ . Andere Kurven wie etwa $y^2 = x^3 - 2$ hingegen haben unendlich viele rationale Punkte.

Nennen wir die Anzahl der benötigten Basispunkte mit unendlicher Ordnung den »Rang« der elliptischen Kurve. Nach dem Satz von Mordell enthält eine elliptische Kurve E genau dann unendlich viele rationale Punkte, wenn ihr Rang $r(E)$ größer als null ist. Zum Beispiel hat die elliptische Kurve zur Gleichung $y^2 = x^3 - 4$ den Rang 1, denn der Punkt $(2, 2)$ erzeugt alle rationalen Punkte.

Die Vermutung von Birch und Swinnerton-Dyer

Für die Frage nach der Anzahl der rationalen Punkte auf einer elliptischen Kurve kommt es also entscheidend darauf an, ob der Rang der Kurve positiv ist. Und dafür liefert die Vermutung von Birch und Swinnerton-Dyer ein Kriterium.

Dazu betrachtet man eine Karikatur der elliptischen Kurve. Offiziell heißt sie die »Reduktion« der elliptischen Kurve modulo einer Primzahl p ; das ist dieselbe Kurve interpretiert über dem endlichen Körper \mathbb{Z}_p , der Menge der Restklassen ganzer Zahlen modulo einer Primzahl $p > 2$ (Kasten S. 65). Es handelt sich also um die Menge aller Paare (x, y) , für die, modulo p gerechnet, die Gleichung $y^2 = x^3 + ax + b$ gilt.

Wie viele Punkte hat diese Kurve? Im Prinzip kann man es auszählen, denn x und y können nur endlich viele Werte annehmen. Man berechne für alle x von 0 bis $p-1$ den Wert $x^3 + ax + b$ modulo p und prüfe nach, ob dieser sich als das Quadrat einer Zahl y schreiben lässt. Wenn das der Fall ist, dann sind $(x, \pm y)$ zwei Punkte der Kurve (ein Punkt im Sonderfall $y=0$), sonst eben nicht.

Jetzt nehmen wir an, dass das Berechnungsergebnis $x^3 + ax + b$ vom Zufall abhängt. Das stimmt zwar nicht, bringt einen aber auf weiterführende Ideen, ähnlich wie bei Primzahlproblemen (Spektrum der Wissenschaft 12/2008, S. 94). In dem Körper \mathbb{Z}_p ist jedes zweite Element, das ungleich null ist, ein Quadrat. Rein per Zufall müsste unsere Kurve also $p+1$ Punkte haben: zwei Stück pro Quadrat, die man mit Wahrscheinlichkeit $1/2$ trifft, plus den unendlich fernen Punkt ∞ , den wir nach wie vor als neutrales Element der Addition benötigen.

Tatsächlich bewies Helmut Hasse 1936, dass die Anzahl der Punkte der reduzierten elliptischen Kurve um höchstens $2\sqrt{p}$ nach oben oder unten von dem statistischen Erwartungswert $p+1$ abweicht. Dies ist ein sehr tief liegendes Ergebnis; die Abschätzung ist nicht weiter zu verbessern.

Zu einem rationalen Punkt (x, y) auf einer elliptischen Kurve gibt es im Allgemeinen genau einen Punkt auf der modulo p reduzierten Kurve. Beispielsweise liegt $(3, 5)$ auf der durch $y^2 = x^3 - 2$ definierten Kurve, denn $5^2 = 3^3 - 2$. Diese Gleichung bleibt korrekt, wenn man sie modulo 5 nimmt; also ist $(3, 0)$ ein Punkt der modulo 5 reduzierten Kurve.

Allerdings können mehrere Punkte der ursprünglichen Kurve auf einen Punkt der reduzierten zusammenfallen, und es muss zu einem Punkt der reduzierten Kurve nicht unbedingt einen zugehörigen rationalen Punkt der ursprünglichen Kurve geben. Immerhin scheint ein loser Zusammenhang zu bestehen, den man in etwa folgendermaßen formulieren kann: »Haben die reduzierten Kurven viele Punkte, dann gilt das auch für die ursprüngliche Kurve.« Diese Idee, von den Eigenschaften der reduzierten Kurven auf die der ursprünglichen zurückzuschließen, nennt man in der Zahlentheorie das »Lokal-global-Prinzip«.

Es ist gültig für Kurven, in deren Gleichungen die höchste vorkommende Potenz 2 ist. Diesen so genannten quadratischen Formen entsprechen als Kurven die Kegelschnitte Kreis, Ellipse, Parabel und Hyperbel. Noch ist unbekannt, inwieweit das Prinzip auch auf die nächstkomplizierte Klasse, nämlich die elliptischen Kurven, anwendbar ist.

AUSNAHMEN UNTER DEN REDUZierten KURVEN

Es kann sein, dass die Bedingung $4a^3 + 27b^2 \neq 0$ zwar für die ursprüngliche Kurve erfüllt ist, nicht aber für die reduzierte. Die entsprechende Primzahl ist dann für diese spezielle Kurve unbrauchbar, weil in der reduzierten Kurve Ausnahmen (»Singularitäten«) auftreten können, die weitere Schlussfolgerungen vereiteln. Dies trifft jedoch für jede Kurve nur eine begrenzte Menge von Primzahlen, nämlich die Teiler von $4a^3 + 27b^2$.

In den 1960er Jahren präzisierten Bryan Birch und Sir Peter Swinnerton-Dyer, aufbauend auf numerischem Material und arithmetischem Sachverstand, das Lokal-global-Prinzip zu der Vermutung, die heute ihren Namen trägt. »Viele Punkte« auf einer elliptischen Kurve über den rationalen Zahlen soll »unendlich viele Punkte« bedeuten, »viele Punkte« auf einer reduzierten Kurve soll heißen »mehr als der Erwartungswert $p+1$ «. In einer Formel ausgedrückt lautet ihre Vermutung

$$\prod_{p \leq x} \frac{\#(E \bmod p)}{p} \sim C(\log x)^{r(E)}$$

Dabei bedeutet $\#(E \bmod p)$ die Anzahl der Elemente in der modulo p reduzierten elliptischen Kurve E . Das geteilt durch p ist größer als 1, wenn diese Anzahl größer oder gleich dem Erwartungswert $p+1$ ist. Haben also alle reduzierten Kurven (bis auf endlich viele Ausnahmen) in diesem Sinne »viele« Elemente, so strebt das Produkt (dargestellt durch das Symbol \prod) dieser Werte für alle Primzahlen bis x mit wachsendem x gegen unendlich, und zwar mit einer Geschwindigkeit, wie sie auf der rechten Seite des \sim -Zeichens angegeben ist: wie eine Konstante C (die von der Kurve E abhängt) mal dem Logarithmus von x hoch den Rang $r(E)$ der Kurve E . Ist dagegen der Rang gleich null (das heißt, hat die Kurve nur endlich viele rationale Punkte), bleibt auch die linke Seite beschränkt.

Dies ist die so genannte schwache Form der Vermutung von Birch und Swinnerton-Dyer; eine stärkere Form umfasst eine genaue Beschreibung der Konstanten C , in die weitere Strukturgrößen der elliptischen Kurve E eingehen.

Überraschende Erkenntnisse

Noch ist die Vermutung in beiden Formen unbewiesen; aber es gibt Ansätze zu einer Lösung. Der interessanteste Ansatz ist der Idee nachempfunden, mit der Bernhard Riemann über die Zetafunktion Erkenntnisse über die Verteilung der Primzahlen zu gewinnen versuchte und schließlich zu der Vermutung kam, die seinen Namen trägt (Spektrum der Wissenschaft 9/2008, S. 86): Man konstruiert zur elliptischen Kurve über eine Reihenentwicklung eine Funktion, die in diesem Zusammenhang nicht Zetafunktion, sondern L -Funktion heißt. Dann erweitert man durch analytische Fortsetzung ihren Geltungsbereich und zieht überraschende Erkenntnisse aus ihren Werten an Stellen, an denen sie ursprünglich nicht definiert war.

Für die L -Funktion definiert man zunächst $a(p) = p+1 - \#(E \bmod p)$; das heißt, $a(p)$ ist der

Unterschied zwischen der erwarteten und der tatsächlichen Anzahl der Punkte der modulo p reduzierten Kurve. Mit Hilfe der Funktion $a(p)$ definiert man nun

$$L(E, s) = \prod_p \left(1 - a(p)p^{-s} + p^{1-2s}\right)^{-1},$$

wobei das Produkt über alle ungeraden Primzahlen läuft, die nicht $4a^3+27b^2$ teilen. Da $a(p)$ nach Hasses Relation durch $2\sqrt{p}$ beschränkt ist, strebt der Ausdruck in der Klammer für $s > 3/2$ so schnell gegen 1, dass das Produkt konvergiert. $L(E, s)$ ist analytisch fortsetzbar, kann also für alle reellen und sogar komplexen s sinnvoll erklärt werden, wenn auch nicht durch obiges Produkt, und genügt einer bestimmten Funktionalgleichung. Das konnte Hasse nur vermuten. Den Beweis lieferten erst Andrew Wiles und andere mit dem Nachweis der Vermutung von Shimura und Taniyama, als deren – bedeutendes – Nebenprodukt der Beweis der fermatschen Vermutung abfiel. Damit lässt sich nun die Vermutung von Birch und Swinnerton-Dyer auch über die zu einer elliptischen Kurve E gehörige L -Funktion formulieren:

$$r(E) > 0 \iff L(E, 1) = 0$$

Setzt man $s=1$ in die Produktformel für $L(E, s)$ ein, so ergibt sich in der Tat

$$\prod_p \frac{p}{\#(E \bmod p)} = L(E, 1);$$

unglücklicherweise ist das Produkt aber divergent und somit der Zahlenwert $L(E, 1)$ nur durch analytische Fortsetzung erklärbar.

Immerhin zeigte Victor Kolyvagin 1989: Wenn der durch analytische Fortsetzung erklärte Wert $L(E, 1)$ ungleich null ist, dann ist der Rang von E gleich null. Mehr noch: Ist zwar $L(E, s)$ im Punkt $s=1$ gleich null, seine erste Ableitung aber nicht, dann ist der Rang gleich 1. Für spezielle elliptische Kurven (mit so genannter komplexer Multiplikation) haben neben anderen John Henry Coates und Andrew Wiles sowie Benedict Gross und Don Zagier noch weiter gehende Ergebnisse erzielt.

Ist die Vermutung von Birch und Swinnerton-Dyer richtig, so liefert sie letztlich einen Algorithmus, der erlaubt, sämtliche rationalen Punkte einer elliptischen Kurve zu bestimmen. Darüber hinaus hängt ein Verfahren von Jerrold Tunnell, mit dem man entscheiden kann, ob eine gegebene Zahl eine Kongruenzzahl ist, an der Richtigkeit dieser Vermutung.

Viele weitere Ergebnisse sind zu erwarten, sobald eine vollständige Lösung des Problems vorliegt. Es scheint jedoch, dass wir darauf noch lange warten müssen. ◁



Jörn Steuding (unten links) promovierte 1999 in Hannover, habilitierte sich 2004 in Frankfurt am Main, jeweils mit einer Arbeit zur analytischen Zahlentheorie, und ist nach einem kurzen Gastspiel in Madrid seit 2006 Professor am Institut für Mathematik der Universität Würzburg. Seine Ehefrau **Rasa Steuding** ist promovierte Mathematikerin; sie beschäftigt sich mit Zetafunktionen und interessiert sich für Kryptografie. **Peter Meier** promoviert bei Steuding über diskrete Potenzmomente der riemannschen Zetafunktion.

Barner, K.: How Old did Fermat Become? In: Mitteilungen der Deutschen Mathematiker-Vereinigung 9, S. 209–228, 2001.

Birch, B., Swinnerton-Dyer, H. P. F.: Notes on Elliptic Curves, I+II. In: Journal für reine und angewandte Mathematik 212, S. 7–25, 1963, und 218, S. 79–108, 1965.

Koblitz, N.: Introduction to Elliptic Curves and Modular Forms. Springer, Heidelberg 1984.

Koblitz, N.: A Course on Number Theory and Cryptography. Springer, Heidelberg 1994.

Singh, S.: Fermats letzter Satz. dtv, München 2000.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/974637.

»Am Ende interessiert der Mensch«



»Spektrum der Wissenschaft« sprach mit dem neuen Präsidenten des Deutschen Archäologischen Instituts (DAI) Hans-Joachim Gehrke über neue Trends in den Altertumswissenschaften und das Verhältnis von Alter Geschichte und Archäologie.



DAI ORIENT-ABTEILUNG, KLAUS SCHMIDT

Spektrum: Vermutlich bin ich der Erste, der Sie das fragt: Wie fühlt sich ein Althistoriker an der Spitze einer archäologischen Großforschungseinrichtung?

Professor Hans-Joachim Gehrke: (lacht) Nach meinem Wohlbefinden hat sich tatsächlich noch niemand erkundigt. Danke der Nachfrage, es ist faszinierend und äußerst spannend. Ich kenne das DAI ja schon seit vielen Jahren als Mitglied der Zentralkommission und im Rahmen der internen Qualitätssicherung. Aber nun bin ich viel näher am Geschehen, reise zu den Grabungsstätten, rede mit

Steinpfeiler in Form eines »T«, angeordnet zu Kreisen und mit Reliefs verziert, kamen auf dem Göbekli Tepe (Türkei) zum Vorschein. Die Archäologen des DAI erforschen dort die älteste Kultanlage der Menschheit.

den Leuten vor Ort, erfahre als Erster die neuesten Ergebnisse. Und natürlich kann ich nun die Ausrichtung der DAI-Forschung mitgestalten.

Spektrum: In Ihrer Antrittsrede verblüfften Sie Ihr Publikum mit einem Vergleich: Die Arbeit von Archäologen und Historikern ähnele der von Ermittlern in einem Kriminalfall.

Gehrke: Und das trifft es genau. Historiker sind Textspezialisten, sie befragen sozusagen die Zeugen, während Archäologen die Spuren sichern und auswerten. Gemeinsam übrigens mit Naturwissenschaftlern, die der archäologischen Forschung wertvolle Unterstützung geben. Erst wenn beides zusammenkommt, mündliche Überlieferung und materielle Hinterlassenschaften, lässt sich ein Fall lösen und die vergangene Kultur rekonstruieren. (schmunzelnd) Mein Großvater war übrigens Kriminalbeamter, deshalb kenne ich mich da ganz gut aus.



Spektrum: Haben Sie sich selbst schon in diesem Sinn als Detektiv betätigt?

Gehrke: Zu meinen Forschungsschwerpunkten gehört die Wirtschafts- und Siedlungsgeschichte Griechenlands. Irgendwann hatte ich alle relevanten Inschriften und Texte gelesen, und dennoch blieb manche Frage unbeantwortet. Erst die Kollegen, die Feldforschung betrieben, lieferten mir gemeinsam mit Geowissenschaftlern neue Informationen, etwa darüber, wie dicht bestimmte Gebiete besiedelt waren, welche Erträge ihre Äcker erbringen konnten. Daraus konnte ich auf bestimmte wirtschaftliche Strukturen und Entwicklungen schließen, und von daher auch auf mögliche Belastungen des sozialen Systems.

Spektrum: Hat der Historiker als Mann der Texte also immer das letzte Wort?

Gehrke: (lacht) Natürlich nicht, eine strenge Unterscheidung von Alter Geschichte und Archäologie lässt sich heute auch nicht mehr auf-

rechterhalten. Nehmen Sie die archäologische Disziplin Ur- und Frühgeschichte. Sie befasst sich mit Gesellschaften, die noch nicht über eine Schrift verfügten, beziehungsweise versucht deren Lebenswelt vor allem aus ihren materiellen Hinterlassenschaften zu rekonstruieren. Das ist Kulturgeschichte im besten Sinn.

Spektrum: Gerade deutsche Archäologen scheuen allerdings mitunter die Deutung ihrer Funde und konzentrieren sich auf das Ausgraben und Dokumentieren.

Gehrke: Wenn keine Texte vorliegen, muss man zweifellos Vorsicht walten lassen. Aber Sie haben schon Recht, die deutsche Archäologie darf ruhig etwas mehr wagen. Johann Gustav Droysen, einer der großen Historiker des 19. Jahrhunderts, sagte einmal: Am Faustkeil interessiert weniger seine Machart als der Geist, der ihn gemacht hat.

Spektrum: Fällt Ihrer Zunft ein solcher Zugang leichter?

Hans-Joachim Gehrke lehrte Alte Geschichte an der Universität Freiburg, seit März 2008 leitet er das Deutsche Archäologische Institut in Berlin.



Vom Fuß der Anden bis zum Hochland untersucht das DAI-Projekt »Andentranssekt« die Entwicklung der Kulturen Perus in vorspanischer Zeit. Im Bild ein Hof mit Speicherbauten der Paracas-Kultur (800–200 v. Chr.) auf 3300 Meter Höhe

Gehrke: Wer mit Texten arbeitet, mag dem Denken der Menschen in der Vergangenheit wirklich näher sein als jemand, der Scherben ausgräbt. Am Ende aber interessiert auch diesen häufig weniger die rekonstruierte Kanne als der Mensch, der sie benutzt hat, und dessen Lebenswelt. In welcher Art von Gesellschaft ist das Gefäß entstanden? Ein Handwerker hat es geformt, eine andere Person gekauft oder in Auftrag gegeben. Welche Vorstellungen hatten diese Menschen?

Spektrum: Wirkt in der Zurückhaltung deutscher Ur- und Frühgeschichte vielleicht der Sündenfall des Fachs im Dritten Reich nach, als so manche Fundstätte im Sinn nationalsozialistischer Ideologie umgedeutet wurde?

Gehrke: Das mag mitunter eine gewisse Rolle spielen, doch so einfach ist es sicher nicht. Zumal Rassenwahn und Germanentum schon im 19. Jahrhundert aufkamen und Nationalismus auch anderen Staaten nicht fremd war. Das DAI geht solchen Fragen im Rahmen einer Aufarbeitung seiner eigenen Vergangenheit nach und bezieht dabei die Zeit vor und nach dem Nationalsozialismus mit ein. Dieses Projekt ist erst angelaufen, aber ich bin auf die Ergebnisse sehr gespannt.

Spektrum: Sie erwähnten die Naturwissenschaften. Wie kommen die ins Spiel?

Gehrke: In Südperu etwa geht Markus Reindl im Projekt »Andentranssekt« der Frage nach, welcher kulturelle Zusammenhang zwischen den Bewohnern der Küstenwüste und den

Bauern in den Flusstälern des Andenhanges beziehungsweise den Gebirgsbewohnern in präkolumbischer Zeit bestand. Dabei spielt die Klimageschichte der Region eine große Rolle, denn Trockenphasen setzten offenbar Migrationen in Gang. Und diese Klimageschichte erkunden Geoarchäologen der Universität Heidelberg anhand von Bodenprofilen (siehe dazu SdW 5/2008, S. 70, die Redaktion).

Oder nehmen Sie die Strontiumanalyse: Anhand der Isotopenverteilung dieses Elements in Skelettresten lässt sich ermitteln, ob die Bewohner einer prähistorischen Siedlung in der Gegend geboren wurden oder einen Migrationshintergrund hatten, wie man auf Neudeutsch sagt. So etwas verraten materielle Hinterlassenschaften oft nicht. Im Lauf der Geschichte haben Migranten oft die Kultur ihrer neuen Heimat angenommen. Bringen Sie per Zeitmaschine ein Neugeborenes aus der Steinzeit in eine New Yorker Kinderstube. Es wird ein ganz normaler Amerikaner heranwachsen, der dieselbe Kleidung trägt wie alle und seinen Hunger mit einem Hot Dog stillt, statt im Central Park mit Pfeil und Bogen auf die Jagd zu gehen.

Spektrum: Das kulturelle Umfeld prägt also den Menschen?

Gehrke: Das ist heute eine wichtige Lehrmeinung. Die neuere Paläobiologie modifiziert dieses Bild nun ein wenig. Wenn man anhand der Erbsubstanz aus einem Gräberfeld nachweisen kann, dass Bewohner einer Siedlung miteinander verwandt waren, gab es vielleicht doch eine genetische Komponente, die den Stammesverband zusammenhielt. Doch wie wichtig war sie? Dieselbe Wissenschaft verrät uns ja auch, dass die heute lebende männliche Bevölkerung Islands zu einem Großteil von Wikingern abstammen soll, die Vorfahren der Frauen aber zu einem erheblichen Prozentsatz aus keltischen Gebieten kamen. Was in der isländischen Kultur heute nirgends zu erkennen ist.

Spektrum: Für einen Althistoriker kennen Sie sich gut in den Naturwissenschaften aus.

Gehrke: (lacht) Immerhin habe ich »Spektrum« seit 1986 abonniert, um mich auf dem Laufenden zu halten. Übrigens sollte man nicht vergessen, dass archäologische Forschung mitunter auch zurückwirkt. Das Projekt SINCOS, an dem wir beteiligt sind, ist dafür ein gutes Beispiel. Dort untersuchen Geophysiker gemeinsam mit Archäologen und Archäozoologen das Absinken der Ostseeküste gegen Ende der letzten Eiszeit. Damals erstreckte sich dort ein riesiger Süßwassersee, dessen Ufer von Jägern und Sammlern der Ertebølle-Kultur bewohnt waren. Das Abschmelzen des Eises ließ den Meeresspiegel



DAI / KRAK, MARKUS REINDL

ansteigen, und irgendwann im 6. Jahrtausend v. Chr. drang das Meer ein. Anhand der Artefakte lassen sich die Grabungsstätten – übrigens liegen sehr viele davon unter Wasser – recht präzise datieren. Deshalb erfahren Geowissenschaftler von Archäologen Näheres über wichtige erdgeschichtliche Vorgänge, aber auch darüber, wann der Übergang der Ernährung vom Süßwasser- zum Seefisch erfolgte. Übrigens: Der Projektleiter Friedrich Lüth weiß zu berichten, dass es den Menschen offenbar problemlos gelang, sich auf die neuen Verhältnisse einzustellen: Sie jagten andere Fische, aber sonst blieb alles beim Alten. Das ist doch erstaunlich.

