

Spektrum

DER WISSENSCHAFT

PORTRÄT
**RUDOLF
JAENISCH**
Der Mann
am Genschalter

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC
AMERICAN

GRUPPENTHEORIE

Neue Puzzles nach Art des
Rubik-Würfels

GEHIRN

Gibt es Gene für
Intelligenz?

ASTRONOMIE

Neue Teleskope
für Gammastrahlen

Was uns zu Menschen macht

Nur wenige
Gene, aber viel
Müll im Erbgut
unterscheiden
uns vom Affen

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

07/09

JULI 2009

ERDE 3.0

**EIN SONNENSCHIRM
FÜR UNSEREN
PLANETEN?**

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



www.spektrum.de



Reinhard Breuer
Chefredakteur

Geiz verliert, Großzügigkeit gewinnt

Es war rührend anzusehen, wie die Europäische Zentralbank mehrfach den Leitzins senkte, um damit die von ihr Geld beziehenden Banken zu bewegen, ihrerseits mehr Kredite an Firmen und Verbraucher zu vergeben. Die Banken gaben die Zinssenkung aber nicht an ihre Kunden weiter – dumm gelaufen! Stattdessen bettelten Banker wie Politiker im Chor um mehr Vertrauen beim Kunden. Das war verwunderlich, denn die Banken untereinander trauten sich keineswegs über den Weg. Da Banker doch Profis sind, wussten sie aber, was sie taten oder – in diesem Fall – unterließen.

In unserem Essay auf S. 82 berichtet der **Harvard-Biologe Martin A. Nowak** über Verhaltensexperimente, die Forscher mit Probanden durchgeführt haben, um die Wechselbeziehung von Reputation und Großzügigkeit zu untersuchen. Das Ergebnis: Es geht um Vertrauen! Die Logik ist simpel und vertraut – wer großzügig ist, baut einen guten Ruf auf. Wer einen guten Ruf hat, mit dem macht man auch gerne Geschäfte – und verhält sich anderen gegenüber seinerseits generös. Und so wird, jedenfalls in diesen Untersuchungen, Großzügigkeit zum erfolgreichen Geschäftsmodell.

Warum Banken das nicht so machen? Weil sie, vermute ich, lieber an heute denken als an morgen. Banken, die in der Krise ihre Kunden hängen lassen, agieren kurzfristig vernünftig. Allerdings riskieren sie dafür bei dieser Kundschaft mehr Konkurse. Wäre mehr Vertrauen da nicht zukunftsfähiger? Man kann den »systemrelevanten« Zocker-

banken ihr Verhalten aber nicht verdenken, solange sie davon ausgehen können, dass sie mit dem Geld der Steuerzahler vor der Pleite bewahrt werden. Gut, dass es uns gibt!

Es ist schon verblüffend, wie wenig man offenbar wirklich über Intelligenz weiß. Dass sie – ob sie nun als Talent, Kreativität oder in einer anderen Form komplexen Verhaltens auftritt – zum Teil erblich ist, wird kaum jemand bezweifeln; man muss gar nicht erst spezielle Familienhistorien durchforsten, um großes Talent für auch genetisch determiniert zu halten. Aber wo genau sind nun die IQ-Gene in unserem Erbgut verborgen? Oder gibt es sie gar nicht? Es hat mich etwas erstaunt, dass Genforscher bei einer scheinbar so offensichtlichen Tatsache noch nicht fündig geworden sind.

Was also ist »Intelligenz« beziehungsweise das, was mit dem IQ oder ähnlichen Parametern gemessen wird? Offenbar, das verrät jedenfalls unser Bericht des amerikanischen Wissenschaftsautors Carl Zimmer, können wir die Vorstellung als naiv verabschieden, es handle sich dabei um eine Qualität, die sich im Erbmaterial direkt aufspüren ließe. Immerhin sei »Intelligenz eine psychologische Größe, die Vorhersagen erlaubt« (S. 74).

Für die 12. Wunschartikelrunde können Sie wieder aus fünf Kandidaten wählen. Es gibt einen Preis zu gewinnen (www.spektrum.de/artikel/996921)!

Herzlich Ihr

Reinhard Breuer



Zwei neue Spektrum-Sonderhefte sind seit Kurzem auf dem Markt: ein weiterer Beitrag zum Darwin-Jahr mit dem Thema »Wie Darwins Theorie die Welt verändert« und unsere Zusammenstellung neuester Artikel zum Thema Krebs.