Spektrum: Ich wusste nicht, dass das DAI auch Unterwasserarchäologen in seinen Reihen hat.

Gehrke: Ja, durchaus. Zudem kooperieren wir hier wie bei vielen Projekten mit Hochschulen und Institutionen vor Ort. Das wollen wir künftig sogar noch intensivieren, in Deutschland etwa durch eine noch engere Zusammenarbeit mit den Landesdenkmalämtern. Die ist jetzt schon recht gut, aber da lässt sich noch einiges verbessern.

Spektrum: Ihr Vorgänger Hermann Parzinger rief die Forschungscluster ins Leben, die auch Wissenschaftler einbinden, die nicht aus den Altertumswissenschaften stammen, wie Soziologen und Philologen. Werden solche Vorhaben fortgeführt?

Gehrke: Unbedingt, denn es geht um große Fragen der Menschheit. Warum wurde der Mensch sesshaft? Wie haben Innovationen, etwa die Erfindung der Bronze, soziale Strukturen verändert? Auf welche Weise definierte der Mensch neue Raumstrukturen, beispielsweise urbane Zentren? Ein vierter Cluster befasst sich mit Heiligtümern und der spannenden Frage, wie sich religiöse Vorstellungen in ihrer jeweiligen Gestaltung auswirkten. All diese Themen verfolgen wir weiter. Allerdings wollen wir manche davon im Lauf der Zeit in kleinere Einheiten mit enger gefassten Fragestellungen aufbrechen.

Spektrum: Solche blühenden Forschungs-Superstrukturen kontrastieren in Deutschland mit dem Sterben kleiner Fächer wie der Altamerikanistik.

Gehrke: Keine Sorge, die lebt noch, und generell scheint mir dieser Prozess fürs Erste gestoppt zu sein. Dafür hat sich auch das DAI stark eingesetzt. Viele Hochschulen haben inzwischen verstanden, dass so manches Klein- oder von internationalem Rang bewahrt werden muss – zum eigenen Vorteil. Ich mache mir inzwischen eher Sorgen, dass für uns wichtige Randgebiete der Naturwissenschaften wie zum Beispiel die Archäometrie oder die

Archäozoologie Budgetkürzungen zum Opfer fallen könnten.

Spektrum: Das DAI hat keine finanziellen Sorgen?

Gehrke: Die Talfahrt unseres Budgets ist beendet, wir blicken ganz optimistisch in die Zukunft. Die überaus positive Evaluierung durch den Wissenschaftsrat war da sehr hilfreich, aber auch der hohe Stellenwert, den Wissenschaft derzeit in der Außenpolitik genießt.

Spektrum: Indiana Jones mit Diplomatenkoffer statt Hut und Schaufel?

Gehrke: (lacht) Wir kooperieren mit Institutionen in anderen Ländern und unterstützen dort zudem die Ausbildung von Studenten und Doktoranden. Auf diese Weise vermitteln wir auch Kontakte zur deutschen Wissenschaft.

Spektrum: ... und deutsche Gründlichkeit.

Gehrke: Nicht umsonst sind deutsche Altertumswissenschaftler im Ausland so begehrt. In Oxford beispielsweise sollen sie, wie ich kürzlich hörte, 25 Prozent der Stellen besetzen. Ob das so sinnvoll ist oder ob wir nicht selbst mehr von denen, die hier zu Lande mit Steuergeldern sorgfältig ausgebildet wurden, Berufsaussichten geben sollten, sei wenigstens einmal gefragt.

Spektrum: Wird das DAI seine Präsenz im Ausland noch weiter verstärken?

Gehrke: Auf der Osterinsel beginnt Burckhard Vogt von unserer Kommission für die Archäologie Außereuropäischer Kulturen eine Grabung zur Erforschung der Frühgeschichte des Eilands. Und in China werden wir sehr wahrscheinlich bald mit einer eigenen Forschungsstelle präsent sein!

Spektrum: Wollen Sie quasi nebenbei noch aktiv Wissenschaft betreiben?

Gehrke: Unbedingt, nur wer selbst noch aktiv forscht, kann eine Einrichtung wie diese mit Sachverstand managen. Mein Vorgänger, Hermann Parzinger, ist da mit gutem Beispiel vorangegangen. Derzeit konzipiere ich ein Projekt in bester DAI-Manier: Alte Geschichte, Archäologie und Naturwissenschaften unter einem Dach, ein Verbund vor allem deutscher und griechischer Wissenschaftler. Gemeinsam wollen wir uns Olympia zuwenden, einem Paradestück der DAI-Grabungen. Doch vom Umfeld der Stätte wissen wir wenig. Und niemand wüsste genau zu sagen, warum Olympia seine Bedeutung als gesamthellenisches Nationalheiligtum erhielt. Also ein äußerst spannendes Thema. Außerdem: Ich arbeite in einer herrlichen, alten Villa in einem großzügigen Büro; aber ein kleiner Tisch im Keller der Bibliothek, umgeben von Folianten – für einen Althistoriker hat auch ein solcher Platz magische Anziehungskraft. <



DAI / F&E, HERALD LÜTHE

Wie veränderte sich das Ökosystem der Ostseeküste nach dem Ende der Eiszeit vor gut 10 000 Jahren? Wie passte sich der Mensch an die Veränderungen an? Fragen, die im Rahmen des DFG-Projekts SINCOS auch von Unterwasserarchäologen des DAI bearbeitet werden.

Das Gespräch führte **Klaus-Dieter Linsmeier**, Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/974638.

Der Computer als Formelentdecker

Ein Programm findet durch gezieltes Probieren heraus, was eine numerisch berechnete Zahl »eigentlich« ist. Aber davon werden die Mathematiker nicht arbeitslos, im Gegenteil: Sie finden mit Hilfe des Programms eine Fülle von Zusammenhängen, die es zu beweisen gilt.

Von Christoph Pöppe

Während ich versuche, die Flächenformen eines interessanten geometrischen Körpers zu bestimmen, wende ich den Strahlensatz in dieser Ebene und den Pythagoras in einer anderen Ebene an, löse diese oder jene Gleichung, setze Ergebnisse in andere Gleichungen ein ... Nach einigem Herumrechnen und Korrektur der offensichtlichsten Fehler habe ich für die Größe, die mich interessiert, einen höchst unansehnlichen Ausdruck gefunden, mit Wurzeln unter Wurzeln oder Schlimmerem. Was kann ich damit tun?

Am besten schreibe ich den Ausdruck in ein Computeralgebra-System wie »Maple« oder »Mathematica« und schaue nach, was die dort eingebauten Vereinfachungsverfahren damit anstellen. Die bringen mühelos die unhandlichsten Brüche auf den Hauptnenner, multiplizieren Klammern aus und bändigen die Flut der entstehenden Terme, auch wenn jede Menge Unbekannte darin stecken. Wenn es aber wirklich Wurzeln unter Wurzeln sind, finden sie in der Regel nichts zum Vereinfachen.

Dann lohnt es, die so mühsam bestimmte Formel schlicht zahlenmäßig auszurechnen – für spezielle Werte der

Unbekannten, wenn die Formel welche enthält. Plötzlich steht dann da so etwas wie 0,866 – und diese Zahl erkenne ich auf den ersten Blick als alte Bekannte wieder. Es handelt sich um $\sqrt{3}/2$, das Verhältnis von Höhe zu Seitenlänge im gleichseitigen Dreieck. Mit dieser neu erworbenen Weisheit schau ich mir meine geometrische Konstruktion noch einmal an, und siehe da: Hier ist doch das gleichseitige Dreieck, aus dem man alles Nötige schnell und bequem herleiten kann! Zu einem strengen Beweis hat mir nur dieser eine freundliche Hinweis auf den einen Zahlenwert gefehlt.

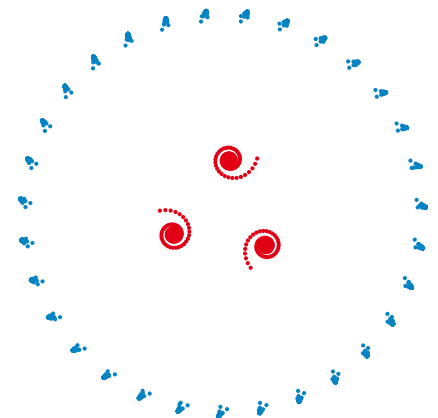
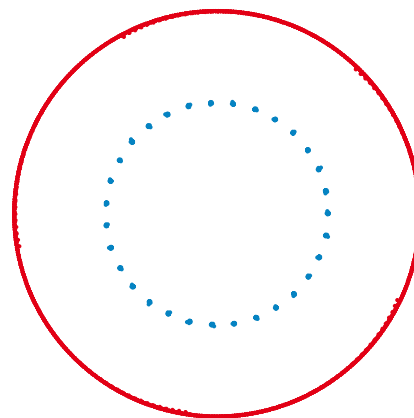
Unendliche Summen sind ein ähnlich dankbares Objekt für das Probieren. Wie viel ist $-1/3 + 2/9 + 3/27 + 4/81 + \dots + n(-1/3)^n \dots$? Man addiert die ersten 20 Terme und findet den Wert $-0,1875$; der ändert sich nicht merklich, wenn man 40 statt 20 Summanden nimmt, also schließt man messerscharf, der Wert der unendlichen Summe werde wohl $-3/16$ sein. Und siehe da: Nach etwas Wühlen in der Formelsammlung findet sich für derartige Summen eine geschlossene Darstellung, die das durch Probieren gewonnene Ergebnis bestätigt.

Das ist ja alles ganz nett und liefert vielleicht ab und zu auch einen origi-

nellen Weg zu einem längst bekannten Zusammenhang – aber kann man auf diese primitive Weise tatsächlich etwas Neues finden? Man stelle sich vor, Leonhard Euler (1707–1783), der produktivste und genialste Vielrechner aller Zeiten, hätte einen modernen Computer zur Verfügung gehabt. Er hätte ihn sicher zu nutzen gewusst, zum Beispiel, um von seiner berühmten Summe $1 + 1/4 + 1/9 + \dots + 1/n^2 + \dots$ die ersten 10 000 Terme auszurechnen und damit den Wert der Reihe wenigstens ungefähr zu ermitteln. Es stellt sich heraus, dass diese knechtliche Arbeit, die mit Papier und Bleistift zu erledigen selbst Euler wohl nicht auf sich genommen hätte, gerade mal drei richtige Dezimalstellen liefert. Und mit dieser mageren Information soll man darauf kommen, dass das Ergebnis $\pi^2/6$ ist? Das hätte selbst den großen Rechenmeister überfordert.

Euler hat es ganz anders gemacht (Spektrum der Wissenschaft Spezial 2/2005, »Unendlich (plus eins)«, S. 19). Er nimmt eine Funktion, die überhaupt keine erkennbare Beziehung zur Summe über $1/n^2$ oder zu der Konstanten π^2 hat, nämlich die Sinusfunktion, betrachtet sie gewissermaßen aus zwei verschiedenen Perspektiven, gewinnt aus der Tatsache, dass die so gewonnenen, sehr ver-

Auch das Durchprobieren von Beispielen gehört zur experimentellen Mathematik. Eine Folge komplexer Zahlen verhält sich völlig unterschiedlich je nachdem, ob zwei Parameter der Folge rationale Zahlen mit kleinen Nennern sind oder nicht. Bailey und Borwein fanden durch das Studium vieler Bilder derartiger Folgen (Glieder mit ungerader Nummer sind blau, solche mit gerader Nummer rot gefärbt) Zusammenhänge über Kettenbrüche von Ramanujan, die diesen Folgen zu Grunde liegen, und konnten sie beweisen.



schiedenen Bilder gleichwohl dasselbe Objekt zeigen, eine algebraische Beziehung – und wie das Kaninchen aus dem Hut springt Eulers berühmte Formel aus dem Dickicht der Herleitungen.

Für alle, die nicht ganz über Eulers Genialität verfügen, gibt es jetzt eine gute Nachricht. Probieren funktioniert, weit über die genannten Einfachbeispiele hinaus. Beglückende Wiedersehenserlebnisse stellen sich ein, ohne dass man die Dezimalen von π oder $\sqrt{3}$ auswendig können müsste, geschweige denn die von $\sqrt{3}/2$ oder $\pi^2/6$.

Wissenschaftliches Probieren

Es gibt ein Verfahren, das eine als Dezimalbruch ausgedrückte Zahl entgegennimmt. Vielleicht ist es eine endliche Summe als Näherung an die unendliche oder das Ergebnis einer undurchsichtigen Berechnung. Oder es ist die durch ein numerisches Verfahren, sprich durch immer weiter verbesserte Näherungsrechnung, gefundene Lösung einer Gleichung. Wir vermuten, dass diese Zahl sich durch, sagen wir, π , $\sqrt{2}$, $\sqrt{5}$ und vielleicht noch den natürlichen Logarithmus von 2 ausdrücken lässt, wobei in dem gesuchten Ausdruck außer den genannten krummen Zahlen nur ganze Zahlen vorkommen sollen. Dann findet das Verfahren diese ganzen Zahlen, oder es gibt die Auskunft zurück, dass sie, wenn es sie überhaupt gibt, sich in astronomischen Größenordnungen verlieren.

Eigentlich hätte man lieber die klare Auskunft »es gibt diese ganzen Zahlen« oder »es gibt sie nicht«. Aber das kann kein Verfahren leisten, aus prinzipiellen Gründen: Numerische Berechnungen haben stets nur endliche Genauigkeit. In den Standardanwendungen beträgt sie ungefähr 16 Dezimalstellen. Mit dieser Genauigkeit kann man jede beliebige

Zahl durch – beispielsweise – $a_1\pi + a_2\sqrt{2}$ mit ganzzahligen a_1 und a_2 darstellen; allerdings sind dann im Allgemeinen a_1 und a_2 selbst in der Größenordnung 10^{16} . Interessant sind also nur Relationen mit kleinen ganzen Zahlen.

Nach verschiedenen Vorläufern ist heute ein Verfahren namens PSLQ Stand der Technik. Sein Autor Helaman Ferguson ist einer breiteren Öffentlichkeit weniger durch diese Leistung bekannt – immerhin wird PSLQ zu den zehn bedeutendsten Algorithmen des Jahrhunderts gezählt – als vielmehr durch seine mathematischen Skulpturen. Aus Stein meißelt er Objekte wie dreikantige Tori; seine Bronzeskulptur »Alexander's Horned Sphere« hat Kultstatus erreicht.

Eine Parallele immerhin gibt es zwischen PSLQ und Steinmetzarbeit: Beide kosten richtig viel Kraft und Geduld. Erst ab einem PC des Baujahrs 2004 werden die Rechenzeiten erträglich.

Man beachte, dass PSLQ die genannten Identitäten mit ganzzahligen Koeffizienten zwar findet; aber das stellt noch keinen Beweis dar. Es gibt auch genug abschreckende Beispiele für »falsche Freunde«, die wie Identitäten aussehen, aber in Wirklichkeit keine sind. Martin Gardner hat 1975 die Leser seiner Kolumne »Mathematical Games« im »Scientific American« mit der Behauptung in den April geschickt, $e^{\pi\sqrt{163}}$ sei eine ganze Zahl – was sich erst dann als falsch erweist, wenn man sie auf mehr als zwölf Stellen hinter dem Komma ausrechnet. Aber Zweifel an einer Identität verstummen zusehends, wenn sie sich über 100 oder 200 Dezimalstellen hinweg als gültig erweist.

Zudem verbessern hohe Stellenzahlen bei den Eingangsdaten die Trennschärfe des PSLQ-Algorithmus. Der kam daher

erst richtig zu Ehren, als David Bailey vom Lawrence Berkeley National Laboratory in Berkeley (Kalifornien) ihn mit seiner Hochgenauigkeitsarithmetik kopelte, einem Satz von Computerprogrammen, mit denen man Zahlen mit etlichen tausend Stellen hinter dem Komma addieren und multiplizieren kann. Jonathan M. Borwein von der Dalhousie University in Halifax (Kanada) und weitere Mathematiker taten sich mit Bailey zusammen und fuhren mit dem neuen Verfahren reichhaltige Ernte ein.

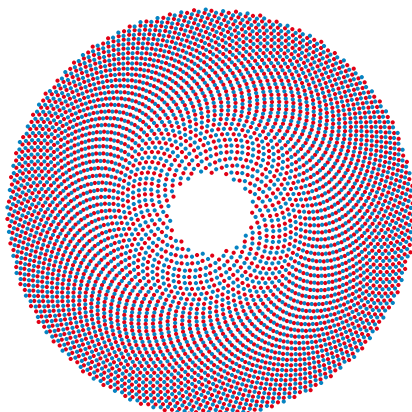
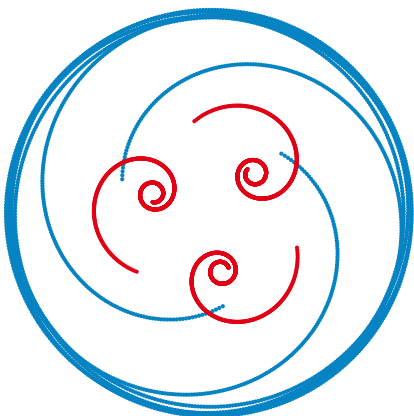
Das erste spektakuläre Ergebnis ihrer Bemühungen ist die »Seilbahn für π « (Spektrum der Wissenschaft 5/1997, S. 10): Man muss die Dezimalstellen der Kreiszahl π nicht, wie üblich, eine nach der anderen berechnen, sondern kann auch mit der millionsten und allen folgenden Stellen anfangen, ohne die vorherigen zu kennen. Vorausgesetzt allerdings, es sind keine Dezimalstellen. Die Seilbahn funktioniert nur, wenn man im Zahlensystem zur Basis 16 rechnet (oder zur Basis 2, was auf dasselbe hinausläuft, da 16 eine Zweierpotenz ist).

Hier stört auch die oben angesprochene Standardschwäche des numerischen Rechnens, die begrenzte Genauigkeit, nicht. Die gesuchten Größen sind die Stellen der Hexadezimalentwicklung von π , das heißt ganze Zahlen zwischen 0 und 15. Da genügt es zu wissen, dass die Unbekannte gleich 5 mit einer Fehlerbreite von vollen 10 Prozent ist; denn dann kann sie gar nichts anderes sein als 5.

Echte Computerbeweise

In solchen und ähnlichen Fällen liefert also das Probierverfahren PSLQ nicht nur wohl begründete Vermutungen, für die es einen Beweis zu suchen lohnt, sondern gleich handfeste Beweise. Diese sind vergleichbar dem Beweis des Vierfarbensatzes oder dem der keplerschen Vermutung (Spektrum der Wissenschaft 4/1999, S. 10): Sie alle verwenden den Computer nur, um Dinge auszurechnen, die man mit dem eigenen Kopf zu Lebzeiten nicht und schon gar nicht fehlerfrei erledigen könnte. Es bleibt allerdings, vor allem bei traditionell gesonnenen Mathematikern, das ungute Gefühl zurück, es entgehe einem dabei ein wesentlicher Teil der Beweisidee.

Inzwischen ist das Forschungsgebiet so angewachsen, dass seine Vertreter es voll Stolz zu einem eigenen Teilgebiet erklärt haben: »experimentelle Mathema-



CHRISTOPH POPE

GANZZAHLIGE RELATIONEN FINDEN: DAS PSLQ-VERFAHREN

Seien n reelle Zahlen x_1, x_2, \dots, x_n als Dezimaldarstellungen mit möglicherweise großer, aber endlicher Genauigkeit gegeben. Es geht darum, ganze Zahlen a_1, a_2, \dots, a_n zu finden, so dass $a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n = 0$ ist. Die »triviale« Lösung des Problems – man setze alle a s gleich 0 – ist ausdrücklich ausgeschlossen.

Auf diese Form lassen sich viele Probleme der experimentellen Mathematik bringen. Die beiden häufigsten Beispiele:

- Man hat eine Zahl y berechnet und gute Gründe für die Annahme, dass sie eine rationale Linearkombination gewisser Konstanten wie $\pi, \pi^2, \log 2$ und so weiter ist. Das heißt, mit gewissen rationalen Zahlen r_1, r_2, r_3 gilt $y = r_1\pi + r_2\pi^2 + r_3 \log 2$. Man multipliziere diese Gleichung mit dem Hauptnenner von r_1, r_2 und r_3 , bringe die rechte Seite der Gleichung nach links und hat damit das Problem in obige Standardform gebracht.
- Man will wissen, ob eine berechnete Zahl x algebraisch ist, das heißt ob es ganze Zahlen $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ gibt, so dass

$a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n = 0$ ist. Hier genügt es, für x_1, x_2, \dots, x_n der Reihe nach die Zahlen $1, x, x^2, x^3, \dots$ zu setzen.

Geometrisch ausgedrückt besteht das Problem darin, in einem n -dimensionalen Raum einen Vektor (a_1, a_2, \dots, a_n) zu finden, der auf dem gegebenen Vektor (x_1, x_2, \dots, x_n) senkrecht steht, aber nur ganzzahlige (und möglichst kleine) Komponenten hat. Wenn man sich eine Schranke für die Größe dieses ganzzahligen Vektors vorgibt, stehen zwar nur endlich viele Vektoren zur Wahl, aber sie alle auszuprobieren wäre trotzdem hoffnungslos.

Stattdessen formuliert das PSLQ-Verfahren das Problem zunächst in ein Eigenwertproblem für eine Matrix um. Für derartige Probleme gibt es hoch entwickelte Lösungsverfahren. Helaman Ferguson hat eines dieser Verfahren so ausgearbeitet, dass es für die Hochgenauigkeitsarithmetik geeignet ist und nicht unter den numerischen Instabilitäten seiner Vorgängerverfahren leidet.

tik«, komplett mit Einführungskursen, wissenschaftlichen Tagungen, einer Fachzeitschrift – und einem öffentlichen Aufruf an die Meister der Zunft, ihr Können zu zeigen. Die experimentellen Mathematiker taten es damit ihren Kollegen von der klassischen Numerik nach. Nick Trefethen von der University of Oxford hatte 2002 unter dem Titel »100 Digit Challenge« eine Sammlung von zehn Aufgaben veröffentlicht, an denen sich seine Numerikerkollegen die Zähne ausbeißen sollten. Dem folgten Bailey und seine Kollegen mit zehn Aufgaben aus ihrem Bereich.

Das Sortiment ist wahrlich bunt gemischt. Eine Aufgabe entstammt der Chaostheorie: Gesucht ist eine algebraische Gleichung für die Stelle, an der die stabile Lösung eines dynamischen Systems von Periode 4 zu Periode 8 übergeht. Oder man soll die Kraft ausrechnen, die auf ein Ion im Inneren eines unendlich ausgedehnten Kochsalzkristalls wirkt. Oder Aussagen zum Verhalten einer Folge machen, die ihrerseits in Beziehung zu speziellen Kettenbruchentwicklungen steht (Bild S. 76/77).

Oder einen Zufallsfund aufklären: Der Student Enrico Au-Yeung hat 1993 von der unendlichen Summe

$$1 + (1+1/2)^2/4 + (1+1/2+1/3)^2/9 + \dots + (1+1/2+\dots+1/k)^2/k^2 + \dots$$

die ersten 500 000 Terme ausgerechnet und das Ergebnis 4,59987... erhalten; auf diese sechs Stellen genau ist das gleich $17\pi^4/360$. Damit kommt er zu

seinem Betreuer Jonathan Borwein; der hält das zunächst für ein belangloses Zusammentreffen, vergleichbar dem »falschen Freund« Gardners. Immerhin rechnet er an der Reihe herum, bis er sie in ein Integral umgeformt hat. Das sieht zwar nicht wirklich schöner aus, lässt sich aber mit erträglichem Aufwand auf wesentlich mehr Stellen genau berechnen. Zu seiner Überraschung stimmen die beiden Werte nun auf mehr als 30 Stellen miteinander überein!

Generalangriff auf $17\pi^4/360$

Jetzt will Borwein es natürlich wissen. Er fährt das ganze Arsenal der Analysis auf, darunter die berühmte Zetafunktion, den Gegenstand der riemannschen Vermutung (Spektrum der Wissenschaft 9/2008, S. 86). Damit nicht genug: Borwein verallgemeinert die Zetafunktion auf mehrere Variable, definiert eine andere Zahl, die einer Beziehung zwischen solchen verallgemeinerten Zetafunktionen genügt, findet mit Hilfe von PSLQ eine ganzzahlige Relation für sie – und hat am Ende mit einer Mischung aus algebraischem und Zahlenrechnen eine ganze Klasse von Problemen gelöst, unter denen das ursprüngliche nur noch ein Spezialfall ist.

Schon richtig: Der Erfolg dieser ganzen Arbeit hängt entscheidend am erfolgreichen Ausgang der computergestützten Suche nach einer ganzzahligen Relation. Aber es kann keine Rede davon sein, dass die Arbeit des Mathematikers zur geistlosen Anwendung eines Softwarepakets verkümmert. Allein um das

Problem für die Software mundgerecht aufzubereiten, ist ein großes Maß an Kreativität erforderlich. Darüber hinaus sind die Computeralgebra-Systeme, die für derlei Arbeiten als eine Art Programmiersprache dienen, so reichhaltig und kompliziert geworden, dass sie so etwas wie persönliche Eigenheiten entwickeln. Während sie mit einem Problem in der einen Form nichts anzufangen wissen, lösen sie es in der anderen Form mit Bravour, und niemand weiß, warum.

Experimentelle Mathematik ist eine ganz besondere Mischung aus Computer-Rechnen – sowohl zahlenmäßig als auch mit algebraischen Symbolen – und klassischen mathematischen Verfahren. ◀



Christoph Pöppe ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

Bailey, D. H. et al.: Experimental Mathematics in Action. A K Peters, Wellesley (Massachusetts) 2007.

Bailey, D. H. et al.: Ten Problems in Experimental Mathematics. In: The American Mathematical Monthly 113, S. 481 – 509, 2006.

Bailey, D. H., Borwein, J. M.: Experimental Mathematics: Examples, Methods and Implications. In: Notices of the American Mathematical Society 52, S. 502 – 514, 2005.

Bornemann, F. et al.: The SIAM 100-Digit Challenge. A Study in High-Accuracy Numerical Computing. SIAM, 2004.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de/artikel/976030.

ERDE 3.0

Die folgenden Seiten läuten eine neue Rubrik in »Spektrum« ein, die künftig im Abstand von zwei bis drei Monaten erscheinen soll. Warum die Erde in ihrem Titel vorkommt, erklärt sich von selbst. Aber was bedeutet der Zusatz 3.0? Nun, er soll zum Ausdruck bringen, dass der Globus nicht mehr nur der Lebensraum von uns Menschen ist, sondern auch bis zu einem gewissen Grad unsere Schöpfung. Und wie bei jedem Produkt von Menschenhand gibt es hin und wieder eine verbesserte Version oder ein Upgrade, wie es in der Computersprache heißt.

In diesem Sinn war die Erde 1.0 der Planet, den wir ererbt haben – der seit Milliarden von Jahren existiert und sich entwickelt hat, bevor der Mensch in großem Stil eingriff. Damals wurde die Umwelt beherrscht von geschlossenen ökologischen Kreisläufen und einigen geologischen sowie astronomischen Gegebenheiten wie der Wanderung der Kontinente und der Sonneneinstrahlung. Das Leben auf der Erde war von seinem Wesen her nachhaltig. Selbst nachdem der Mensch die Landwirtschaft erfunden und damit seinen Fußabdruck in der Natur erheblich vergrößert hatte, blieb sein Einfluss lokal begrenzt und, global gesehen, weitgehend vernachlässigbar.

Das änderte sich vor zwei Jahrhunderten, als die industrielle Revolution unserer Spezies einen Hebel an die Hand gab, Gesundheit und Wohlstand auf ein nie da gewesenes Niveau zu heben – allerdings zum Preis des verschwenderischen Verbrauchs natürlicher Ressourcen. Was damals Gestalt annahm, lässt sich als erstes Upgrade auffassen: die Einführung der Erde 2.0.

Die Folgen waren freilich fatal. Inzwischen sind wir unabsichtlich zur Triebfeder eines möglicherweise verhängnisvollen Klimawandels geworden. Wir haben biologische Arten in einer Schnelligkeit ausgelöscht, wie die Erde das seit dem Untergang der Dinosaurier nicht mehr erlebt hat, und wir haben die Meere in einem Maß leer gefischt, dass die Fischerei bis zur Mitte des Jahrhunderts zusammenbrechen könnte. Trotz allem leidet ein Großteil der Menschheit immer noch unter schrecklicher Armut und Chancenlosigkeit.

In dieser Situation scheint ein neues Upgrade, das die schlimmsten Fehler der Erde 2.0 ausbügelt, dringend geboten. Es sollte den heutigen Wohlstand mit der Nachhaltigkeit der Version 1.0 verbinden. In diesem Geist wird



die vorliegende Rubrik über Ansätze zu einer Versöhnung zwischen Ökonomie und Ökologie berichten.

Eine bessere Zukunft für uns und den Rest der Welt ist möglich, verlangt jedoch entschiedenes und manchmal auch drastisches Handeln auf allen Ebenen der Gesellschaft, von den gewählten Volksvertretern über die derzeit viel gescholtenen Manager bis zu den gewöhnlichen Verbrauchern. Grundlage für Entscheidungen sollten die jeweils verfügbaren Technologien und der Stand der Wissenschaft auf dem betreffenden Gebiet sein. Tragbare Lösungen müssen sowohl die Belange der Umwelt als auch Erfordernisse der wirtschaftlichen Entwicklung berücksichtigen statt eines zu Gunsten des anderen zu opfern. Die in der ersten Ausgabe beschriebenen Projekte künftiger Ökostädte sind ein gutes Beispiel dafür.

Noch existiert die Erde 3.0 nicht einmal als Betaversion, sondern im Wesentlichen nur als Konzept, von dem allenfalls einzelne vorläufige Module verwirklicht sind. Anliegen dieser Rubrik ist es, das Bewusstsein für die Aufgabe zu schärfen, interessante Ideen oder Lösungsansätze zu präsentieren, Anregungen zu geben und Mut für eine nachhaltige Zukunft zu machen.

Die Redaktion

Ökostädte der

Städtebauer in den USA, China und Abu Dhabi wollen die Umweltkosten des urbanen Lebens senken oder gar vollständig vermeiden.

Von David Biello

BAUEN IN DER BUCHT

Treasure Island – Verwandlung einer Militärbasis mit versiegeltem Boden in einen grünen Wohnpark

Heute ist es noch ein fast vollständig asphaltierter Marineflieger-Stützpunkt, angelegt auf einem Schutthaufen im Meer, der beim Ausbaggern der Bucht von San Francisco in den 1930er Jahren entstand. Bis 2020 soll die 21 Hektar große Insel eine der umweltfreundlichsten Siedlungen in den USA beherbergen. Ein Bebauungsplan des Ingenieurbüros Arup sieht 6000 Apartments und Wohnanlagen vor, gesäumt von Hochhäusern an der Front zu San Francisco hin. Die Wohnungen und die angrenzenden Geschäfte werden 50 Prozent ihrer Energie aus erneuerbaren Ressourcen beziehen, hauptsächlich Fotovoltaik und Solarthermie. Laut Bebauungsplan verläuft das kompakte Straßennetz in einem Winkel von 35 Grad nach Südosten, damit die Sonne die Sonnenkollektoren auf den Dächern möglichst lange bescheint. Zugleich werden die Bewohner so vor der frischen Brise in der Bucht geschützt. Alle Gebäude sind nur 15 Minuten Fußweg vom Fähranleger nach San Francisco entfernt. Frischwaren können die Bewohner größtenteils von einem lokalen Biobauernhof beziehen, der als Dünger den Abfall einer Kläranlage verwendet, die bereits auf der Insel existiert.

Trotz allem bleibt ein Rest von Umweltbelastung, vor allem bei den Emissionen an Treibhausgasen. »Das Ziel, den Kohlendioxidausstoß auf null zu bringen, wäre mit existierenden Technologien und angesichts der Notwendigkeit, für die Eigentümer Gewinne zu erwirtschaften, einfach nicht realistisch«, erklärt Garry Lawrence, einer der Direktoren von Arup, »aber wir werden die Siedlung so kohlenstoffneutral wie möglich gestalten.« Durch diesen Kompromiss halten sich, wie Lawrence anmerkt, die Baukosten in einem vernünftigen Rahmen. »Wenn man, wie hier, Umweltfreundlichkeit im Rahmen eines integrierten Gesamtkonzepts verfolgt, dann sollte das ökologische Design keine Preisaufschläge mit sich bringen«, erklärt er.

ANSICHT AUS DER LUFT



Zukunft



NORDANSICHT VON
TREASURE ISLAND 2020

SKIDMORE, OWNING & MERRILL (SOM)



DIE INSEL HEUTE

MIT FROL. GEN. VON RUTHANN O'CONNOR



SKIDMORE, OWNING & MERRILL (SOM) / SHAWY / CH2 LANDSCAPE ARCHITECTURE

TREASURE ISLAND AUF EINEN BLICK

Lage: San Francisco Bay

Größe: 21 Hektar

Zeitplan: Grundsteinlegung 2010, erste Wohnungen beziehbar 2013, Fertigstellung 2020

künftige Einwohnerzahl: 13500 Bewohner, angezogen durch ein Sortiment aus relativ günstigen Wohnungen und solchen zu marktüblichen Preisen

Kosten: vertraulich, schätzungsweise 3 Milliarden US-Dollar

ökologische Highlights: Treasure Island wird überwiegend renaturiert; 14 der 21 Hektar sind für Parks, Bauernhöfe oder Grünflächen vorgesehen. Die 6000 neuen Wohneinheiten werden mit Solarstrom betrieben und in verdichteter Bauweise in Gehweite zum Fähranleger an der Süd- und Westküste errichtet.



DPA / LANDOV / MCT, OVE ARUP

GRÜNE OASE IM JANGTSE

Dongtan – ökologisches Vorzeigeprojekt der aufstrebenden Industriemacht China

Im August 2005 beauftragte die Shanghai Industrial Investment Cooperation das Ingenieurbüro Arup mit dem Entwurf einer ökologischen Satellitenstadt für die boomende Küstenmetropole. Sie wird auf und im Umkreis der Insel Chongming liegen, die durch Ablagerungen von Schwemmsand im Mündungsgebiet des Jangtse entstanden ist und zu den größten solchen alluvialen Inseln auf der Welt zählt. Die Siedlung soll schrittweise entstehen und im Jahr 2050 mit höchstens 500 000 Einwohnern ihre endgültige Größe erreichen. Ziel ist, viele der natürlichen Feuchtgebiete zu bewahren, da sie zu den wenigen Refugien für Vögel in dem sich schnell entwickelnden Land gehören.

Dongtan zählte zu den ersten offiziell propagierten Ökostädten. Sie soll keinen Abfall produzieren, hohen Standards in Sachen Energieeffizienz genügen, Strom überwiegend aus Windkraftanlagen beziehen und frei von Transportmitteln sein, die fossile Treibstoffe benötigen. Allerdings wurde der Baubeginn nach Auskunft von Roger Wood, einem der Direktoren von Arup, bis mindestens Mitte dieses Jahres verschoben. Grund ist vor allem das rasante Entwicklungstempo in anderen Gebieten Schanghais. Immerhin hat der Bau der Brücke und des Tunnels zum Festland schon begonnen. Die Fertigstellung ist für Ende des Jahres geplant. Diese Verbindungen »werden als Katalysatoren für den Beginn der Erschließung wirken«, hofft Wood.

Trotz der Verzögerung sieht er das Projekt nicht gefährdet, da sowohl die regionalen Behörden als auch führende Politiker in der Zentralregierung – darunter Präsident Hu Jintao – darauf drängen, beim Städtebau ökologische Aspekte stärker zu berücksichtigen. Über Dongtan hinaus ist Arup an der Planung von wenigstens fünf weiteren Ökostädten in China beteiligt. Dazu zählt auch die Sanierung der alten Stahlstadt Whanzhuang in der Provinz Hebei zwischen Peking und der Hafenmetropole Tianjin.





DPA / LANDOV / F&C, TIM JOHNSON



AG FOCUS / SPL / WORLD SAT INTERNATIONAL

DONGTAN AUF EINEN BLICK

Lage: Insel Chongming, Schanghai, China

Größe: 11,5 Hektar im Jahr 2010, 74 Hektar 2020 und 340 Hektar 2050 auf einer 13800 Hektar großen Inselgruppe

Zeitplan: Baubeginn 2009, erste Wohneinheiten 2010 bezugsbereit, Fertigstellung bis 2050

künftige Einwohnerzahl: steht noch nicht fest, 5000 Bewohner zu Beginn bis höchstens 500 000 am Ende

Kosten: keine Angaben

ökologische Highlights: Bewahrung von Feuchtgebieten für Vögel und teilweise Renaturierung von Agrarland. Dongtan wird 90 bis 100 Prozent seiner Abfälle sammeln, aufbereiten und wiederverwerten. Der Strom stammt ausschließlich aus Wind und Biomasse. Als Transportmittel dienen überwiegend wasserstoff- oder stromgetriebene Fahrzeuge. »Innerhalb der Stadtgrenzen sollen nur Fahrzeuge erlaubt sein, die regenerierbare Rohstoffe nutzen oder emissionsfreie Energieträger verwenden«, erklärt Roger Wood von Arup.



David Biello ist als Redakteur bei »Scientific American« auf Umweltfragen spezialisiert.

AUF SCHWARZES GOLD GEGRÜNDET

Masdar – grüne Oase in der arabischen Wüste, gespeist von sprudelnden Ölquellen

Ein Scheichtum, das seinen Wohlstand dem Erdöl verdankt, baut eine Stadt, die keinen Tropfen davon verbraucht. Unterirdische Elektromobile, »Personen-Schnelltransporter« genannt, sollen Passagiere von Haus zu Haus befördern; denn Masdar, was übersetzt »Quelle« heißt, wird für den Autoverkehr gesperrt sein. Solarkraftwerke im umgebenden Wüstensand, die sich bereits in einem frühen Baustadium befinden, liefern Strom für die Beleuchtung sowie die Klimaanlage und die Meerwasserentsalzung. Weitere Energie stammt aus Windparks und dem Anzapfen von Erdwärme tief im Untergrund. Die vom Büro Forster + Partner geplante Stadt soll ohne Kohlendioxidemissionen und Abfälle auskommen. Diesem Ziel dient unter anderem eine Anlage zur Herstellung von Wasserstoff und Treibstoff aus Jauche. Wohl am wichtigsten für die Wüstenstadt ist, dass alles Wasser recycelt wird; das Abwasser der Bewohner dient zum Anbau von Pflanzen in abgeschlossenen, autarken Landwirtschaftsbetrieben, die auch ihr eigenes Wasser wiederverwerten. »Wir müssen grundlegend überdenken, wie Städte Energie und andere Ressourcen sparen können«, sagte Sultan Al Jaber, oberster Repräsentant der Masdar-Initiative, im vergangenen Juni in seinem Grußwort an einen Ausschuss des US-Kongresses. »Nötig ist ein massiver Einsatz neuer Technologien und die Entwicklung innovativer Stadtmodelle.« ◀

MASDAR AUF EINEN BLICK

Lage: Abu Dhabi, Vereinigte Arabische Emirate

Größe: 74 Hektar

Zeitplan: Fertigstellung bis 2016

künftige Einwohnerzahl: 30 000 Bürger aus dem wohlhabenden Emirat

Kosten: höchstens 22 Milliarden US-Dollar (von der Regierung der Vereinigten Arabischen Emirate bewilligte Summe)

ökologische Highlights: Als eine der ersten bedeutenden Ökostädte verschreibt sich Masdar dem Ziel, keine Abfälle und Kohlendioxidemissionen zu produzieren und keine Energie aus fossilen Brennstoffen einzusetzen. Die Meerwasserentsalzung mittels großer Mengen an Strom aus Solar-, Wind- und geothermischen Kraftwerken bildet die Grundlage dieser Wüstenstadt. Eine kreative und dabei traditionell orientierte Architektur wird – etwa mit Windtürmen – für natürliche Kühlung sorgen.

Personen-Schnelltransporter auf (später im Untergrund verlegten) Schienen werden Automobile ersetzen.



Öl aus Algen

■ Die Zukunft von Biotreibstoffen liegt vielleicht in einem Wort: Algen. Das sieht auch die Industrie so. Zum Beispiel betreibt die Firma Solix Biofuels eine Pilotanlage auf dem Gelände der New Belgium Brewing Company in Fort Collins (Colorado). Dabei dient das beim Bierbrauen anfallende Kohlendioxid als Nahrung für Algen, die in großen Tanks gezüchtet werden. Auch die Firma Global Green Solutions mit Hauptsitz in Vancouver betreibt eine Testanlage in El Paso (Texas). Dort wachsen die Algen in hohen, schmalen, sonnedurchfluteten Bioreaktoren.

Lieber im Dunkeln operiert dagegen die Firma Solazyme in San Francisco. In riesigen, angemieteten Fermentern züchtet sie maßgeschneiderte Algenstämme unter Ausschluss von Sonnenlicht. Die Mikroben schwimmen in Zuckerwasser als Nahrungsquelle. Aus der süßen Lösung produzieren sie Öl, das sich in Dieselmotoren, Plastik oder andere Produkte umwandeln lässt. Die Algen stammen aus der ganzen Welt. »Einige Stämme kommen zum Beispiel aus einem Sumpf in Afrika, andere von einem Schneefeld in den hohen Anden«, erklärt Harrison Dillon, Mikrobiologe und Mitbegründer der Firma.

Das Unternehmen hat bereits tausende Gallonen Öl produziert, allerdings nicht »auf kommerzieller Basis«, wie Dillon es ausdrückt. Inzwischen haben das US-Militär und die American Society for Testing and Materials (ASTM International) den Algendiesel für eine breite Palette von Fahrzeugen zertifiziert. Noch in diesem Jahr will die Firma die erste kommerzielle Produktionsanlage in Betrieb nehmen.

Dillon ist überzeugt, dass sich durch verbesserte Herstellungsmethoden und die Hochskalierung in den großtechnischen Maßstab für den Dieseltreibstoff Preise von zwei Dollar pro Gallone erreichen lassen, was deutlich unter dem derzeitigen Marktniveau liegt. Auf dem Weg zur kommerziellen Herstellung diverser Öle aus Algen, die sich für die verschiedensten Zwecke vom Jettreibstoff bis zu Zutaten für Backwaren eignen, ist wohl keine andere Firma so weit wie Solazyme. »Mein Geburtstagskuchen war mit Öl aus Algen gemacht: ganz ohne Butter oder Eier«, berichtet Dillon. »Und er hat prima geschmeckt.«

David Biello



Chinas Streben nach sauberer Kohle

■ Kohlekraftwerke erzeugen mehr als 70 Prozent von Chinas Strom – und seinen berüchtigten Smog. Kürzlich hat das Reich der Mitte die USA als weltweit größten Kohlendioxidemittenten überholt. Nun beginnt seine Regierung jedoch vorsichtig umzusteuern. So hat sie ein Pilotkraftwerk namens GreenGen in Auftrag gegeben, welches das anfallende Kohlendioxid abfangen und dauerhaft im Boden speichern soll.

Im ersten Schritt ist geplant, dass ein Konsortium aus Unternehmen im Bereich Elektroindustrie und Kohlebergbau die Errichtung eines Kombikraftwerks mit integrierter Kohlevergasung finanziert. Darin wird aus der Kohle zunächst ein Gas erzeugt und dieses vor dem Verbrennen von Schadstoffen gereinigt. Das Kraftwerk soll in der Hafenstadt Tianjin stehen und anfangs eine Leistung von 250 Megawatt erbringen. Vorgesehen ist eine allmähliche Steigerung auf 650 Megawatt, was nach heutigen Standards einem mittelgroßen Kraftwerk entspricht. Anschließend würde damit begonnen, das gebildete Kohlendioxid abzutrennen und in nahe gelegene

erschöpfte Ölfelder unter der Erde zu pumpen. Geplante Fertigstellung: 2015.