64

MENSCH & GEIST
Einfacher Gruppentanz mit Knobelfaktor



28

ASTRONOMIE & PHYSIK
Rätselhafte Botschaft der Gammastrahlen



40

MEDIZIN & BIOLOGIE
Alois Alzheimer (dritter von rechts hinten) mit seinem Team

AKTUELL

12 Spektrogramm

Satt lernt sich's leichter · Der Duft des Lebens · Blutbildung durch Herzschlag u. a.

15 Bild des Monats

Schwäbische Venus

16 Antrieb für Nanoraketen

Wie sich winzige Röhrchen mit Treibstoff aus der Umgebung fortbewegen 🔊

20 Künstliche innere Uhr konstruiert

Forscher erzeugten Taktgeber in Zellen 🔊

21 Das fünfte Element

Exotische Hochdruckform von Bor

22 Was Schnecken linkshändig macht

Für spiegelverkehrtes Gehäuse verantwortliche Gene nachgewiesen 🔊

24 Allergieantikörper gegen Krebs

Was Allergiker peinigt, lässt sich vielleicht gegen Tumoren einsetzen 🔊

25 Pinzette für Moleküle

Das ultimative Feinmechaniker-Werkzeug

27 Springers Einwüfe

Willensfreiheit durch Quanten?

ASTRONOMIE & PHYSIK

28 ▶ Im Bann der kosmischen Beschleuniger

Gammaquanten aus den Tiefen des Alls versprechen Aufklärung über die spektakulärsten Phänomene im Universum. Um sie nachzuweisen, gehen Astronomen höchst trickreich vor

SCHLICHTING!

38 Fällt er oder fällt er nicht?

Ein Trinkhalm im Sprudelglas steigt auf, weil sich kleine Gasblasen an ihn heften

Titelmotiv: Cary Wolinsky

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

MEDIZIN & BIOLOGIE

40 Alzheimerkrankheit – Spurensuche in Kirchenarchiven

Von Familienrecherchen erhoffen sich Mediziner Aufschluss über noch unbekannte Alzheimergene und deren Auswirkungen. Das könnte neue Therapieansätze ermöglichen

48 ▶ Der Mann am Genschalter

Porträt des Molekularbiologen Rudolf Jaenisch, der seit bald 40 Jahren das Verhalten von Viren, Genen und Stammzellen erforscht

TITEL

56 Was uns vom Affen wirklich unterscheidet

Der genetische Unterschied zwischen Mensch und Schimpanse ist erstaunlich gering. Er konzentriert sich auf regulatorische Bereiche im Erbgut, welche die Entwicklung des Gehirns und die Sprachfähigkeit betreffen



TITEL

Evolution des Menschen

56



MENSCH & GEIST
Intelligenz im Gentest

74



84

ERDE & UMWELT
Sonnenschutz wider die Erderwärmung

MENSCH & GEIST

64 ► Knochelei mit einfachen Gruppen
Drei neue Puzzles vom Rubik-Typ bieten die Gelegenheit, sich spielerisch mit einigen der komplexesten mathematischen Objekte vertraut zu machen

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

71 Mathematica fürs Volk
Die neue Version 7 von Stephen Wolframs Software bietet nicht nur Mathematikprofis neue Arbeits- und Spielmöglichkeiten

74 ► Das Versteckspiel der Intelligenz
Zweifellos ist Begabung teilweise erblich. Doch bisher ließen sich keine einschlägigen Gene dafür ausfindig machen. Wie manifestiert sich Intelligenz wirklich?

ESSAY

82 Großzügigkeit macht erfolgreich
Mathematische Modelle enthüllen den Selektionsvorteil uneigennütziger Verhaltensweisen wie Vertrauen und Nachsicht

ERDE & UMWELT

84 ► Ein Sonnenschirm für den Blauen Planeten
Für den Fall, dass es nicht klappt, die globale Erwärmung in den Griff zu bekommen, entwickeln Klimaexperten einen Plan B: eine Abschirmung der Sonneneinstrahlung durch ein Segel im All. Es würde das Problem zwar nicht lösen, aber Zeit verschaffen

TECHNIK & COMPUTER

WISSENSCHAFT IM ALLTAG

94 Alles auf einer Karte
Transistoren, die Kernelemente logischer Schaltungen, erobern die Elektronik als Bausteine der Flash-Speicher in USB-Sticks und Speicherkarten