Das rund eine Milliarde US-Dollar teure GreenGen-Kraftwerk wäre eines der weltweit größten seiner Art. Allerdings leidet China unter Kohleknappheit, und die Kohlevergasung sowie das unterirdische Deponieren des Kohlendioxids würde zusätzliche Energie kosten. Die Implementierung der abschließenden Trennstufe erscheint deshalb fraglich. »Es gibt gute Gründe, GreenGen für Forschungszwecke und zum Sammeln von Erfahrungen zu realisieren«, meint Energietechnikexperte Sims Gallagher von der John F. Kennedy School of Government der Harvard University in Cambridge (Massachusetts). »Unter kommerziellem Aspekt macht es dagegen keinen Sinn.« Damit das Kraftwerk sich selbst trägt, genügt es also nicht, wenn die chinesische Regierung lediglich den langfristigen Nutzen anerkennt, den das Abtrennen und Speichern von Kohlendioxid für das Klima hat; sie muss diesem Nutzen auch einen ökonomischen Wert zuschreiben.

David Biello

In Großvaters Fußstapfen

■ So wie sich ihr legendärer Großvater Jacques-Yves für die Welt des Meeres begeisterte, spürt man auch bei seiner Enkelin Alexandra die Leidenschaft für das nasse Element. Vor allem sorgt sie sich um die Zukunft der irdischen Wasserressourcen. »Wasser wird der kritische Rohstoff in diesem Jahrhundert sein«, beteuert sie. »Die weitere Menschheitsgeschichte hängt davon ab, wie wir damit umgehen.«

Seit ihrer Rückkehr aus Costa Rica, wo sie sich bis letzten September für die Einrichtung von Meeresschutzzonen einsetzte, hat es sich Frau Cousteau zu ihrer persönlichen und beruflichen Aufgabe gemacht, für den Schutz und die Erneuerung der irdischen Wassersysteme einzutreten. Im März 2010 soll ein Buch von ihr bei Penguin erscheinen, in dem sie über die Erfahrungen berichtet, die Gemeinden mit dem Verlust oder Schutz ihrer Wassereinzugsgebiete gemacht haben.

Die Umweltschützerin reist ausgiebig durch die Welt – von Indien über Kambodscha bis Grönland –, um aus erster Hand

zu erfahren, wie Wasser das Leben der Menschen beeinflusst. Ihre Reisen dokumentiert sie in Weblogs und Multimedia-Webkampagnen, und sie produziert dabei Dokumentarfilme für Festivals. Unter www.alexandracousteau.com offeriert sie im Internet außerdem Ratschläge für den schonenden Umgang mit Wasser und für Umweltschutz allgemein.

Mit ihren 32 Jahren ist Alexandra Cousteau kein Neuling unter den Umweltaktivisten. Im Jahr 2000 gründete sie zusammen mit ihrem Bruder Philippe EarthEcho International, eine gemeinnützige Organisation, die mit einer breiten Palette von medialen Techniken Menschen an Umweltfragen heranführt. 2007 erhielt sie von den Vereinten Nationen für ihren Einsatz zum Schutz der Ozeane den Ehrentitel Earth Trustee (Treuhand der Erde), und letztes Jahr zählte die Zeitschrift »National Geographic« sie zu den Emerging Explorers (Forschungsreisenden der nächsten Generation).

Keren Blankfeld Schultz





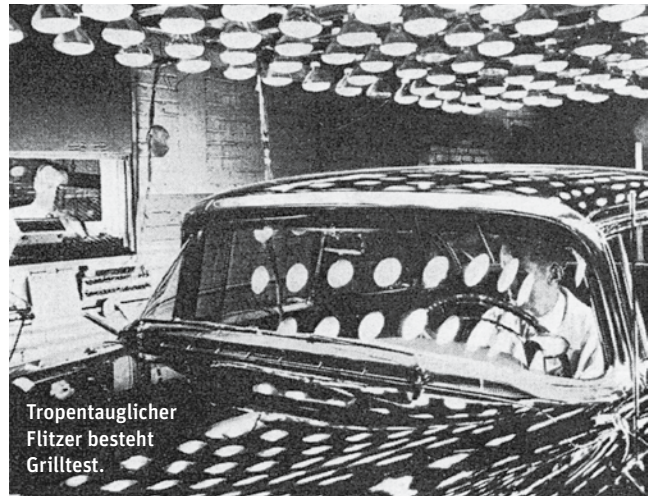
Neues aus dem Weltenraum

»In dem ... noch kreisenden russischen Satelliten, Sputnik III, ist ein komplettes kleines Laboratorium vereint, das die Zusammensetzung der Atmosphäre, das magnetische Erdfeld, die kosmische Ultrastrahlung und so weiter messen soll. ... Der markanteste Einfluß der Erdatmosphäre

auf einen ... kreisenden Satelliten ist die fortlaufende zunehmende Abbremsung, die einen Höhenverlust bewirkt und damit die Lebenszeit des Satelliten begrenzt. ... Besonders auffällig ist, daß die Abbremsung der Satelliten, das heißt die Abnahme der Umlaufzeit, nicht einen ganz stetigen Gang aufweist, sondern markante Unregelmäßigkeiten. Sie müssen unter anderem auf Dichteschwankungen zurückgeführt werden, die in 1000 Kilometer Höhe den Faktor 10 betragen mögen.«
Umschau, Heft 1, 59. Jg., Januar 1959, S. 3 und S. 5

Millionenstädte der Erde

»Die größte Zahl von Millionenstädten finden wir in Asien, nämlich 33 mit mehr als 70,5 Millionen Einwohnern. Europa steht mit 26 (56,9 Mill. E.) an zweiter, Nordamerika mit 16 (50,6 Mill. E.) an dritter Stelle. Südamerika hat nur 5 Millionenstädte (mit 12,7 Mill. E.), Australien-Ozeanien 2 (3,5 Mill. E.) und Afrika ebenfalls nur 2 (3,3 Mill. E.). In Australien-Ozeanien leben 23,5 % der Bevölkerung in den ... Millionenstädten, ... in Europa dagegen nur 10 %.«
Kosmos, Heft 1, 55. Jg., Januar 1959, S. 6



Tropentauglicher Flitzer besteht Grilltest.

Autos im Infrarot-Grill

»Zur Prüfung von Klima-Anlagen für Automobile genügt es nicht, den Wagen einfach in eine Kabine mit hoher Raumtemperatur zu stellen. Mit dieser Methode wird nämlich die Strahlungswärme der Sonne nicht erfaßt. Deshalb baute man in USA in der Frigidaire-Abteilung von General Motors eine neuartige

Testzelle. Hier wirkt die Wärme wie in freier Atmosphäre durch intensive Bestrahlung auf das Fahrzeug ein. Unser Bild zeigt eine solche Spezialkabine mit über hundert Infrarot-Lampen, deren Intensität so groß ist, daß man sogar tropische Hitzeverhältnisse erzeugen kann!«
Umschau, Heft 2, 59. Jg., Januar 1959, S. 58

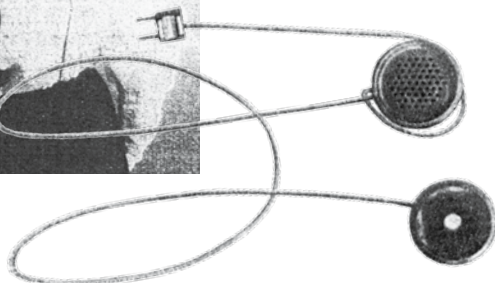
Hör-Apparat mit Batterie

»Der zu vielem berufenen Elektrizität scheint tatsächlich der Fortschritt vorbehalten zu sein, auch die Schwerhörigkeit zu beheben. Der Apparat besteht aus einem sehr empfindlichen Mikrophon von Handtellergröße, das der Gebraucher ... an sich befestigt, in einem ebenso grossen Telephon, das durch Doppeldraht

in üblicher Weise mit dem Mikrophon verbunden ist und ... ans Ohr gehalten oder durch einen Bügel in eine feste Lage zum Ohr gebracht wird und endlich in einer kleinen Trockenbatterie, welche in die Leitung Mikrophon-Telephon in Gestalt einer Zweigleitung eingeschaltet ist und die man bequem in der Tasche trägt. ... Die Erfindung wurde von einigen Berliner Spezialärzten und Elektrotechnikern gemeinsam gemacht.
Central-Zeitung für Optik und Mechanik, Nr. 1, 30. Jg., 1. Januar 1909, S. 4



Hör-Apparat »Akustik« ist kein Winzling.



Der Halleysche Komet wird erwartet

»Natürlich kann man nicht mit absoluter Gewißheit die Wiederkehr des Halleyschen Kometen ankündigen, an dessen vorige Erscheinung im Jahre 1835/36 sich nur noch ganz wenige jetzt lebende Menschen erinnern können. Indessen grenzt die Wahrscheinlichkeit der Wiederauffindung doch sehr nahe an völlige Gewißheit, einmal weil die von den englischen Astronomen Cowell und Crommelin ausgeführte Vorausberechnung (für 1910) die Gewähr der Richtig-



keit innerhalb engster Schranken zu bieten scheint, und dann weil das physische Verhalten des Kometen in der Vergangenheit in keiner Weise auf eine »Degeneration« schließen läßt. So erwarten die Astronomen die Wiederkehr dieses Himmelskörpers mit großer Spannung.«
Naturwissenschaftliche Rundschau, Nr. 1, 24. Jg., 7. Januar 1909, S. 1

Rindertuberkulose übertragbar?

»In der Nachmittagssitzung des Tuberkulosekongresses in Washington wiederholte Geheimrat Koch die auf dem Londoner Kongress geäußerte Ansicht, dass die Rindertuberkulose auf den Menschen unübertragbar sei; die Untersuchungen hätten bis zur Gegenwart diese Ansicht bekräftigt.« (Hier irrte Koch, Anm. der Redaktion).
Gesundheit, Nr. 1, 34. Jg., 1. Januar 1909, S. 30

Wie entlarvt man

gefälschte

DIGITALFOTOS?

Es war nie so einfach wie heute, Fotos zu fälschen, und nie so schwer, die Fälschungen aufzudecken. Moderne Computerprogramme machen es Betrügern leicht – aber sie eröffnen auch neue Möglichkeiten, manipulierte Bilder als solche zu erkennen.

In Kürze

- ▶ Regelmäßig gelangen **gefälschte Fotos** in Umlauf, die mit leistungsfähigen, kommerziellen Computerprogrammen erstellt wurden. Die Forensik von Digitalbildern – ein neues Arbeitsgebiet – verfolgt das Ziel, solche Betrügereien zu entlarven.
- ▶ Viele Fälschungen verraten sich durch inkonsistente Beleuchtung, so dass zum Beispiel die **Lichtreflexe in den Augen** der abgebildeten Personen nicht übereinstimmen.
- ▶ Spezielle Algorithmen können außerdem feststellen, ob ein Bild »geklont« Bereiche enthält oder nicht die mathematischen Eigenschaften einer Rohaufnahme besitzt.

Von Hany Farid

Das Fälschen von Fotos hat eine lange Tradition. Stalin, Mao, Hitler, Mussolini, Castro und Brezhnev: Sie alle ließen ihre Konteifeis manipulieren – um heroischer zu wirken, unliebsame Personen aus dem Bild zu entfernen oder schlicht ein paar Flaschen Bier verschwinden zu lassen. Zu Stalins Zeiten erforderten solche Trickereien noch viele Stunden mühseliger Arbeit in einer Dunkelkammer. Heute dagegen kann jeder am Computer ohne Probleme Bildfälschungen produzieren, die täuschend echt wirken.

Kaum ein Monat vergeht, ohne dass es eine getürkte Aufnahme unerkannt bis in die Nachrichten schafft. Im Februar 2008 zum Beispiel wurde ein preisgekröntes Foto als Fälschung entlarvt, das eine Herde vom Aussterben bedrohter Tschirus (Tibetantilopen) zeigte, die sich augenscheinlich nicht von

einem vorbeirasenden Hochgeschwindigkeitszug stören ließen. Die Aufnahme war in hunderten chinesischen Zeitungen erschienen, nachdem die umstrittene Zugstrecke Mitte 2006 mit großem patriotischem Tamtam eröffnet worden war.

Aufmerksame Betrachter hatten allerdings damals schon merkwürdige Details in der Aufnahme entdeckt. So waren schwangere Antilopen zu sehen, aber keine Jungtiere, was sehr ungewöhnlich für die Jahreszeit ist, in der die Eröffnung der Bahnstrecke stattfand. Die Fälschung flog auf, als das Foto Anfang dieses Jahres als Plakat in der Pekingener U-Bahn ausgestellt wurde. Das Großformat brachte weitere auffällige Bildfehler ans Licht – insbesondere eine feine Linie, wo zwei verschiedene Bilder aneinandergesetzt worden waren.

Der Fotograf, Liu Weiqing, gab den Betrug schließlich zu, und der Chefredakteur der »Daqing Evening News«, für den er arbeitete, trat zurück. Die amtlichen chinesischen Pres-

TOUR DE FRANCE: AP PHOTO; CHRISTOPHE D'AMMI; FRANZKOPF-CORBIS/REDLINK; LIU YANG; HYDRANT: CORBIS/SHEPHER IMAGES



seagenturen entschuldigten sich dafür, das Foto in Umlauf gebracht zu haben, und kündigten an, sämtliche Aufnahmen von Liu Wei-qing aus ihren Datenbanken zu löschen.

In diesem Fall – wie bei vielen anderen aufgedeckten Bildfälschungen – waren es wachsame Zeitgenossen, die den Schwindel entlarvten, indem sie beim genauen Hinsehen Fehler bemerkten. Häufig jedoch lassen sich Bildmanipulationen nicht mit bloßem Auge erkennen, sondern nur mit computergestützten Methoden. Inzwischen hat sich so eine eigene Forensik für Digitalbilder entwickelt.

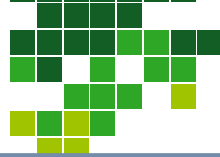
Ich werde oft darum gebeten, Fotos für Bildagenturen, Strafverfolgungsbehörden, Gerichte oder Privatpersonen zu authentifizieren. Jede zu analysierende Aufnahme fordert mich auf einzigartige Weise heraus und bedarf eines spezifischen Vorgehens. So benutzte ich eine Methode zum Erkennen widersprüchlicher Beleuchtungseffekte, als ich eine mutmaßliche Montage zweier unterschiedlicher Personen-

aufnahmen untersuchte. Im Foto eines verdächtig großen Fisches, das jemand bei einem Online-Angelwettbewerb eingereicht hatte, spähte ich nach Pixel-Artefakten, die bei der digitalen Vergrößerung entstehen. In einem weiteren Fall verrieten Inkonsistenzen in einem Bild, die mit seiner Kompression im Standardformat JPEG zu tun hatten, die Manipulation eines Screenshots, der als Beweismittel in einem Streit über Software-Urheberrechte diente.

Wie diese Beispiele zeigen, erfordert die forensische Analyse von Digitalfotos wegen der Vielzahl von Bildtypen und Fälschungsarten eine breite Palette an Untersuchungsverfahren. In den letzten fünf Jahren haben meine Studenten, Kollegen und ich gemeinsam mit einer wachsenden Schar anderer Forscher das Methodenarsenal erheblich erweitert.

Dabei ist der Ansatz immer der gleiche. Zunächst erfassen wir, welche statistischen oder geometrischen Eigenschaften eines Bilds

Diese Aufnahme, in der Jan Ullrich scheinbar händchenhaltend mit einer weiblichen Kollegin die Tour de France absolviert, wurde an mehreren Stellen manipuliert. Mit den digitalen Analysemethoden, die auf den folgenden Seiten beschrieben sind, lässt sich der Schwindel aufdecken. Die Auflösung finden Sie auf S. 96.



IN EINEM ANDEREN LICHT

Montagen aus Teilen mehrerer Fotos weisen in der Regel Unterschiede in den Lichtverhältnissen auf, unter denen die Personen oder Objekte aufgenommen wurden. Solche Unstimmigkeiten sind mit bloßem Auge oft nicht zu erkennen.

AUFSTAND: HUGHES LÉGLISE-BATAILLE; ENTEN: INTHE SUNSTUDIO, CHARRO BADGER

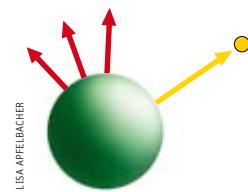


In diesem Bild stimmt die Lichtquelle für die Polizisten nicht mit der für die Enten überein (Pfeile). Weitere Analysen zeigen, dass das Federvieh nachträglich eingefügt wurde.

Bei Bildern wie dem links gezeigten lässt sich für jeden dargestellten Menschen oder Gegenstand ermitteln, aus welcher Richtung er während der Aufnahme beleuchtet wurde (Pfeile). Wie viel Licht auf eine Oberfläche fällt, hängt nämlich von deren Orientierung zur Lichtquelle ab. Das ist unten am Beispiel einer Kugel gezeigt. Die der Lichtquelle zugewandte Seite erscheint am hellsten.

Um die Beleuchtungsrichtung herzuleiten, muss man allerdings die Orientierung der betrachteten Oberfläche kennen. Die ist bei Gegenständen, die zweidimensional auf Fotos abgebildet sind, meist schwierig zu ermitteln. Es gibt jedoch eine Ausnahme: Entlang den Umrissen eines Objekts steht dessen Oberfläche stets senkrecht auf der Bildebene (rote Pfeile). Der von meiner Gruppe entwickelte Algorithmus misst die Helligkeit und die Orientierung

entlang mehreren Punkten, die auf einem solchen Umriss liegen, und liefert so einen Anhaltspunkt für die Richtung der Lichtquelle.

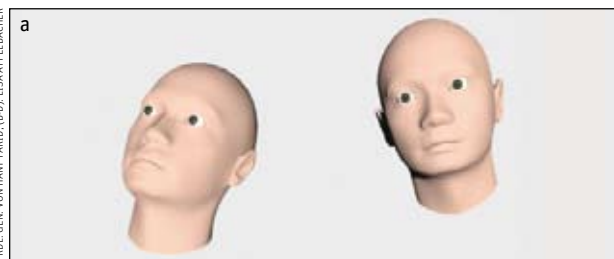


Augen und Position im Bild

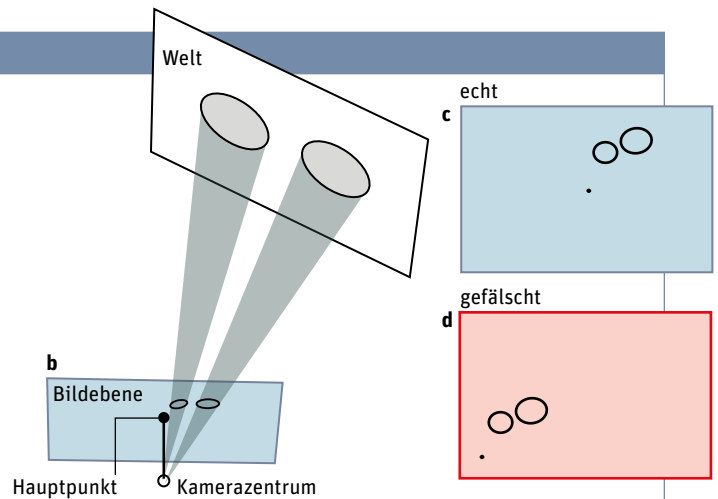
Weil die Augäpfel bei allen Menschen praktisch gleich aussehen, bieten sie oft eine gute Handhabe, um Manipulationen in Bildern aufzudecken.

Die Iris ist kreisrund, aber sie erscheint umso elliptischer, je mehr der Kopf gedreht oder geneigt ist (a). Man kann näherungsweise ermitteln, wie Augen auf einer Fotografie erscheinen sollten, indem man die Lichtstrahlen verfolgt, die von ihnen zum so genannten Kamerazentrum laufen (b). Die Abbildung entsteht dort, wo diese Strahlen die Bildebene durchstoßen (blau). Der Hauptpunkt der Kamera – der Schnittpunkt ihrer »Blickrichtung« mit der Bildebene – liegt stets nahe der Bildmitte.

Meine Mitarbeiter und ich benutzen die Form der beiden Iriden einer abgebildeten Person, um zu berechnen, wie ihre Augen



(A) MIT FRIDL GEN. VON HANY FARID; (B-D) LISAPFELBÄCHER



gen relativ zur Kamera orientiert sind – und wo folglich deren Hauptpunkt liegt (c). Ist dieser weit von der Bildmitte entfernt oder stimmen die Hauptpunkte für verschiedene abgebildete Personen nicht überein, deutet das auf eine Fälschung hin (d). Der Algorithmus funktioniert auch mit anderen Objekten, die eine stets gleiche, bekannte Form haben, also zum Beispiel Autoräder.

Die Methode hat jedoch ihre Grenzen; denn sie beruht darauf, dass die minimalen Unterschiede in der Form der beiden Iriden einer Person exakt vermessen werden. Wie meine Mitarbeiter und ich herausgefunden haben, funktioniert das Verfahren nur bei großen Versetzungen von Objekten innerhalb des Bilds – also etwa, wenn eine Person vom Rand in die Mitte gerückt wurde. Eine leichte Positionsänderung lässt sich dagegen kaum nachweisen.

durch eine bestimmte Art von Fälschung gestört werden. Dann entwickeln wir einen mathematischen Algorithmus zum Aufspüren dieser Unregelmäßigkeiten. In den Kästen auf den folgenden Seiten sind fünf solche Analyseverfahren beschrieben.

Die Echtheit eines Bilds kann darüber entscheiden, ob jemand ins Gefängnis kommt oder ob eine behauptete wissenschaftliche Entdeckung eine arglistige Täuschung statt eines grandiosen Durchbruchs ist. 1950 hat eine gefälschte Aufnahme sogar eine Wahl beeinflusst. Damals verlor Senator Millard E. Tydings seinen Sitz im Kapitol, weil ihn ein frisiertes Foto im Gespräch mit Earl Browder zeigte, dem Vorsitzenden der American Communist Party.

In jüngster Zeit ist in politischen Pamphleten eine alarmierende Zahl gefälschter Fotos aufgetaucht. So erschien Anfang 2004 im Internet ein getürkter Zeitungsausschnitt mit einer manipulierten Abbildung, die den Präsidentschaftsbewerber der Demokraten, John Kerry, während der Proteste gegen den Vietnamkrieg 1970 auf einer Bühne mit Jane Fonda zeigte. Mehr denn je stellt sich also das Problem, wann man seinen Augen trauen darf.

Fälschungen, wohin man blickt

Liu Weiqing war keineswegs der erste Foto-reporter, der wegen digitaler Trickereien auf-flog. Der libanesische Freiberufler Adnan Hajj schoss mehr als zehn Jahre lang bemerkens-werte Aufnahmen vom Nahostkonflikt für Reu-ters. Doch im August 2006 veröffentlichte die Nachrichtenagentur ein Foto von ihm, das er-kenubar manipuliert war. Es zeigte Beirut nach der Bombardierung durch die Israelis; einige der gewaltigen Rauchwolken tauch-ten allerdings mehrfach in Kopie auf.

Brian Walski wurde 2003 von der »Los An-geles Times« gefeuert, nachdem herausgekome-nen war, dass er ein Titelfoto über den Irak-rieg aus Elementen zweier Aufnahmen zusammengesetzt hatte, um einen drama-tischeren Eindruck zu erzielen. Als ein Mitar-beiter einer anderen Zeitung auf dem Bild nach irakischen Freunden suchte, bemerkte er doppelt vorkommende Personen. Frisierte Aufnahmen in »Time« (ein manipuliertes Fahndungsfoto von O.J. Simpson im Jahr 1994) und »Newsweek« (Martha Stewarts Kopf auf dem Körper einer schlankeren Frau im Jahr 2005) sorgten ebenfalls für Kritik und Karriereknicks.

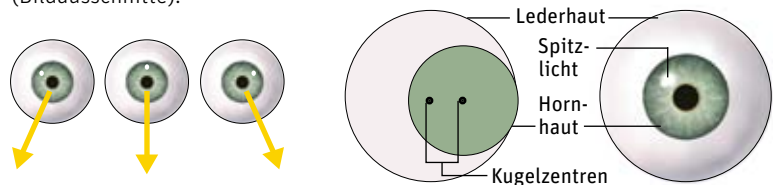
Auch die Wissenschaft blieb von Skandalen um gefälschte Bilder nicht verschont. Be-rühmt-berüchtigt ist ein Artikel im Fachblatt »Science« von 2005. Der koreanische Stamm-zellforscher Woo Suk Hwang und Kollegen berichteten darin über elf Stammzelllinien, die

VERRÄTERISCHES FUNKELN

Wenn Augen umgebende Lichter reflektieren, entstehen auf ihnen kleine weiße Punkte – so genannte Spitzlichter. Die Form, Farbe und Position dieser Spiegelungen verrät einiges über die Beleuchtung.

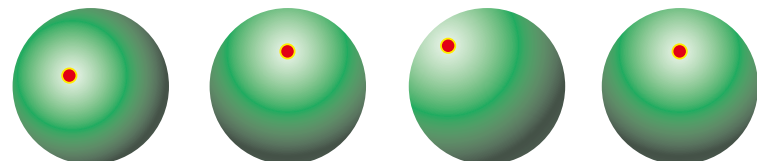


Ein Fotoredakteur bat mich 2006, die Echtheit eines Fotos von Stars der Fernseh-sendung »American Idols« zu prüfen. Es erwies sich als gefälscht; denn die Spitzlichter in den Augen der Personen unterschieden sich stark voneinander (Bildausschnitte).

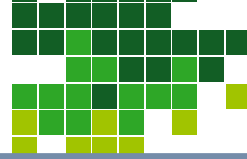


Die Position eines Spitzlichts zeigt an, wo sich die Lichtquelle befindet (oben links). Wandert diese von links nach rechts (gelber Pfeil), gilt das auch für die Spitzlichter.

In der Aufnahme mit den American-Idol-Stars differieren die Spitzlichter so stark, dass man schon mit bloßem Auge erkennt: Hier stimmt etwas nicht. In vielen anderen Fällen ist jedoch eine mathematische Analyse erforderlich. Um die Position der Lichtquelle präzise zu ermitteln, muss man die Form des Auges und seine Orientierung relativ zu Kamera und Lichtquelle kennen. Die Orientierung spielt eine Rolle, weil die Augen keine perfekten Kugeln sind: Die Hornhaut steht hervor. Diese wird in unserer Software als Kugel behandelt, deren Mittelpunkt gegen das Zentrum des von der weißen Lederhaut umgebenen Aug-apfels versetzt ist (oben rechts).

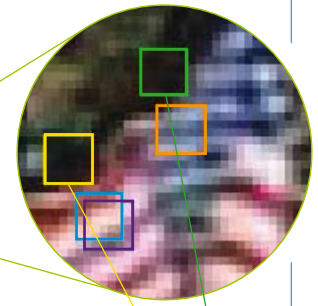


Der Algorithmus meiner Gruppe berechnet aus der Form der Iriden einer ab-gebildeten Person die Ausrichtung ihrer Augen. Mit dieser Information und der Position der Spitzlichter lässt sich ermitteln, woher die Beleuchtung während der Aufnahme kam. Das Abbild der American-Idol-Stars (oben; die Richtung der Lichtquelle ist durch rote Punkte auf grünen Kugeln dargestellt) wurde dem-nach aus mindestens drei verschiedenen Fotos zusammengesetzt.



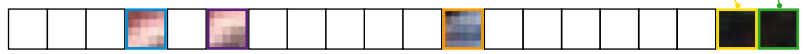
DÉJÀ VUE

Das Vervielfältigen eines Bildbereichs, so dass dieser mehrfach auftaucht, ist eine sehr beliebte Form der Manipulation.



Dieses Foto stammt aus einem Fernsehspot für die Kampagne zur Wiederwahl von George W. Bush im Jahr 2004 und enthält einen mehrfach geklonten Bereich. Solche Wiederholungen zu finden ist nicht einfach. Weil die kopierten Areale jede beliebige Form haben und sich überall befinden können, würde eine Pixel-für-Pixel-Suche den Computer überfordern. Die Zahl der dazu nötigen Vergleiche wäre astronomisch hoch. Außerdem gibt es unzählige winzige Bildregionen, die zufällig identisch sind (»Falsch-Positive«).

Meine Forschungsgruppe arbeitet deshalb mit kleinen Pixelblöcken – typischerweise Quadraten mit einer Seitenlänge von sechs Pixeln. Für jeden solchen Block wird eine Größe be-



rechnet, die sich aus den Farben seiner 36 Bildpunkte ableitet. Diese Größe dient dazu, alle Quadrate so in einer Reihe anzuordnen, dass identische oder sehr ähnliche nebeneinanderstehen. Dann greift das Programm übereinstimmende Blöcke heraus und versucht sie zu größeren identischen Regionen zu erweitern. Durch das Arbeiten mit Gruppen von Pixeln müssen sehr viel weniger Falsch-Positive begutachtet und aussortiert werden.

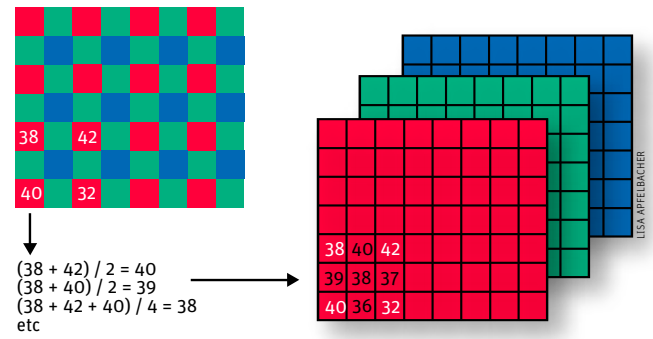
Bei dem Foto aus dem Fernsehspot deckte das Programm drei identische Regionen auf (rot, blau und grün).

FINGERABDRÜCKE DER KAMERA

Digitales Retuschieren hinterlässt selten sichtbare Spuren. Weil es viele Gestalten annehmen kann, wollte ich einen Algorithmus entwickeln, der jede Modifikation eines Bilds erkennt. Die Methode, die sich meine Gruppe einfallen ließ, beruht auf einem Merkmal, das für die Funktionsweise fast aller Digitalkameras charakteristisch ist.

Die digitalen Sensoren einer Kamera sind als rechteckiges Pixelraster ausgelegt. Jedes Pixel hat einen vorgeschalteten Filter und registriert die einfallende Lichtintensität deshalb nur in einem Wellenlängenbereich, der den Farben Rot, Grün oder Blau entspricht. Die Anordnung dieser Filter entspricht meist der rechts gezeigten »Bayer-Maske«.

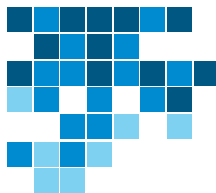
Jedes Pixel in den Rohdaten hat somit nur einen Farbkanal von den dreien, die zur Beschreibung eines Bildpunkts in der digitalen Aufnahme erforderlich sind. Die fehlenden Daten werden



durch Interpolieren von benachbarten Pixeln ergänzt – entweder von einem Prozessor in der Kamera selbst oder von einer Software, welche die Rohdaten nachträglich auswertet. Dieses Verfahren bezeichnet man als Demosaicing (Entmosaikern). Im einfachsten Fall wird schlicht der Mittelwert der benachbarten Pixel gebildet. Zwar kommen auch raffiniertere Algorithmen zum Einsatz, die bessere Ergebnisse liefern. Doch welche Methode auch

sie angeblich erzeugt hatten. Doch neun davon waren, wie eine unabhängige Ermittlung knapp ein Jahr später ergab, mittels verfälschter Aufnahmen der beiden echten Zelllinien vorgetäuscht. Mark Rossner erinnert sich, dass während seiner Zeit als leitender Redakteur beim Fachblatt »Journal of Cell Biology« etwa jedes fünfte zur Veröffentlichung angenommene Manuskript mindestens eine Abbildung enthielt, die wegen unzulässiger Manipulationen beanstandet wurde.

Über die Echtheit von Bildern können schwere juristische Auseinandersetzungen entbrennen. Ein Beispiel betrifft die Kinderpornografie. 2002 entschied der Oberste Gerichtshof der USA, dass computergenerierte Bilder, die fiktive Minderjährige zeigen, nicht strafbar sind. Damit hob er Teile eines Gesetzes auf, das 1996 in Kraft getreten war und solche Darstellungen mit Kinderpornografie gleichgesetzt hatte. Bei einem Prozess in Wapakoneta (Ohio) im Jahr 2006 argumentierte die Verteidigung daraufhin, dass der Angeklagte freizusprechen sei und die beschlagnahmten Fotos auf seinem Computer behalten dürfe, wenn der Staat ihre Echtheit nicht beweisen könne. Ich trat bei dem Verfahren als Sachverständiger auf und informierte die Geschworenen über Leistungsfähigkeit und Grenzen heutiger Bildbearbeitungstechniken.



immer verwendet wird – die Pixel der endgültigen Aufnahme stehen durch sie in Beziehung mit ihren jeweiligen Nachbarn.

Der von uns entwickelte Algorithmus durchsucht digitale Fotos nach diesen periodischen Korrelationen. Wenn sie in einem kleinen Bildbereich fehlen, wurden dort höchstwahrscheinlich punktuelle Veränderungen vorgenommen. Bei flächendeckender Manipulation eines Fotos – zum Beispiel durch Änderung der Größe eines Motivs oder starke JPEG-Kompression – können die Korrelationen komplett verloren gehen. Auf diese Weise lassen sich Eingriffe wie der an einer Aufnahme von Reuters aus dem Jahr 2005 erkennen. In dem Foto, das von einem Treffen des Sicherheitsrats der Vereinten Nationen stammt, wurde der Kontrast des Zettels erhöht, um die Lesbarkeit der Schrift zu verbessern (links).

Ein Nachteil unseres Algorithmus ist, dass er nur bei vorgeblich originalen Digitalfotos funktioniert. Der Scan eines Ausdrucks etwa weist neue Korrelationen auf, die vom Scanner stammen.

Über die Echtheit von Fotos können schwere juristische Auseinandersetzungen entbrennen

Literaturhinweise

Johnson, M. K.: Lighting and Optical Tools for Image Forensics. Dissertation, Dartmouth College, 2007.

Popescu, A. C., Farid, H.: Exposing Digital Forgeries in Color Filter Array Interpolated Images. In: IEEE Transactions on Signal Processing 53, S. 3948–3959, 2005.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/975626.

epoc
GESCHICHTE
ARCHÄOLOGIE
KULTUR



epoc ist das moderne Wissensmagazin für alle, die an historischen Themen interessiert sind. Dabei geht **epoc** in die Tiefe und stellt Zusammenhänge her. **epoc** ist überraschend, unterhaltsam und so vielfältig wie die Geschichte selbst.

www.epoc.de

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

Spektrum
DER WISSENSCHAFT



AP PHOTO, CHRISTOPHE ENA

Auflösung von S. 91. Im gefälschten Bild (links oben) zeigen inkonsistente Spitzlichter (links unten), dass die beiden Radfahrer nicht gemeinsam fotografiert wurden. Auch wird das Gesicht der Frau aus einer anderen Richtung beleuchtet als ihr Körper und derjenige von Jan Ullrich (Pfeile). Der zugefügte Hydrant erhält sein Licht aus noch einer anderen Quelle. Geklonte Bildregionen mit Sträuchern, Gras und Bordsteinrand bedecken wegretuschierte Radfahrer im Hintergrund ①. Falsche Pixelkorrelationen verraten Bildbereiche, in denen Logos entfernt wurden ②, und zeigen, dass der Helm des Mädchens gefälscht ist ③. Es handelt sich um eine umgefärbte Kopie der Kopfbedeckung von Jan Ullrich. Der fährt im Originalbild (oben) neben Lance Armstrong.

Zugleich präsentierte ich eine Analyse der umstrittenen Fotos mit Methoden, die es erlauben, computergenerierte von echten Darstellungen zu unterscheiden. Damit war die Strategie der Verteidigung gescheitert.

Dennoch haben Gerichte auf verschiedenen Instanzen festgestellt, dass es den Geschworenen angesichts der technischen Möglichkeiten der Bildbearbeitung nicht zugemutet werden könne, über die Echtheit von Aufnahmen zu befinden. Mindestens ein Richter bezweifelte sogar, dass Experten dazu fähig seien. Welche juristische Beweiskraft bleibt digitalen Fotografien dann überhaupt noch?

Wettrüsten mit den Fälschern

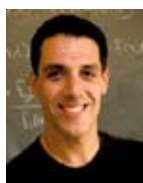
Die hier vorgestellten Methoden zum Erkennen von Bildfälschungen können das Vertrauen in Fotos bis zu einem gewissen Grad wiederherstellen. Natürlich werden die Betrüger versuchen, unsere Algorithmen auszutricksen. Dabei helfen ihnen immer raffiniertere Computerprogramme zur Bildbearbeitung, die eigentlich für legale Zwecke entwickelt wurden.

Einige der hier vorgestellten forensischen Werkzeuge dürften in der Tat nicht schwer zu überlisten sein; so sollte es kein allzu großes Problem darstellen, eine Software zu programmieren, welche die zu erwartenden Pixelkorrelationen in einem Rohbild wiederherstellt. Andere Algorithmen jedoch sind für gewöhn-

liche Computerbenutzer gar nicht und selbst für Experten kaum auszuhebeln. Die in den ersten drei Kästen vorgestellten Methoden beruhen auf der Auswertung ebenso komplexer wie subtiler Beleuchtungs- und Geometrieverhältnisse in der Aufnahme, die sich mit einer Standard-Bildbearbeitungssoftware so gut wie nicht korrigieren lassen.

Genau wie beim Spam/Antispam- oder Computervirus/Virensch scanner-Kampf – ganz zu schweigen von der Kriminalität im Allgemeinen – kommt es zwangsläufig zu einem Wettrennen zwischen Übeltätern und ihren Verfolgern. Die forensische Analyse der Digitalfotos wird es jedoch immer schwerer und zeitraubender machen (wenn auch niemals unmöglich), eine Fälschung zu erstellen, die nicht entdeckt werden kann.

Obwohl es sich um ein noch relativ junges Arbeitsgebiet handelt, nehmen wissenschaftliche Verlage, Nachrichtenagenturen und Gerichte zunehmend ihre Dienste in Anspruch. In fünf bis zehn Jahren werden, so meine Erwartung, Bildanalysen genauso routinemäßig eingesetzt wie heutige gerichtsmedizinische Untersuchungen. Ich hoffe, dass uns diese neue Methodik in Verbindung mit vernünftigen politischen und gesetzlichen Maßnahmen dabei hilft, die Herausforderungen des aufregenden, aber manchmal auch verwirrenden digitalen Zeitalters zu bewältigen. <



Hany Farid berät Justizbehörden und private Kunden bei der Entlarvung manipulierter Bilder. Er ist Professor für Computerwissenschaft und stellvertretender Leiter der entsprechenden Abteilung am Dartmouth College in Hanover (New Hampshire). Zu den Studenten und Kollegen, die ihn bei der Entwicklung digitaler forensischer Methoden unterstützt haben, gehören insbesondere Micah K. Johnson, Eric Kee, Siwei Lyu, Alin C. Popescu, Weihong Wang und Jeffrey Woodward.

»Spielen liegt in der Natur des Menschen«

Das Unternehmen xaitment bringt künstliche Intelligenz in virtuelle Spielwelten – und ganz reale Stadtplanungen. Ein Gespräch mit dem Geschäftsführer der Hochschulausgründung Andreas Gerber



Spektrum der Wissenschaft: Computerspiele und Informatik – sind das nicht zwei Welten?

Andreas Gerber: Wenn dem so ist, dann wohnten schon immer zwei Seelen in meiner Brust. Schon als Jugendlicher begeisterten mich Computerspiele, anders als viele Altersgenossen begann ich aber, auch selbst einige zu programmieren. Da war es nur logisch, nach dem Abitur ein Informatikstudium zu beginnen.

Spektrum: Woher rührt diese große Begeisterung?

Gerber: Ich denke, Spielen liegt einfach in der Natur des Menschen. Nur die Zeiten haben sich geändert. Früher versammelte sich die ganze Familie um den Stubentisch, heute trifft man sich mehr und mehr im Internet. Das ist jedoch letztlich nur eine andere Art von Interaktion und Kommunikation.

Spektrum: Sie haben sich in Diplom- und Doktorarbeit aber mit anderen Themen befasst.

Gerber: Wie kann ein Spediteur die Lkw-Touren seiner Fahrzeugflotte so einsetzen, dass sie, auch unter Berücksichtigung dynamischer Störungen wie Staus und trotz harter Randbedingungen wie Just-in-Time-Lieferung, bestmöglich ausgelastet ist?

Spektrum: Und wie geht das?

Gerber: Mit Multiagentensystemen. Statt ein großes Problem mit einem hochkomplexen Algorithmus anzugehen, zerteilt man es in viele kleine und einfachere zu lösende Aufgaben. Wenn zum Beispiel jeder Lkw durch ein Softwaremodul repräsentiert wird, das für ihn ganz allein die optimale Route berechnet, muss man einfach nur noch dafür sorgen, dass diese vielen Programmeinheiten miteinander kommunizieren und sich optimal aufeinander abstimmen.

Spektrum: Wie kamen Sie auf die Idee, diesen Ansatz auf den Gamer-Bereich zu übertragen?

Gerber: Ich traf 2002 einen Schulfreund, der in Saarbrücken eine Firma für Computerspiele gegründet hatte. Er entwickelte Strategiespiele, ich Logistikstrategien. Schnell wurde mir klar, dass es sich dabei um ganz ähnliche Herausforderungen handelt. Sollen beispielsweise unterschiedlich schnelle Raumfahrzeuge in eine ferne Galaxie geschickt werden, um dort die Menschheit zu verteidigen, dann wäre es ein fataler Fehler, wenn diese ihre vorprogrammierte Geschwindigkeit stur beibehielten und zu unterschiedlichen Zeiten am Kampfplatz ankämen. Genau das aber war damals in Computerspielen der Fall. Hinsichtlich

der Komplexität der Aufgaben und der realistischen Grafik hatten sie enorme Fortschritte gemacht. Aber den Spielfiguren – in diesem Beispiel etwa den Kapitänen der Raumflotte – mangelte es immer noch an Intelligenz. Sie wussten nichts voneinander und konnten sich nicht miteinander koordinieren.

Spektrum: Anders als Ihre Lkw-Flotte, die Sie mit Multiagenten schlaue gemacht haben?

Gerber: Genau. Hier setzten wir mit unserer Unternehmensgründung xaitment an: Unsere Vision waren Computerspiele mit einer so perfekten künstlichen Intelligenz, dass ein Spieler nicht mehr erkennen kann, ob er gegen Menschen oder einen Rechner spielt. Auf Dauer bleibt ein Spiel nur interessant, wenn die computergesteuerten Akteure, die so genannten Bots, lernen, ihre Verhaltensweisen den Situationen anzupassen und mit unerwarteten, aber logisch nachvollziehbaren Spielzügen überraschen. Denn so reagieren Menschen auf Herausforderungen, nicht durch Abspulen immer gleicher, einfacher Mechanismen.

Spektrum: Gibt es bereits entsprechende Produkte?