WISSENSCHAFT & KARRIERE

96 » Entscheidend ist auch, wie die Kosten erstattet werden «
Neuartige diagnostische Testverfahren, um Medikamente gezielter einzusetzen und neue Wirkstoffe effektiver ausfindig zu machen, sind das Ziel des Roche-Wissenschaftlers Andreas Strauss

WEITERE RUBRIKEN

- 3 Editorial: Geiz verliert, Großzügigkeit gewinnt!
- 6 Online-Angebote
- 8 Leserbrief/Impressum
- 70 Im Rückblick
- 106 Vorschau

- 98 Rezensionen:
Dirk H. Lorenzen *Raumlabor Columbus*
Bernulf Kanitscheider *Entzauberte Welt*
Leonard M. Wapner *Aus 1 mach 2*
Sean B. Carroll *Evo Devo*
James Webb *Das Zeitalter des Irrationalen*

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/>



ALEX TAYLOR, UNIVERSITY OF AUCKLAND



RWE E-MOBILITY

SPEKTRUMDIREKT Intelligenter als gedacht

www.spektrumdirekt.de/intelligenzbestien

INTERAKTIV Strom im Tank?

www.spektrum.de/artikel/980524

spektrumdirekt.de

Die Wissenschaftszeitung im Internet

Energie – ein Jahrhundertproblem

Der Energiehunger der Menschheit steigt rapide. Wie kann er gestillt werden? Fossile Brennstoffe gelten als Klimakiller, der Ruf der Atomkraft ist zweifelhaft, alternative Quellen sprudeln noch zu spärlich. »spektrumdirekt« berichtet über aktuelle Probleme und viel versprechende Ansätze

www.spektrumdirekt.de/energie

Intelligenter als gedacht

Ein Blick in die Tierwelt offenbart: Manche ihrer Vertreter – von Neukaledonischen Krähen über Dackel und natürlich bis hin zu Schimpansen – sind zu erstaunlichen kognitiven Leistungen in der Lage

www.spektrumdirekt.de/intelligenzbestien

TIPPS

Nur einen Klick entfernt

Spektrum auf Twitter

Tief gehende wissenschaftliche Einsichten vermitteln wir mit 140 Zeichen nicht – lieber versorgen wir Sie hier mit Links auf Lesenswertes bei uns und anderswo. Beim Zwitschern für den Spektrum-Verlag können Sie seit einigen Wochen Ann-Kristin Ebert und weiteren Kollegen lauschen. Der direkteste Weg führt über

www.spektrum.de/twitter

Was war vor dem Urknall?

Wie sich Martin Bojowald den Ursprung des Universums vorstellt, beschrieb er schon in der Titelgeschichte der Mai-Ausgabe von »Spektrum«. Nun hat Stefan Taube auch das jüngste Buch des Kosmologen rezensiert: »Zurück vor den Urknall« – eine naturwissenschaftlich wie philosophisch anspruchsvolle Unternehmung