Gerber: Wir haben ein Fußballspiel entwickelt, bei dem sich die Bots untereinander verständigen und sich beispiels-

Andreas Gerber hat an der Universität Saarbrücken Informatik studiert, sich in seiner Diplomarbeit mit Transportlogistik und Ressourcenmanagement befasst und anschließend am Deutschen Forschungszentrum für künstliche Intelligenz (DFKI) in Saarbrücken über Multiagentensysteme zur Logistikplanung promoviert. Seit 2004 leitet er das von ihm mitbegründete Unternehmen xaitment, das Verfahren der künstlichen Intelligenz nutzt, um Computerspiele zu entwickeln oder Entwickler mit entsprechenden Produkten zu unterstützen. Die Ausgründung des DFKI beschäftigt inzwischen 30 Mitarbeiter und gehört international zu den führenden KI-Entwicklern und -Servicedienstleistern. Seit 2007 vertreibt xaitment seine Produkte in den USA über eine Filiale in Los Angeles. Auszeichnungen wie der »ICT 2007«, ein europäischer Innovationspreis im Bereich Informatik, und »StartUp«, ein branchenübergreifender, bundesweiter Preis für so genannte Start-up-Unternehmen, unterstreichen die Kompetenz. Die Initiative Neue Soziale Marktwirtschaft (INSM) zählte Firmengründer Andreas Gerber 2007 zu einem von 50 »Wahren Superstars« in Deutschland.



Hunderte computergesteuerte Autos bahnen sich auf virtuellen Straßen selbstständig ihren Weg. Diese realistische Verkehrssimulation ist Teil eines Spiels der Saarbrücker KI-Firma xaitment. Dank Multiagententechnik reagiert der simulierte Verkehr dynamisch selbst auf waghalsige Aktionen des Spielers.

weise darüber informieren, wohin der Ball geschossen werden soll. Das ermöglicht ihnen eine der Situation angemessene Reaktion. Auch bei der Simulation von Straßenverkehr in einem Rennspiel kam diese Technologie zum Einsatz. Die Fahrzeuge sind intelligente autonome Einheiten, die Verkehrsregeln beachten, ihre Wege situationsabhängig planen und sich so dynamisch dem Verkehrsfluss anpassen. Übrigens ist eine Konkurrenzsituation kein Muss für den Spielspaß. Integrierte künstliche Intelligenz kann auch Kooperationen fördern, die Spieler können ihr soziales Verhalten trainieren und lernen, wie man gemeinsam Probleme löst.

Spektrum: Das sind in der Tat neue Perspektiven für die Gamer-Branche.

Gerber: Wir wollen diesen Aspekt künftig sogar noch verstärken und Multiagentensysteme auch für das betriebliche Training, für Lern- und Weiterbildungsprogramme einsetzen. Und weil es uns immer besser gelingt, die Wirklichkeit zu imitieren, wollen wir auch Simulationsprogramme entwickeln, für die Industrie oder auch für Stadtplaner.

Spektrum: Können Sie uns dafür ein Beispiel geben?

Gerber: Wenn eine Großbaustelle in einer Innenstadt eingerichtet werden soll, müssen die Planer die zu erwartenden Verkehrsströme abschätzen, um optimale Umleitungsstrecken auszuweisen. Mit Multiagentensystemen können sie ihre Strategien sozusagen austesten. Wir sind auch mit einem Hersteller von Medizintechnik über die Entwicklung von Trainingssoftware für medizinische Geräte wie Computertomografen im Gespräch – einfach um den Leuten ein Instrument zu geben, mit dem sie spielerisch den Umgang mit solch komplexen Systemen lernen können.

Spektrum: Eine ketzerische Frage: Haben Ihre Entwicklungen auch einen Nutzen für die Informatik?

Gerber: Da sehe ich sogar großes Potenzial. Computerspiele und virtuelle Welten bieten Forschern nämlich eine Spielwiese, neue Verfahren schnell und einfach umzusetzen und zu testen, was in realen Anwendungen oft nur sehr aufwändig, wenn überhaupt möglich, ist. ◁

Das Gespräch führte der Düsseldorfer Technikjournalist **Dieter Beste**.

European Union Science Contest for Young Scientists 2008

Wasser auf der Drehscheibe, Urkrebse im Fitnesstest oder Mathematik für Skifahrer – in Kopenhagen zeigten Nachwuchsforscher aus aller Welt, dass man auch ohne Geld und langjährige Erfahrung echte Wissenschaft betreiben kann.

Von Maike Pollmann

Der »European Union Science Contest for Young Scientists« scheint 2008 ein bisschen üppiger geraten als in anderen Jahren. Für die rund 150 Teilnehmer aus 34 europäischen, aber auch aus fernen Ländern wie China, Neuseeland oder Nigeria hält er ein ungewöhnlich volles Programm bereit. Nicht nur Nobelpreisträger und frühere Gewinner sind nach Kopenhagen gereist, auch das dänische Königshaus in Gestalt von Prinz Joachim samt Gattin kommt in der Woche vom 19. bis zum 26. September mehrmals zu Besuch.

Grund für die vielen Extras ist der 20. Geburtstag des Wettbewerbs. Seit 1989 holt die Europäische Kommission junge Forscher im Alter von 14 bis 21 Jahren zusammen, die sich in der nationalen Konkurrenz bereits auf den vorderen Rängen platzieren konnten. (Von 1968 bis 1988 hatte die Firma Philips die Vorläuferveranstaltung ausgerichtet.) Von Mathematik über Ingenieurwesen,

Links: Martin Tkáč demonstriert seine Entladevorrichtung für Schüttgüter am Modell (im kleinen Bild der Zustand nach dem Entladen). Rechts: David Wittkowski und die rotierende Flüssigkeit im Zylinder (kleines Bild)

Biologie und Medizin bis hin zu Sozialwissenschaften sind alle Fächer vertreten. Wer einen der gut dotierten Preise mit nach Hause nehmen darf, das entscheidet heute wie damals eine internationale Jury aus Wissenschaft und Industrie, nachdem sie die Jungforscher und ihre Werke begutachtet hat.

GÜTERZÜGE ENTLADEN

Jedem der insgesamt 87 Projekte ist zur Präsentation ein kleines, grell ausgeleuchtetes Büdchen im Konferenzraum des Radisson Scandinavia Hotels zugeteilt. Für das Forschungsobjekt von Martin Tkáč aus der Slowakei ist sein Stand jedoch viel zu klein. Also führt mich der Zwanzigjährige in Anzug und Krawatte erst einmal Schritt für Schritt durch seine akribisch ausgearbeiteten Konstruktionspläne.

Es geht um das Entladen von Güterzügen. Seine Idee, die ihm später einen der drei ersten Preise und 7000 Euro einbringen wird, ist so genial wie einfach: An Stelle von Menschen oder Maschinen soll allein die Schwerkraft arbeiten – und das auch noch viel schneller als mit heutigen Methoden. Bei diesen muss jeder Waggon zunächst abgekoppelt werden, um dann in einer speziellen Gerätschaft mitsamt den Schienen auf den Kopf gestellt zu werden. Insgesamt würde das Entladen eines Zuges

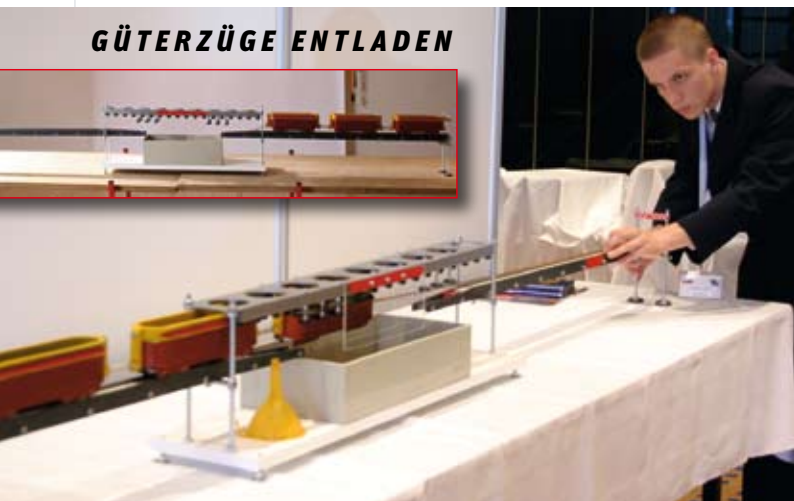
so bis zu drei Stunden dauern, erzählt Martin. Seine Erfindung ermögliche das in weniger als 40 Minuten.

Wenig später rollen in einem anderen Teil des Raums drei Waggons, beladen mit kleinen Steinchen, über die Gleise eines Modell-Güterbahnhofs im Maßstab 1:20 – drei Jahre Arbeit stecken darin (Bild links unten). Die Schienen senken sich etwas ab, der obere Teil des ersten Wagens wird auf eine Aufhängung geführt und entlastet das Fahrwerk, das zusammen mit dem Laderaum die zweite Einheit der Konstruktion bildet.

Die Schienen enden, und während der Waggon gemächlich auf den oberen Halterungen weiterrollt, dreht die Schwerkraft den auf einer Achse gelagerten Unterbau um 180 Grad. Von seiner Last befreit, kehrt der untere Waggonteil ganz von allein in die vertraute Lage zurück. Denn er ist so konstruiert, dass das Fahrwerk schwerer ist als das Material oberhalb der Drehachse. Schließlich erobert der Waggon wieder die Schiene und entlastet den Aufbau; derweil folgt der nächste Hänger bereits demselben Prozedere. Natürlich gehe das nur mit Schüttmaterial, informiert mich der schüchterne Slowake.

Um sein Projekt umzusetzen, wären zwar handelsübliche Fahrwerke verwendbar, die Waggons selbst sowie die Entla-

GÜTERZÜGE ENTLADEN



ALLE FOTOS DES ARTIKELS: MAIKE POLLMANN



ROTIERENDE FLÜSSIGKEITEN



FLUORESZENZPOLARISATION



DAS GROSSE KREBSRENNEN

devorrichtung müssten aber ausgetauscht werden. Für sein Land wäre das viel zu teuer, berichtet er. Nach dem Wettbewerb hätten sich aber bereits einige ausländische Firmen interessiert gezeigt. Und damit ihm keiner seine Erfindung klaut, will er sie schnell patentieren lassen.

ROTIERENDE FLÜSSIGKEITEN

Das Experiment von David Wittkowski (18) aus Ratingen passt dagegen mühelos auf einen Quadratmeter: Dreht sich ein zylinderförmiges Gefäß um seine eigene Achse, steigt Wasser darin an den Wänden auf und lässt in der Mitte eine kreisförmige Trockenfläche entstehen – ein bekanntes Schauspiel. In Davids Aufbau rotiert allerdings nur der Boden, und schon ergibt sich ein ganz anderes Bild: Es bilden sich Ellipsen, Sechsecke und andere gleichseitige Vielecke.

David war 2006 über einen Fachartikel auf diesen Symmetriebruch aufmerksam geworden. Ihn spornte an, dass man sich das Phänomen bisher nicht erklären konnte, und so ließ er schon kurz darauf Wasser und viele andere Flüssigkeiten in seinem eigenen Experiment umherwirbeln. Drehzahl und Flüssigkeitsvolumen sind die wesentlichen Parameter, die das Strömungsverhalten der Flüssigkeit bestimmen.

Anhand seiner Beobachtungen vereinfachte David Gleichungen aus der Hydrodynamik – die er sich in seiner Freizeit selbst beigebracht hatte – und entwickelte eine Computersimulation. Oberhalb der rotierenden Scheibe bilden sich zunächst umlaufende Wellen, die dann stehende Wellen bilden und damit die Ränder der polygonalen Strukturen. Tatsächlich ließ sich das Experiment sehr gut mit seinem Strömungsmodell beschreiben. Schon die Jury des deutschen Bundeswettbewerbs »Jugend forscht« belohnte seine Leistung im Mai 2008 mit dem ersten Preis im

Fachgebiet Physik. Auf gesamteuropäischer Ebene wurde sein Werk mit einem zweiten Platz bewertet.

Neben vielen Formeln zeigen die Poster an seinem Stand (Bild links unten, rechts) auch bunte Bilder vom Saturn. Wie passt das zusammen? Auf dem Nordpol des Saturns befinden sich bisher nicht verstandene hexagonale Muster, erklärt David. Ihm gelang es, eine physikalische Ähnlichkeit der beiden Systeme und damit die Übertragbarkeit seines Modells nachzuweisen. So müsste man gar nicht erst zu dem Planeten reisen, erklärt der Jungforscher bescheiden, sondern könnte dieses Phänomen unter Laborbedingungen untersuchen.

FLUORESZENZPOLARISATION

Viel Zeit in ihrem Heimlabor verbrachte auch Maria Hoyer (19) aus Gröbenzell bei München. In ihrem Stand hat sie neben leuchtenden Flüssigkeiten und Molekülmodellen voluminöse Messgeräte und abenteuerliche Versuchsaufbauten angeordnet (Bild oben, links). Auch wenn alles zusammengestückelt aussehe, sei es durchaus überlegt und funktioniere sehr präzise. Angefangen hat ihr Projekt 2006 mit einem selbst gebastelten Fluoreszenzmikroskop: Angeregt mit kurzwelligem Licht fluoresziert eine Probe im längerwelligen Spektralbereich.

Farbenprächtige Bilder von fluoreszierenden Algen und Bakterien zeigen, dass Maria Erfolg hat – ohne 10000 Euro für ein professionelles Mikroskop ausgegeben zu haben. Stattdessen ersteigerte sie Teile der Apparatur und einige Messgeräte Kosten sparend im Internet. Mit Polarisationsfiltern im Strahlengang wollte sie ihr Instrument eigentlich nur verbessern, doch stieß sie dabei auf einen interessanten Effekt: Werden beispielsweise Farbstoffe mit polarisiertem Licht angeregt, so schwingt auch die dadurch

Links: Maria Hoyer misst die Polarisation von Fluoreszenzlicht. Rechts: Elisabeth Somavilla und Johannes Niedermayer testen die Fitness ihrer Krebse auf einer Rennbahn.

angeregte Fluoreszenzstrahlung bevorzugt in eine bestimmte Richtung.

Diese Fluoreszenzpolarisierung lässt auf Eigenschaften des Farbstoffs sowie seiner chemischen Umgebung schließen, erklärt Maria. Je zäher das Medium, je sperriger das Farbstoffmolekül (zu beschreiben durch sein so genanntes Rotationsvolumen) und je kürzer die Zeit zwischen Absorption des anregenden und Emission des niederfrequenten Photons (die »Fluoreszenzlebensdauer«), desto weniger hat sich das Molekül mitsamt der Polarisierungsebene durch die Wärmebewegung gedreht und desto ausgeprägter ist die Polarisierung des Fluoreszenzlichts. In einem speziellen Versuchsaufbau bestimmte Maria deshalb mit einer Photodiode dessen Intensität, indem sie die Ausrichtung der Polarisationsfilter vor und hinter der Probe variierte.

Auf diese Weise untersuchte sie dann zum Beispiel aus Zwiebeln isolierte Desoxyribonukleinsäure (DNA), in die der Farbstoff Acridinorange eingelagert war. Maria konnte mit ihrer Apparatur nachweisen, dass sich sowohl der Farbstoff innerhalb des DNA-Strangs dreht als auch die gesamte molekulare Struktur in der Lösung.

Besonders freut sie sich aber über den Fund eines bislang noch nicht beschriebenen Komplexes. Über diesen stolperte Maria, als sie die Wechselwirkung zwischen dem Farbstoff Rhodamin 6G und dem Tensid Natriumdodecylsulfat analysierte. Mit Hilfe anderer Verfahren wie Leitfähigkeitsmessungen, Auskristallisation oder Kernresonanzspektro-



Yiyu Bai (links), Clelia Maria Bonardi (Mitte) und Ilaria Scarabottolo finden den schnellsten Weg für Skiläufer.

skopie überprüfte sie ihre Entdeckung. Bei »Jugend forscht« brachte sie mit diesen Ergebnissen den ersten Platz im Fachgebiet Chemie nach Hause, in der internationalen Konkurrenz konnte sie sich leider nicht behaupten.

DAS GROSSE KREBSRENNEN

Das Projekt von Johannes Niedermayer (20) und Elisabeth Somavilla (16) aus Österreich spielt sich ebenfalls auf der mikroskopischen Ebene ab. Die futuristisch leuchtende Apparatur an ihrem Stand will gar nicht zu dem biederen Thema »Bioindikatoren für Gewässer« passen. Denn irgendwelche Tierchen und Pflänzchen, an deren Wohlergehen man die Wasserqualität ablesen kann, gibt es zuhauf. Nur seien, so Elisabeth, die zugehörigen Verfahren oft sehr zeitaufwändig oder wenig aussagekräftig für einen einzelnen Wirkstoff.

In verschiedenen Tests fanden die beiden heraus, dass sich die Urkrebse *Artemia salina*, die seit Millionen von Jahren die Erde bevölkern und inzwischen oft als Futter für Zierfische enden, gut als Bioindikatoren eignen. Denn Licht zieht die rund 30 Mikrometer langen Tierchen magisch an, und genau das nutzen Johannes und Elisabeth aus: Sie ließen die Krebse für mehrere Tage in einer mit Testchemikalien versetzten Wasserprobe baden und steckten sie dann vorsichtig in ihr rot schillerndes »Race-System«.

Die selbst konstruierte Rennstrecke (Bild S. 101 rechts) besteht aus sechs Röhren, die auf eine entsprechende Zahl ultraheller Leuchtdioden gerichtet sind. An das eine Tunnelende werden jeweils Gruppen von bis zu fünf Salinenkrebse gesetzt, wo sie für einige Minuten verschlafen dürfen. Dann heben sich, angetrieben durch einen Elektromagneten, die Barrieren und geben den etwa zehn Zentimeter langen Weg zum Licht frei. So schnell sie können, schwimmen die chemisch oder physikalisch gestressten

Urkrebse dem Ziel entgegen. Eine Digitalkamera fotografiert ständig das Geschehen und leitet ihre Daten an eine Software weiter.

Auf diese Weise wird das Eintreffen der Tiere registriert und die jeweilige Schwimmzeit ermittelt. Ihre Leistung hängt von der Art und Konzentration eines im Wasser gelösten Wirkstoffs ab, fanden die beiden in zahlreichen Testreihen heraus. Zwar sind ihre Tests bisher vorerst nur für Aspirin abgeschlossen; aber weitere Stoffe wie Aceton sind in Arbeit, und im Prinzip sollten fast alle wasserlöslichen Chemikalien mit ihrem Aufbau überprüfbar sein. Auch wären andere lichtempfindliche Wasserkeimlebewesen als Bioindikatoren denkbar.

DIE KURVE SCHNELLSTEN GLEITENS

Den Italienerinnen Yiyu Bai, Clelia Maria Bonardi und Ilaria Scarabottolo (alle 18) liegt statt Schwimmen mehr das Skifahren am Herzen. Wie gelangt ein Körper unter dem Einfluss der Gravitation am schnellsten von A nach B , wobei B irgendwie schräg unterhalb von A liegt? Mit diesem Problem setzten sich im 17. Jahrhundert keine Geringeren als Galileo Galilei oder Isaac Newton auseinander, berichten die drei aufgeregt. Der Mathematiker Johann Bernoulli fand 1696 als Erster die Lösung: Nicht etwa die kürzeste Verbindung, also eine Gerade, sondern eine Zykloide ist die Kurve kürzesten Gleitwegs, die »Brachystochrone«.

Derweil flackert auf dem Notebook eine Animation, in der ein Kreis gleichmäßig auf einer Geraden entlangrollt. Die von einem Punkt des Kreises dabei beschriebene Bahn bildet die gesuchte Kurve (Spektrum der Wissenschaft 5/2007, S. 94). Bei ihrem Faible für den Alpinski, sagt Clelia, wollten sie einfach wissen, ob die Zykloide auch in dieser Anwendung wiederzufinden ist. Der Bildschirm zeigt inzwischen Videomitschnitte von Slalomrennen der weltbes-

ten Skifahrer, auf denen jeweils die optimalen Spuren markiert sind. Die Bahnen der Sportler kommen einer Zykloide tatsächlich sehr nahe.

Eine mit Schnee gefüllte Box soll die bisherigen Ergebnisse untermauern. Auf dem rund ein Meter langen Parcours geht es auf der einen Seite mit der angeblich perfekten Kurve bergab, auf der anderen auf einem zufällig gebogenen, aber kürzeren Weg. Nach Dänemark haben die Skibegeisterten allerdings die wärmebeständige Variante mitgebracht, auf der sie vor meinen Augen Gummikugeln zu Tal rollen lassen. Mehrere Lichtschranken messen dabei die Laufzeit und übertragen ihre Daten auf den Computer. Egal ob Schnee oder Holz: Die Zykloide ist in allen Fällen der schnellere Weg.

Der mathematischen Funktion auf einer realen Skipiste genau zu folgen sei natürlich sehr schwierig, geben die drei zu. Dennoch könne allein das Wissen darum die Strategie der Sportler verbessern. Wenn nach einem Wettkampf die gefahrene Spur mit einer Zykloide überlagert wird, würden Fehler direkt erkennbar. Darüber hinaus wäre auch eine neue Generation von Skiern denkbar, die selbst bei hohen Geschwindigkeiten nicht auf die schiefe Bahn geraten.

Um die praktische Umsetzbarkeit der Projekte geht es der Jury aber letztlich nicht, wie ein Mitglied erzählt. Originell und kreativ, von Anfang bis Ende durchdacht und sorgfältig bearbeitet sollen die Projekte sein. Diese Kriterien erfüllten in Kopenhagen viele Arbeiten – umso schwieriger ist es, sich für einige wenige Sieger zu entscheiden.

Vor diesem Problem stehen die Juroren seit der Gründung des »European Union Science Contest for Young Scientists« wohl jedes Jahr aufs Neue. Deutschland ist mit 19 ersten Preisen in 20 Jahren bislang übrigens die erfolgreichste Nation. \triangleleft



Maïke Pollmann hat Physik studiert und ist freie Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg.

AUTORIN

GEOLOGIE

Kaleidoskop der Feuerberge

Vater und Sohn Pichler führen den Leser unterhaltsam und lehrreich durch die wichtigsten Vulkangebiete der Welt.



tailreiche, von Koautor und Sohn Thomas Pichler mit erkennbarer Sorgfalt gestaltete Karten ausgewählter Vulkangebiete. Lava- und Aschenströme, Calderen und andere topografische Merkmale sind mit Liebe zum Detail verzeichnet, seltsamerweise allerdings keine Höhenlinien. Abgesehen von dieser Merkwürdigkeit ist die optische Aufmachung ein Höhepunkt des Buchs. Die Abbildungen gehen über die Illustration des Textes hinaus und sind eine wertvolle Informationsquelle eigenen Rechts.

Vulkane gibt es in allen Formen und Farben, und der Tübinger Vulkanologe Hans Pichler kennt sie alle. In gelehrtem Plauderton nimmt der Autor seine Leser mit auf eine Reise, von Pichlers Hausvulkanen in Catania, über die er eine fünfbandige Monografie verfasst hat, in weiten Schwüngen

über den gesamten Globus. Dabei hält er sich nicht mit theoretischen Betrachtungen auf, sondern stellt Beschreibungen, Anekdoten und persönliche Erlebnisse in den Vordergrund.

»Vulkangebiete der Erde« ist kein Lehrbuch der Vulkanologie, sondern zuallererst eine Anthologie: Mit fachmännischem Blick arbeitet Pichler die individuellen Charakteristika der unterschiedlichen Vulkane heraus und bettet sie in ihren geologischen und historischen Kontext ein.

Neben regionalen Übersichtskarten am Beginn jedes Kapitels enthält das Buch de-

Seine historischen Beschreibungen würzt Pichler mit Berichten über lokale Gegebenheiten und Sehenswürdigkeiten. Neben der unübersehbaren Begeisterung des Autors für »seine« Berge kommt immer wieder die Ambivalenz zum Vorschein, mit der die Menschheit Vulkanen seit alters her gegenübersteht: Auf Beschreibungen katastrophaler Ausbrüche folgen – oft recht unvermittelt – Hinweise auf landschaftliche Schönheit, die besten Aussichtspunkte und Wanderwege.

Aus einem Lavasee, der sich im Juli 1980 kurzzeitig beim Ausbruch einer flachliegenden Magmakammer unter dem Krafla-Feld in Island bildete, trat Gas aus und riss extrem dünnflüssige Lava mit sich.





Am 2. Juni 1986 spritzten gewaltige Fontänen aus dem Lavasee des Pu'u O'o auf Hawaii; der lief über und ergoss sich in zwei schnell abfließenden Strömen.

Zwischen diesen Extremen ist die unruhige, aber dauerhafte Nachbarschaft von Mensch und Vulkan oft bemerkenswert prosaisch. Pichler berichtet von voreiligen Evakuierungen, von Leichtsinn, schlechter Infrastruktur und nicht zuletzt von stoischer Beharrung: Schulkinder am Fuß des dauernd aktiven Sakurajima in Japan seien gehalten, auf dem Schulweg Helme zu tragen, da plötzlich »Steine fallen« können.

Bei aller erzählerischen Leichtigkeit – geowissenschaftliche Kenntnisse sollte der Leser mitbringen. Pichler nimmt immer wieder Bezug auf fachliche Grundlagen, ohne sie in geordneter Form einzuführen. Die de-

tailreiche, wild gemischte Darstellung der verschiedenen Vulkantypen hinterlässt den Einsteiger ebenso verwirrt wie belehrt. Da helfen auch ein Kapitel mit einer knappen Einführung in die Vulkanologie und ein Glossar der wichtigsten Fachbegriffe nichts.

Dieses Werk ist kein Einstieg in die systematische Vulkanologie, sondern ein höchst unterhaltsamer Überblick, der – abgesehen von der Didaktik – den Ansprüchen an ein wissenschaftlich fundiertes Sachbuch genügt.

Lars Fischer

Der Rezensent hat Chemie studiert und ist Wissenschaftsjournalist in Hamburg.

Hans und Thomas Pichler

Vulkangebiete der Erde

Spektrum Akademischer Verlag,
München 2007. 261 Seiten, € 52,-

PHYSIK

Ein neuer Blick auf die Welt

Robert Laughlin bietet eine erfrischend andere Sichtweise der Physik – und beschädigt sein eigenes Anliegen durch überflüssige Mätzchen.

Für gewöhnlich sind Wissenschaftler bemüht, Sachverhalte auf einfachere Sachverhalte zurückzuführen und die wiederum auf noch grundlegendere. Am Ende dieses Reduktionsprozesses steht im Idealfall eine »Weltformel«, die so fundamental ist, dass sich alles auf ihr gründet.

In der Tat ist der Reduktionismus als Philosophie unter Physikern weit verbreitet, und die Idee einer »Theorie von Allem« (*theory of everything*) fasziniert viele von ihnen. Aber die Suche danach könnte nutzlos sein, selbst wenn sie erfolgreich ist. Dann hat man die Formel und versteht die Welt noch immer nicht, weil man durch ihr Zerlegen in kleinste Einzelteile genau die Zusammenhänge aus dem Blickfeld entfernt hat, auf die es ankommt. Der Physiker Robert B. Laughlin von der Stanford University (Kalifornien) ruft daher den Übergang der Wissenschaft in ein »Zeitalter der Emergenz« aus, in dem sich »die Suche nach letzten Ursachen der Dinge vom Verhalten der Teile auf das des Kollektivs verlagert«.

Das Konzept der Emergenz ist in Biologie, Medizin oder Philosophie längst etabliert, wenn auch nicht unbedingt unter diesem Namen. Das eindrucksvollste Beispiel

eines emergenten Phänomens ist unser eigenes Bewusstsein: Keines unserer Neurone hat es; vielmehr bringt erst ihr Zusammenspiel es hervor. In der Physik blieben emergente Vorgänge bislang hingegen eher unbeachtet, wengleich sich auch hier zahlreiche Beispiele finden lassen. So ist die Temperatur nie eine Eigenschaft eines Moleküls, sondern immer nur großer Molekülkollektive, auch wenn die theoretischen Physiker gerne von der »Temperatur in einem Punkt« sprechen. Ein einzelnes Atom ist nicht hart oder weich; Härte ist erst eine Eigenschaft einer Vielzahl von Atomen.

Auch wenn sich emergente Phänomene durch simple Gesetze beschreiben lassen, sind diese, so Laughlin, nicht auf einfachere Gesetze zurückzuführen. Vielmehr entstehen durch Selbstorganisation vieler Elemente kollektive Zustände, die über die Summe dieser Teile hinauswachsen. In diesem Kontext werden die zu Grunde liegenden Gesetze bedeutungslos und damit auch die Weltformel, sollte sie überhaupt existieren. So braucht man kein Wissen über Strings oder Quarks, um in Biologie, Klimaforschung oder Physik wichtige Erkenntnisse gewinnen zu können.



Folglich können Gesetzmäßigkeiten nicht durch bloßes Denken antizipiert werden, schließt Laughlin, sondern nur durch Experimente. So sieht er etwa die Stringtheorie nur als einen schönen Satz von Ideen. Einen praktischen Nutzen habe sie nicht, da sie immer außer Reichweite der experimentellen Überprüfbarkeit liegen werde. Stattdessen solle sich die Wissenschaft nun auf die Katalogisierung der emergenten Phänomene konzentrieren.

Denn spätestens mit dem 1980 von Klaus von Klitzing entdeckten Quanten-Hall-Effekt sei das Zeitalter des Reduktionismus vorüber. Von Klitzing zeigte damals, dass sich unter bestimmten Bedingungen neue, kollektive Elektronenzustände in einem stromdurchflossenen Leiter ausbilden. Laughlin forschte selbst auf diesem Gebiet und vermochte mit dem Modell der Selbstorganisation den verwandten »gebrochenzahligen Quanten-Hall-Effekt« zu beschreiben. In diesem lassen sich vermeintlich unteilbare Größen – in diesem Fall die Elementarladung – durch die Selbstorganisation von neuen Materiephasen in exakte Bruchteile zerlegen. Für diese Leistung erhielt er 1998, gemeinsam mit Horst Störmer und Daniel Tsui, den Nobelpreis für Physik.

Nicht verwunderlich also, dass dies zu seinem Paradebeispiel für emergente Phänomene wird, denn reduktionistischen Methoden, die nur die Eigenschaften der einzelnen Bestandteile betrachten, blieb die Aufklärung verwehrt. In seinem Buch stellt Laughlin aber auch in anderen Bereichen

der Physik, etwa bei »Nanoflitterkram« (gemeint: Nanotechnik), Supraleitern oder Quantencomputern, die reduktionistische Sichtweise in Frage und zeigt die überlegene Erklärungskraft des Emergenzkonzepts auf.

Damit liefert Laughlin eine sowohl physikalisch als auch philosophisch interessante Ansicht der Welt und ein Gegengewicht zu den Büchern von Brian Greene, Stephen Hawking und anderen, die ein »elegantes Universum« propagieren. Doch leider verwischt er seine Argumente oftmals durch abstruse Beispiele und missglückte Analogien, etwa wenn er die Verschränkung von Quantenobjekten mit einer Einkom-

mensteuererklärung vergleicht. Noch mehr stören die in jedem Kapitel eingestreuten Anekdoten. Ob er sich seitenweise über lebensbedrohliche Situationen beim Campingausflug mit seinen Jungs oder über eine Bootsfahrt auf dem Neckar mit seinen Wissenschaftlerkollegen auslässt – über das gesamte Buch wird man durch seine entbehrlichen Geschichten wieder aus dem eigentlichen Stoff gerissen.

Darüber hinaus hinterlassen manche Kapitel mehr Fragen als Antworten. Immer wieder verwendet der Autor gar nicht oder nur unzureichend eingeführte Fachbegriffe, wie beispielsweise »ultravioletter Cutoff«, »kanonische Quantelung« oder »Isotopen-

masse«. Damit dürfte es dem Nichtfachmann schwer fallen, so manchen Gedanken von Laughlin zu verfolgen.

Das Buch bleibt lesenswert auf Grund der interessanten Ideen; aber die schlechte Umsetzung mindert das Lesevergnügen.

Maike Pollmann

Die Rezensentin ist freie Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg.

Robert B. Laughlin

Abschied von der Weltformel

Die Neuerfindung der Physik

Aus dem Amerikanischen von Helmut Reuter.
Piper, München 2007. 330 Seiten, € 19,90



CHEMIE

Die Schönheit der exakten Messung, der Pedanterie und der Geduld

Philip Ball findet an jedem von zehn Schlüsselexperimenten der Chemie eine herausragende Qualität.

Im frühen 17. Jahrhundert ließ der flämische Arzt Jan Baptista van Helmont eine Weide in einem Blumentopf wachsen und führte nichts als Wasser zu. Er wollte so zeigen, dass alle Dinge letztendlich aus Wasser bestehen, was nach damaliger Auf-

fassung im Einklang mit der biblischen Schöpfungslehre stand.

Dies ist das erste von insgesamt zehn chemischen Experimenten, die der britische Wissenschaftspublizist Philip Ball, langjähriger Redakteur der Zeitschrift »Nature«, für den interessierten Laien zusammengestellt hat. Die Spannweite reicht zeitlich von den Zeiten van Helmonts bis in die Gegenwart, inhaltlich von der physikalischen Chemie bis zur organisch-chemischen Synthesechemie. Dabei gibt Ball dem Leser zu jedem Experiment nicht nur einen Einblick in den historischen Zusammenhang, sondern auch in die Denkweise und Vorstellungswelt der jeweiligen Wissenschaftlergeneration. So sind an van Helmonts Versuch vor allem das systematische Umgehen mit Fehlerquellen sowie der Versuch der Quantifizierung erstaunenswert, maßen doch seine Zeitgenossen dem Glauben an Überliefertes weitaus mehr Bedeutung zu als einer kritischen Überprüfung.

Jede der Stationen steht exemplarisch für einen Aspekt, der zur »Schönheit« eines Experiments beiträgt. Im Falle van Helmonts ist es die Schönheit der exakt durchge-

föhrten Messung. Das Experiment, mit dem Henry Cavendish (1731–1810) zeigte, dass Wasser kein Element ist, bezieht dagegen seinen Reiz aus der Liebe des Experimentators zum Detail. Der wahrscheinlich am Asperger-Syndrom leidende englische Aristokrat entdeckte dank seiner Pedanterie nicht nur den Wasserstoff, sondern auch das Edelgas Argon. An der Entdeckung der Elemente Radium und Polonium durch Marie (1867–1934) und Pierre Curie (1859–1906) preist Philip Ball die »Schönheit der Geduld«: Eindrucksvoll schildert er, wie sie unter Aufbringung all ihrer (auch körperlichen) Kräfte in einem leeren Lagerraum der Hochschule für Chemie und Physik in Paris Tonnen von Pechblende aufarbeiteten, um daraus schließlich blassblaugrün leuchtende Lösungen zu gewinnen, in denen Radium und Polonium enthalten waren.

Stets ist der Autor bemüht, den Akteuren der Wissenschaftsgeschichte durch Charakterskizzen und Anekdoten Leben zu verleihen. So beschreibt er Ernest Rutherford (1871–1937) als den Prototyp des massigen Neuseeländers – stets zu einem Scherz und zu oft falschem, aber lautem Gesang aufgelegt.

Wie die Wissenschaft sich gewandelt hat, wird an den Projekten aus neuerer Zeit deutlich. Die Herstellung und Untersuchung des superschweren Elements Seaborgium

Schönheit der Geduld: die zweifache Nobelpreisträgerin (Physik 1903, Chemie 1911) Marie Curie



(1995–1997) erfolgte nicht mehr durch Einzelpersonen, sondern durch ein ganzes Forscherteam. Grenzen ausloten, so heißt ein Ziel der modernen Wissenschaft: Zur Charakterisierung des neuen Elements bedurfte es insgesamt nur dreier Atome.

Das Gebiet, das dem Autor besonders am Herzen liegt, ist zweifelsohne die synthetische Chemie. Hier kommt der Chemiker dem Idealbild, das Francis Bacon 1627 in seinem Werk »New Atlantis« zeichnet, sehr nahe: Der wahre Wissenschaftler sollte sein wie eine Biene, die »aus den Blumen der Gärten und Felder Grundstoffe gewinnt, die sie durch eigene Anstrengung zu etwas Neuem formt«. Seinem Lieblingsgebiet widmet Ball die letzten beiden Kapitel: zur Synthese des Vitamins B₁₂ durch Robert Woodward 1972 und des Dodecahedrans durch Leo Paquette 1982. Während beim Ersteren die schiere Schwierigkeit des Projekts seinen besonderen Reiz ausmacht – Vitamin B₁₂ war damals das komplizierteste je total-synthetisierte organische Molekül –, ist es beim Dodecahedran, dessen Kohlenstoffatome an den Ecken eines platonischen Dodekaeders sitzen, der rein ästhetische Aspekt.

Leider führt der Autor den interessierten Laien, für den er das Buch geschrieben hat, an dieser Stelle auch an die Grenzen seines Verstehens. Die Lektüre ist dennoch lohnend, bekommt man hier doch einen Einblick, wie sehr der moderne Wissenschaftler unter Leistungs- und Konkurrenzdruck steht und welche Persönlichkeiten in diesem Umfeld Erfolg haben.

Durch das gesamte Buch zieht sich das Bemühen, eine wahrheitsgetreue, dem aktuellen Stand der Forschung entsprechende Darstellung der Geschichte zu geben. So räumt der Autor mit der Legende auf, die Entdeckung der Chiralität – die Eigenschaft von Gegenständen oder Molekülen, sich wie Bild und Spiegelbild zueinander zu verhalten – durch Louis Pasteur sei das Produkt eines einzigen stringenten Gedankengangs gewesen. Im Gegenteil scheint es so, als habe der Wissenschaftler lange im Nebel herumgestochert. Das Experiment ist dennoch bestechend einfach: Durch das Sortieren von Kristallen (von Hand), die sich auf makroskopischer Skala wie Bild und Spiegelbild verhalten, zeigt Louis Pasteur, dass die optische Aktivität von Molekülen mit der Chiralität zusammenhängt.

Unterbrochen wird die ausgesprochen spannend geschriebene Zeitreise durch die Wissenschaftsgeschichte durch Einschübe, in denen sich Philip Ball Gedanken über die Darstellung der Chemie in der bildenden und darstellenden Kunst macht. Seine Exkurse zur magisch-spirituellen Wirkung der Chemie wirken allerdings in dem streng wissenschaftlichen Umfeld seines Buchs seltsam deplatziert.

Trotz einiger kleinerer Kritikpunkte: Philip Ball gelingt es, Wissenschaftsgeschichte auf unterhaltsame Art und Weise zu präsentieren und dem Leser zugleich eine Vielzahl an Informationen zu vermitteln. Die Lektüre lohnt sich!

Elena Kordel

Die Rezensentin hat in Theoretischer Chemie promoviert und befindet sich im Moment in Elternzeit.

Philip Ball

Brillante Denker, kühne Pioniere
Zehn bahnbrechende Entdeckungen

Aus dem Englischen von Anna Schleitzer.
Wiley-VCH, Weinheim 2007.
233 Seiten, € 24,90

Exklusiv für Abonnenten

Ab sofort können Sie sich mit Ihrer Abonnementnummer unter www.spektrum-plus.de Ihren persönlichen Spektrum-Mitgliedsausweis herunterladen. Damit erhalten Sie Vergünstigungen bei den aufgelisteten Museen, Filmtheatern und wissenschaftlichen Einrichtungen:



DER WISSENSCHAFT



MITGLIEDSAUSWEIS

Max Mustermann

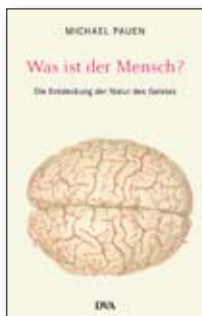
Kunden-Nummer:
Ausweis-ID 1sd145dg4637834hd

Der Ausweis ist nur in Verbindung mit dem Personalausweis gültig.



Industriemuseum, Chemnitz / Neanderthal Museum, Mettmann / Auto & Technik Museum, Sinsheim / Technik Museum, Speyer / IMAX 3-D Filmtheater, Sinsheim / IMAX DOME, Speyer / Deutsches Dampflokomotiv-Museum, Neuenmarkt / Deutsches Hygienemuseum, Dresden / Deutsches Technikmuseum, Berlin / Zentrum für Multimedia, FH Kiel / Museum für Naturkunde, Magdeburg / Volkssternwarte und Planetarium, Recklinghausen / Umwelt-Museum Oberfranken, Bayreuth / Universum Science Center, Bremen / Deutsches Erdölmuseum, Wietze / Mathematikum, Gießen / Deutsches Museum, Bonn / Astronomisches Zentrum, Schkeuditz / Planetarium und Schulsternwarte, Herzberg / Planetarium, Freiburg / Turm der Sinne, Nürnberg / Zeppelin-Museum, Meersburg / Nicolaus-Copernicus-Planetarium, Nürnberg / Dynamikum, Science Center, Pirmasens

Schauen Sie doch einfach im Internet, was Sie alles erwartet!



NEUROPHILOSOPHIE

Das naturalistische Missverständnis

Zu wissen, wie unser Gehirn funktioniert, ist noch keine Kränkung – auch wenn unsere Denktradition ein solches Missverständnis nahelegt.

In der Flut der Bücher über die moderne Hirnforschung wünsche ich diesem besonders aufmerksamen Leser. Der Autor, von Beruf Philosoph an der Humboldt-Universität in Berlin, stellt eine gute alte Frage. Wer wir sind, interessiert uns alle – und die Antwort wird im Licht der jeweils aktuellen Naturforschung immer neu ausfallen müssen.

Das geht nicht ohne Konflikte ab. Dass das überkommene Menschenbild durch naturwissenschaftliche Erkenntnisse in Frage gestellt wird, begrüßt nicht jeder freudig als Gewinn. Den Verlust von althergebrachten Überzeugungen erleben viele als Bedrohung. Gerade die Hirnforschung wird oft als Angriff auf die menschliche Kernsubstanz interpretiert – als wollte man uns einreden, unser Ich und unser Wille, erlebte Farben und Schmerzen wären »nichts als« Epiphänomene, das heißt »bloße« Begleiterscheinungen hirneurologischer Prozesse. Als wären wir »nur« neuronale Automaten, in deren Kopfkino sinnlose Filme flackern.

Den vermeintlichen Verlust, der in abschätzigen Worten wie »nur«, »bloß« und »nichts als« zum Ausdruck kommt, nennt Pauen ein »naturalistisches Missverständnis«. Dieser Ausdruck ist leider selbst etwas missverständlich; gemeint ist nicht etwa ein Missverständnis, sondern der verbreitete Vorwurf, der Naturalismus – ein Kürzel für die natürliche und mit der Zeit naturwissenschaftliche Erklärung der Welt – würde das Menschenbild immerfort nur reduzieren, degradieren, beschädigen, nicht vielmehr bereichern und erweitern.

Dieser Mythos hat, wie Pauen zeigt, in der Geistesgeschichte eine feste Tradition. So gelten das kopernikanische Weltbild, Darwins Abstammungslehre und Freuds Entdeckung des Unbewussten als drei typische »Kränkungen« des Menschenbilds, weil sie nacheinander unseren zentralen Ort im Kosmos, unsere Besonderheit als Gottes Geschöpfe und unsere psychologische Autonomie abschafften.

Zumindest für den ersten Fall kann Pauen auf ein echtes Missverständnis verweisen: Ganz im Gegensatz zur vermeintlichen Kränkung erhöhte das heliozentrische Sys-

tem den Menschen, indem es ihn vom irdischen Bodensatz in die Sphäre der Himmelskörper erhob, und rief eben damit den Widerstand der Kirche wach.

Weniger überzeugen mich Pauens Versuche, den geistesgeschichtlich nachweisbaren hartnäckigen Widerstand gegen naturalistische Erklärungen generell als bloßen Mythos kleinzureden. Das Erstarken des Kreationismus in den USA und der auch in Europa hohe Prozentsatz von Gegnern der Evolutionslehre sprechen eher gegen Pauens optimistische Einschätzung, das so genannte naturalistische Missverständnis werde sich mit der Zeit ganz von selbst erledigen.