www.spektrumdirekt.de/artikel/992842

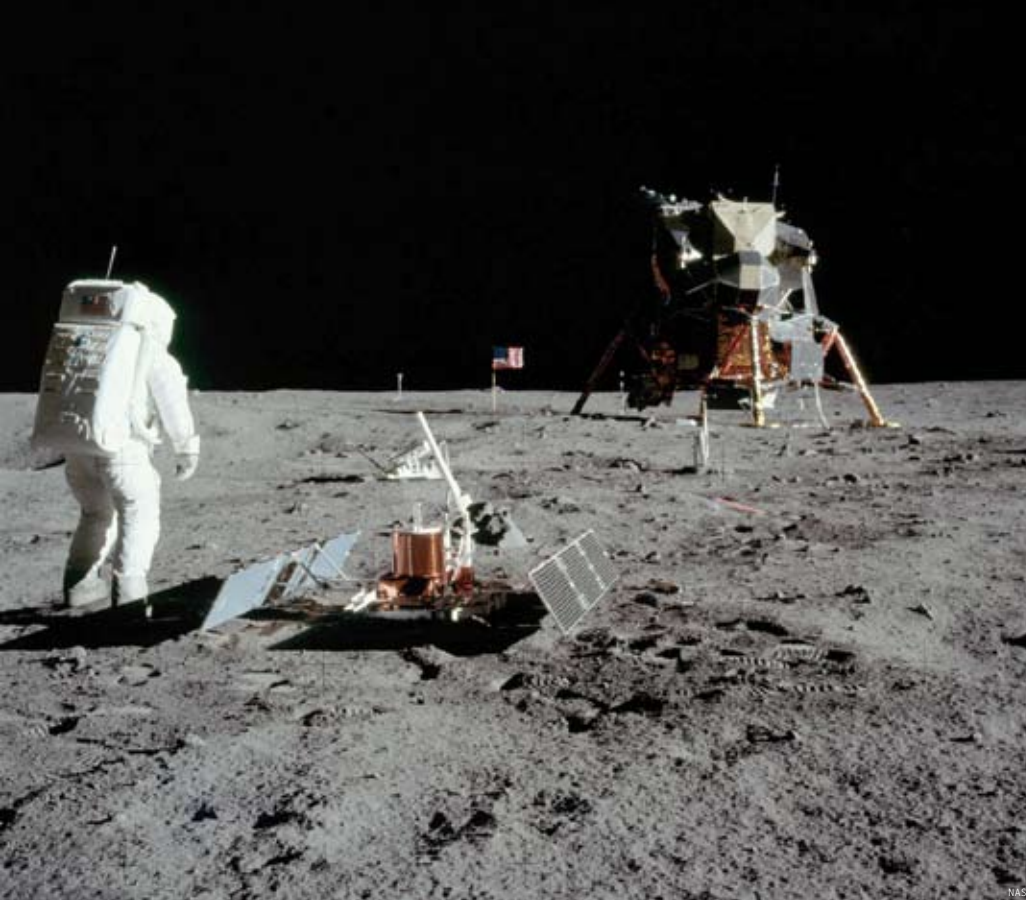
INTERAKTIV

Machen Sie mit!

Strom im Tank? Eine echte Alternative!

Die Online-Umfrage zum Beitrag »Die Zukunft fährt elektrisch« lieferte erstaunlich eindeutige Ergebnisse. Hier stellen wir sie vor. Außerdem haben wir den RWTH-Professor Dirk Uwe Sauer (»Jeder kann selbst überlegen, was er haben will«) ausführlich zur Zukunft der Elektromobilität befragt – das Interview finden Sie ebenfalls unter

www.spektrum.de/artikel/980524



FÜR ABONNENTEN »Apollo 11 auf dem Mond«

www.spektrum-plus.de

FÜR ABONNENTEN

Ihr monatlicher Plus-Artikel
zum Download

»Apollo 11 auf dem Mond«

»Ein kleiner Schritt für einen Menschen – ein riesiger Sprung für die Menschheit.« Dieser Satz des Astronauten Neil Armstrong schrieb vor 40 Jahren Weltgeschichte. Zum ersten Mal betraten Menschen einen fremden Himmelskörper und kehrten sicher zurück

DIESER ARTIKEL IST FÜR ABONNENTEN
FREI ZUGÄNGLICH UNTER

www.spektrum-plus.de



Dieser Artikel ist Teil des umfangreichen Apollo-11-Schwerpunkts der Juli-Ausgabe von **Sterne und Weltraum**. Hier geht es zum Inhaltsverzeichnis:

www.suw-online.de/artikel/992835

FREIGESCHALTET

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

»Wegweiser im Neuro-Dschungel«

Im Zuge des Bologna-Prozesses entstanden an vielen deutschen Universitäten neue, interdisziplinäre Studiengänge im Themenfeld von Gehirn und Geist. Eine Rundreise durch Labors und Seminare

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

www.gehirn-und-geist.de/artikel/996863

»Herschel und Planck – Gipfeltreffen im All«

Eine große Woche für die Astronomie: Mitte Mai startete die ESA ihre Weltraumteleskope Herschel und Planck, Astronauten der NASA vollendeten die Modernisierung von Hubble, und Spitzer beobachtet weiter, trotz leerem Heliumtank

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

www.astronomie-heute.de/artikel/997119



FREIGESCHALTET

»Wegweiser im Neuro-Dschungel«

www.gehirn-und-geist.de/artikel/996863

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

Why are most Nobel Prize Winners males?

Ab sofort sind unsere englischsprachigen Blogs online. Alte Bekannte wie Michael Blume von den Chronologs und Michael Khan von den Kosmologs schreiben in »Biology of Religion« und »Go for Launch«, Sie können aber auch Reinhören in Arvid Leyhs »Braincast«. Neu dabei ist der Politikwissenschaftler Kris Hardies, der an der Free University of Brussels unter anderem die Frage zu beantworten sucht: Why are most Nobel Prize Winners males? Um Raumfahrt und anderes geht es schon bald in »SpaceTimeDreamer«, und Rainer Gerhards blickt in »More than just IT« in die Zukunft der Informationstechnologie

www.scilogs.eu

Nützt oder schadet Gentechnik der Landwirtschaft?