Doch ein Missverständnis ist es allemal, im Naturalismus den Widersacher all dessen zu sehen, was Menschen gut und teuer ist. Wie Pauen verdeutlicht, entwertet die Hirnforschung keineswegs unsere subjektiven Erlebnisse, indem sie deren neuronale Grundlagen ergründet. Wir werden auch in Zukunft weiter »ich« sagen, uns als selbstbewusste Person erleben, zwischen Handlungsalternativen wählen und Verantwortung für unsere Taten tragen. Wir werden aber immer besser verstehen, wie all das zu Stande kommt.

Um einen kopernikanischen Vergleich zu bemühen: Menschen sagen seit Jahrtausenden »Gleich geht die Sonne auf« und »Bald kommt der Frühling«, doch wir wissen seit

ein paar Jahrhunderten, dass wir Sonnenaufgang und Jahreszeiten erleben, weil sich die Erde um sich selbst und um die Sonne dreht, nicht die Sonne um die Erde. Im alltäglichen Leben ist die geozentrische Sprechweise dennoch völlig adäquat, während die astronomisch korrekte Formulierung überhaupt nichts zu der Frage beitragen würde, ob es gleich hell wird oder ob man sich lieber warm anziehen soll. Auch nehmen weder die Schönheit der Morgenröte noch die Freude am Frühling durch unser Wissen um die Gestalt des Planetensystems den geringsten Schaden.

Genauso wenig leidet unser Selbstgefühl, wenn wir die Natur des Geistes besser erkennen. Und für alltägliche Entscheidungen wie für deren strafrechtliche Zurechenbarkeit wird es auch in Zukunft kaum eine Rolle spielen, dass ihnen komplexe neuronale Prozesse zu Grunde liegen.

Um mit Pauen zu schließen: »In jedem Fall sind die Risiken, die von der Erkenntnis der Natur des Geistes ausgehen, vergleichsweise gering gegenüber dem Gewinn: Ein verbessertes Verständnis unserer wichtigsten Fähigkeiten und ihrer sozialen, kulturellen und natürlichen Bedingungen dürfte vor allem den Respekt vor diesen Fähigkeiten und dem Menschen als ihrem Träger noch erhöhen – auch dieses Verständnis selbst wäre schließlich eine Leistung des Menschen.«

Michael Springer

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

Michael Pauen

Was ist der Mensch?

Die Entdeckung der Natur des Geistes

Deutsche Verlags-Anstalt, München 2007.
272 Seiten, € 19,95



VERHALTENSFORSCHUNG

Krieg der Affen

Die Fähigkeit, moralisch böse zu sein, ist nicht dem Menschen vorbehalten. Volker Sommer beschreibt, wie mörderisch die Affen sein können – und stellt im Gegenzug aus Versehen den Menschen viel netter dar, als er ist.

Das erfrischend unkonventionell geschriebene Buch ist jedem zu empfehlen, der sich für moderne Verhaltensforschung interessiert. Der Autor stellt sein Thema mit Einfühlungsvermögen, (Selbst-)

Ironie und Sprachgefühl fassettenreich dar. Es macht ihn sympathisch, dass er nicht der Versuchung zur Kollegenschelte erliegt; vielmehr garniert er seine Ausflüge ins Allzumenschliche mit Anspielungen auf

eigene Schwächen wie etwa die für deutsches Bier.

Dem Untertitel »Horizonte der Evolutionsbiologie« zum Trotz ist Volker Sommer Verhaltensforscher. Als Inhaber des Lehrstuhls für Evolutionäre Anthropologie am Londoner University College begreift er sich als »Historiker der Menschwerdung«, der nicht die anatomischen Wurzeln menschlichen Seins erforscht, sondern die geistigen. Seit 25 Jahren beobachtet er sowohl Menschenaffen und Gibbons in ihren weitgehend naturnahen Habitaten als auch die indischen Tempelaffen (Languren) und andere Affen in von Menschen geprägten Lebensräumen. Seine Langzeitstudien haben das Verständnis der Sozialstrukturen bei Primaten maßgeblich erweitert.

Schimpansengruppen überfallen ihre Nachbarn, töten die Männchen, nehmen die jüngeren Weibchen auf – und verspeisen deren Kinder

Im Licht seiner vergleichenden Studien – menschliches Verhalten einerseits, problem-lösendes Verhalten und Sozialstrukturen von Wirbeltieren andererseits – fallen allzu einfache Erklärungsmuster in sich zusammen, darunter liebgeordnete Vorstellungen, die unserer Eitelkeit schmeicheln: »Menschen haben Verstand, Tiere Instinkt« oder »Menschliches Leben ist von Kultur bestimmt, tierisches Leben von der Natur«. Solche Glaubenssätze widerlegt Sommer mit zahlreichen Beispielen, etwa den unterschiedlichen, kulturell tradierten Methoden ost- und westafrikanischer Schimpansen, sich dieselbe Nahrungsquelle zu erschließen. Auch im Sozialverhalten gibt es regionale Unterschiede und sogar gruppenspezifische Tabus: Während Schimpansen normalerweise nicht wasserscheu sind, durchqueren die Angehörigen der Gruppe im ostafrikanischen Gombe keine Bäche, treten nicht einmal in Pfützen.

Hunde kooperieren bei der Jagd und der Jungenaufzucht in Rudeln, weshalb sie bei Tests zur Kooperation gut abschneiden. Durch Hilfestellungen wie Deuten finden sie aus einem von drei Behältern denjenigen, der die Belohnung enthält. Schimpansen versagen bei solchen Tests, weil sie um Nahrung konkurrieren und Hilfestellungen nicht zu ihrem Verhaltensrepertoire gehören. Dagegen können sie durch Täuschen Leckerbissen vor ranghöheren Artgenossen verheimlichen.

Alle rezensierten Bücher können Sie in unserem Science-Shop bestellen

direkt bei: www.science-shop.de
per E-Mail: shop@wissenschaft-online.de
telefonisch: 06221 9126-841
per Fax: 06221 9126-869

Der Fleischfresser Mensch ist keine Fehlentwicklung in einer ansonsten anständigen vegetarischen Verwandtschaft. Viele Primaten decken ihren Proteinbedarf durch Insekten. Schimpansen nehmen auch anderes tierisches Eiweiß zu sich – in Form von Affen, die sie gezielt jagen. Freilandforschungen dokumentieren sogar regelrechte Schimpansenkriege: Größere Gruppen rotten ihre zahlenmäßig unterlegenen Nachbarn systematisch aus, indem sie die Männ-

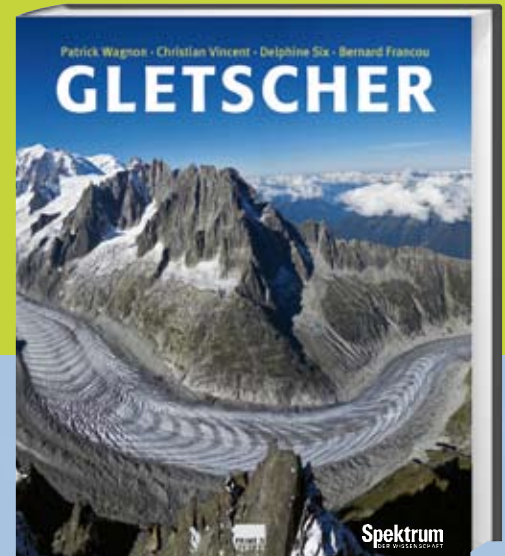
chen töten, die jüngeren Weibchen aufnehmen – und deren Jungen verspeisen, wenn sie nicht zweifelsfrei von einem Vater aus der eigenen Gruppe stammen.

Gibbons verkörperten das Idyll lebenslanger Einehe – bis Sommers Langzeitstudien zeigten, dass das Jungtier in Begleitung eines alten Ehepaares oft nicht deren Junges war, sondern der Seitensprungpartner eines Alttiers. Der Duettgesang eines Gibbonpaares ist keine Schnulze von Liebe und Eintracht, sondern von Betrug und Niedertracht. Die Gesänge testen Seitensprungchancen aus, denn sie verraten die Position von Weibchen und Männchen im Revier.

In den ersten 120 Seiten nimmt Sommer Anlauf zu einem gedanklichen Weitsprung (»Wilde Fragen«), der das restliche Drittel des Buchs einnimmt – und strauchelt über den Absprungbalken. Die drei Themen Theodizee (»Warum lässt Gott so viel Leid in der Welt zu?«), biologisches Artkonzept und Rassismus sprengen den Rahmen des Buchs. Bedauerlich, da Sommer zu allen drei Themen viel zu sagen hat; jedes wäre ein eigenes Buch wert.

So gelingt es ihm nicht, ausreichend Argumente gegen das von ihm angefochtene klassische Artkonzept anzubringen, demzufolge Individuen zur selben Art gehören, wenn sie miteinander unter natürlichen Bedingungen voll fertile Nachkommen zeugen. Auch einen plausiblen Ersatz kann er nicht anbieten.

Von Alaska bis Patagonien, von den Alpen bis zum Himalaja



2008. 152 S. mit ca. 100 Farbfotos, geb. mit SU
€ 39,90 [D]/ sFr 67,00 · ISBN 978-3-89678-381-3

Auf einer Reise rund um die ganze Welt führt dieses Buch tief hinein in die eisige Welt der Gletscher. Erleben Sie die Eiskolosse in ihrer ganzen Majestät in atemberaubenden Fotos, begleitet von Erläuterungen ausgewiesener Fachleute.

»Dieses Buch macht mit seinen großartigen Fotos, mit Grafiken und Texten all das zum Thema: Romantik, Ästhetik, Geschichte und Wissenschaft...« Die Welt

www.primusverlag.de

Sommer schreibt über den biologischen Zweck der Kindstötung und der Vernichtungskriege bei Schimpansen – und bei Menschen rosarotes Multikulti? Seine positiven interkulturellen Erfahrungen seien ihm gegönnt, aber wie steht es um die Hatz Ewiggestriger auf Andershäutige in Sachsen, Krawalle jugendlicher Migranten in Frankreich oder die kulturelle Bereicherung, die uns dekadenten Westlern der islamistische Fundamentalismus mit Koferbomben und Selbstmordattentaten beschert?

Der bekennende Naturschützer Sommer hat kein Problem mit Faunenfälschung und Gentechnik. Spricht aus ihm angelsächsischer Utilitarismus oder aus mir »german angst«, wenn mich das stutzig macht? Sind eingeschleppte Tiere nicht für mehr Ök katastrophen verantwortlich als Urwaldabholzung und Tankerunglücke? Wie viele Landstriche wurden nicht durch Ratten von ihrer einheimischen Kleintierfauna befreit? Wurde Australien nicht von importierten Kaninchen flächendeckend unterhöhlt?

Das äußerst lesenswerte Buch würde in einer Neuauflage durch Präzisierung einiger Details sicher noch attraktiver werden.

Michael Gansera

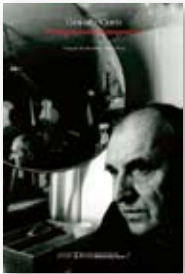
Der Rezensent ist Diplombiologe und freier Journalist in Bochum.

Volker Sommer

Darwinisch denken

Horizonte der Evolutionsbiologie

Hirzel, Stuttgart 2007. 174 Seiten, € 18,-



MATHEMATISCHE KUNST

Ein Künstlerleben für das Dodekaeder

Gerard Caris hat das Potenzial des eckenreichsten platonischen Körpers ausgelotet.

Für den bildenden Künstler ist das Pentagondodekaeder, mehr noch als sein kleiner Bruder, das regelmäßige Fünfeck, eine besondere Herausforderung: Einerseits edel und attraktiv wegen seiner großen Regelmäßigkeit, setzt es andererseits dem Gestaltungswillen erhebliche Widerstände entgegen. Viele gleiche Exemplare aneinandergesetzt lassen zwischen sich unweigerlich Lücken, rechte Winkel kommen nicht vor; der Winkel zwischen zwei benachbarten Dodekaederflächen ist eine so krumme Zahl, dass noch nicht einmal einigermaßen ansehnliche Ringstrukturen zu Stande kommen.

Der niederländische Künstler Gerard Caris, Jahrgang 1925, hat die Herausforderung angenommen. Er setzt zahlreiche Exemplare des sperrigen Körpers Fläche auf Fläche zu einem schlichten Turm oder auch zu einem neckischen Pudel zusammen, fügt sie in ein regelmäßiges dreidimensionales Drahtnetz ein – das geht – und packt sie, so stramm es geht, in gedachte Kisten. Plötzlich weiß das Auge des Betrachters nicht mehr, welche Kanten in dieser Packung vorne und welche hinten liegen; Caris baut diese Zweideutigkeit zu interessanten Vexierbildern auf Basis des Fünfecks aus.

Und dann gibt es doch noch einen Weg, unter Wahrung der Fünfersymmetrie die hartnäckigen Lücken zu vermeiden. In zwei Dimensionen baut man mit den Winkeln des Fünfecks breite und schmale Rauten; die lassen sich lückenlos und sogar ohne

jede Periodizität zu den so genannten Penrose-Mustern zusammenlegen (Spektrum der Wissenschaft 2/2002, S. 64). Das dreidimensionale Gegenstück dazu sind die Penrose-Rhomboeder: verzerrte Würfel, deren Grenzflächen die Penrose-Rauten sind. Auch sie füllen lückenlos und aperiodisch den Raum. Aber wenn derlei Raumfüllungen mit massiven Klötzen ausgeführt werden, verbergen sie das Wesentliche in ihrem Inneren, weswegen man sie viel seltener abgebildet findet als die Penrose-Flächenfüllungen. Caris gelingt es, mit dünnen, scheibenartigen Ausschnitten einer Raumfüllung deren Charme bis zu einem gewissen Grade einzufangen.

Da das vorliegende Buch aus Anlass einer Ausstellung am Zentrum für Kunst und Medientechnologie Karlsruhe erschienen ist, wurde der Bildband mit allerlei Textbeiträgen angereichert. Da haben hochkarätige Wissenschaftler sich richtig Mühe gegeben und doch zum Werk von Caris nichts Wesentliches beigetragen. So bringt der Darmstädter Mathematiker Benno Artmann sehr interessante Dinge über das vierdimensionale Analog des Dodekaeders, das 120-Zell (Spektrum der Wissenschaft 11/2004, S. 101), die Caris durchaus hätten inspirieren können, aber nicht inspiriert haben; und der britische Neurophysiologe Semir Zeki denkt über die neuronalen Mechanismen nach, die jedem Vexierbildeffekt zu Grunde liegen.

Schauen Sie sich lieber die Bilder an.

Christoph Pöppe

Der Rezensent ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

Gerard Caris

Pentagonismus / Pentagonism

Verlag der Buchhandlung Walther König, Köln 2007. 160 Seiten, € 24,80



»Helix 2-2 Branching« von Gerard Caris (2002), Edelstahl

Wissen zahlt sich aus

Spektrum-Jubiläumsrätsel 2008: die Lösungen

Unsere Rätsellöser haben unsere hochgesteckten Erwartungen noch übertroffen! Sie haben nicht nur die Schwierigkeiten bewältigt, die wir mit Absicht in die Lösungstexte eingebaut haben, sondern sich auch von drei Schreibfehlern in den Kästchen für den Lösungstext, für die wir uns vielmals entschuldigen möchten, nicht beeindrucken lassen. (Sie finden unten an den betroffenen Stellen die richtigen Nummern in Rot.) Allen Gewinnern die herzlichsten Glückwünsche!

Lösung aus Heft 09/2008

	K	A		P	S	F									
S	T	R	I	N	G	A	T	R	A	U	M	A	A		
V	I	R	U	S	G	E	T	R	I	E	B	E	N	U	
K	L	A	S	S	E	B	O	E	L	K	S	T	O	F	F
D	E	S	E	L	I	M	I	N	A	T	I	O	N		
R	E	G	U	L	A	E	R	B	U	T	A	N	N	A	
U	N	E	L	A	S	T	I	S	C	H	N	R	A	H	M
A	L	A	N	I	N	T	A	L	O	Z	O	N	M		
F	U	B	A	C	O	A	T	E	D	A	S	I	E	N	
M	I	T	S	C	H	O	L	Z	O	E	R	T	E	R	
L	E	E	R	E	R	I	C	L	A	K	R	I	T	Z	
R	U	B	I	L	D	N	E	U	N	A	U	G	E		
I	M	E	D	A	W	A	R	S	T	N	M	N	U		
V	A	L	I	N	I	D	U	N	A	S	P	O	R	N	
P	A	N	M	U	N	J	O	M	T	R	A	U	B	E	
L	I	E	M	A	K	R	E	L	E	S	P	E	C		
E	Z					N	N	S			L	A			

M U L T I V E R S U M

Lösung aus Heft 10/2008

				A	O				L						
G	E	S	N	E	R	B	I	B	L	I	S	K	I	R	I
E	I	T	E	R	G	E	L	O	T	O	L	O	G	I	E
N	O	A	S	A	U	R	I	D	A	E	O	R	A	T	
E	M	U	L	S	I	O	N	S	F	A	R	B	E	A	
S	E	D	I	M	E	N	T	O	F	F	E	N	S	I	V
M	I	G	E	A	U	R	B	A	N	I	S	M	U	S	S
S	A	C	K	S	S	O	G	A	N	C	A	N	E	A	
M	A	N	D	R	I	L	L	R	I	H	N	R	N	A	
I	N	A	T	U	R	A	I	S	T	A	E	P	O	C	
K	A	U	S	A	L	G	O	F	A	R	N	M	R	I	
R	U	L	C	G	I	A	L	P	E	N	Z	I	A	N	
O	R	C	H	I	D	E	E	N	T	E	E	R	L	G	
	U	B			A						O	N			
	S														

N A V I E R S T O K E S

G L E I C H U N G

GEWONNEN HABEN...

- IM SEPTEMBER: 1. Preis (Fortis Official Cosmonauts Set): Franz Ecker, Freiamt; 2. Preis (Fortis Spacematic): Andreas Eder, Berlin; 3. Preis (H-Racer Set): Sigrid Schweig, Hilden
- IM OKTOBER: 1. Preis: Thomas Sievertsen, Bremen; 2. Preis: Sandra Meier, Hohentengen; 3. Preis: Walter Weute, Bad Hersfeld
- IM NOVEMBER: 1. Preis: Joachim Hradetzky, Freiburg; 2. Preis: Winfrid Weber, Abstatt; 3. Preis: Dr. Gerd Kuhl, Hüttenberg
- GESAMTLÖSUNG: 1. Preis (Reisegutschein): Dr. Wilhelm Kley, Tübingen; Kulturführer: Theresa Schnober, Werdohl; Hans-Georg Kieckhäfer, Idstein; Oliver Wolfgang Fehse, Nürnberg

Lösung aus Heft 11/2008

K	I	N	E	T	A	L	E	K	O	M	I	N	T	E	R	N	G	L
R	N	G	L	U	S	T	G	E	W	I	N	N	A	N	A	E	M	I
A	E	M	I	S	C	H	E	R	O	S	D	A	M	P	F	M	A	S
F	M	A	S	C	H	I	N	E	G	E	I	L	E	N	T	E	S	C
T	E	S	C	H	L	E	U	D	E	R	Z	U	N	G	E	N	S	A
E	N	S	A	L	A	M	A	N	D	E	R	M	E	R	C	R	E	D
C	R	E	D	I	N	A	T	A	M	Y	C	I	N	C	H	I	N	O
H	I	N	O	N	G	N	U	B	I	S	S	N	A	P	S	T	E	R
S	T	E	R	G	E	N	M	U	T	A	T	I	O	N	E	Z	R	A
E	Z	R	A	E	S	T	O	E	R	N	E	U	S	O	N	A	H	C
N	A	H	C	N	H	O	R	R	I	D	U	M	N	E	K	T	A	R
K	T	A	R	I	A	E	A	Z	A	E	D	U	T	T	E	R	L	Y
E	R	L	Y	E	U	L	D	E	R	R	I	D	A	H	R	A	T	L
R	A	T	L	U	N	P	O	L	A	R	N	O	P	E	N	Z	U	G
N	Z	U	G	R	A	E	B	I	G	E	G	T	U	R	K	I	N	E
K	I	N	E	T	A	L	E	K	O	M	I	N	T	E	R	N	G	L
R	N	G	L	U	S	T	G	E	W	I	N	N	A	N	A	E	M	I
A	E	M	I	S	C	H	E	R	O	S	D	A	M	P	F	M	A	S
F	M	A	S	C	H	I	N	E	G	E	I	L	E	N	T	E	S	C

¹¹ S H I M O M U R A C H A L F I E T S I E N

Gesamtlösung

A U F K L A E R U N G I S T D E R A U

¹⁶ S G A N G D E S M E N S C H E N A U S

S E I N E R S E L B ⁶³³ S T V E R S C H U

L D E T E N U N M U E N D I G K E I T

JEAN-FRANÇOIS HOEUVIN

Ein Quantenuniversum, das sich selbst organisiert

Durch Modellierung der Raumzeit als Dreiecksgitter lässt sich eine Theorie der Quantengravitation aufstellen, in der die glatte Struktur des Makrokosmos beim Übergang in den subatomaren Bereich von selbst Fraktalform annimmt

WEITERE THEMEN IM FEBRUAR

Attosekundenblitze

Mittels ultrakurzer und extrem energiereicher Laserpulse verfolgen Forscher die Bewegung einzelner Elektronen in Echtzeit

Nanotechnologie im Auto

Manches ist noch Sciencefiction – doch längst sind viele Anwendungen serienreif

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



Land unter im Rheintal

Beim Ausbruch des Laacher-See-Vulkans vor 12 900 Jahren stauten Glutlawinen den Rhein von Koblenz bis Mannheim. Dann schoss eine zehn Meter hohe Wasserwand durch das Rheintal



Kleines Instrument, ganz groß

Gemessen an den Dimensionen des Stimmapparats sollte eine Sängerin allenfalls mit Piccoloflöten musizieren. Dank nichtlinearer physikalischer Effekte aber übertönt die geschulte Gesangsstimme selbst ein ganzes Orchester