Bodenschutz durch Verzicht auf Pflügen, Mai 2009

Gentechnik für nachhaltigere Landwirtschaft

Ihr hervorragender Artikel zeigt die Vorteile des pflugfreien Anbaus auf: weniger Erosion, Förderung der Bodenlebewesen, besserer Rückhalt des Wassers, massiv weniger Aufwand für die Bodenbearbeitung und so weiter. Allerdings geht das praktisch nur unter Einsatz chemischer Herbizide. Dazu sind herbizidtolerante Sorten von Mais, Soja und Raps mit gentechnischer Züchtung entwickelt worden, die insbesondere in Nord- und Südamerika von großem Nutzen sind, wo sie die empfindlicheren älteren Sorten weitgehend ersetzt haben.

Mit dem Aufkommen der Gentechnik-Pflanzen ab etwa 1998 hat sich der pflugfreie Anbau entsprechend stark ausbreitet. Damit leistet die Gentechnik indirekt einen wichtigen Beitrag zu einer nachhaltigeren Landwirtschaft.

Richard Braun, Bern, Schweiz

Gentechnik schädlich für das Ökosystem

Dass Herr Braun aus Bern gentechnisch veränderte Nutzpflanzen und Totalherbizide als Allheilmittel ins Spiel bringt, ist empörend. Anstatt bereits seit Langem bekannte mechanische Maßnahmen (früher gab es so genannte Hackfrüchte) oder Mulch, Untersaat und so weiter zu nutzen, plädiert er für das die Ökosysteme schädigende System der Gentechnik, dessen einziges Ziel die Mehrung des Profits der Hersteller ist.

Stattdessen sollte man auch über den (Un-)Sinn großflächiger Monokulturen nachdenken, die Schädlingsausbreitung im großen Maßstab erst ermöglichen. Auch hier hat die biologische Landwirtschaft Alternativen anzubieten, die durchaus praktikabel sind.

B. Schupp, Petris, Rumänien

Bildhafte Erklärung

Schattentheater am Himmel
Schlichting!, Mai 2009

Der am Ende des Beitrags erwähnte inverse Strahlenkranz hat mich lange an meinem Verständnis von Optik und

Himmelsmechanik zweifeln lassen: Bei einer Reise durch den Westen der USA sah ich bei einem Sonnenuntergang, dass die Strahlen irritierenderweise in einer Richtung konvergierten, wo gerade keine Sonne sein durfte – im Osten nämlich. Die für mich einfachste bild-

hafte Erklärung: Wenn zwei Flugzeuge genau parallel über uns hinwegfliegen, sehen wir von unten die zwei Kondensstreifen, die jeweils an den Horizonten perspektivisch zusammenlaufen. Dieses beeindruckende Schauspiel ist ab und zu auch in unseren Breiten gut sichtbar, wenn man weiß, wo und wann man auch kurz in die Gegenrichtung des Sonnenunter- oder -aufgangs spähen sollte. Piloten genießen den Anblick sicher häufiger.

Dr. Karl Ulrich Voss, Burscheid



Blick nach Osten ...

... und zur gleichen Zeit nach Westen
bei Tuba City (Arizona), 13. 7. 2007, 20 Uhr

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
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 Könnker, 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: Claus-Peter Sesin, Dr. Sven Titz, Dr. Gerhard Trageser, Dr. Sebastian Vogel.
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: iq media marketing gmbh, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Marianne Dölz; Anzeigenleitung: Jürgen Ochs, Tel. 0211 6188-358, Fax 0211 6188-400; verantwortlich für Anzeigen: Ute Wellmann, Postfach 102663, 40017 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2481, Fax 0211 887-2686
Anzeigenvertretung: Berlin: Michael Seidel, Friedrichstraße 150, 10117 Berlin, Tel. 030 61686-144, Fax 030 61696-145; Hamburg: Matthias Meißner, Brandstüwe 1 / 6, 02045 Hamburg, Tel. 040 30183-210, Fax 040 30183-283; Düsseldorf: Hans-Joachim Beier, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2053, Fax 0211 887-2099; Frankfurt: Thomas Wolter, Eschersheimer Landstraße 50, 60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 2424-4507, Fax 069 2424-4555; Stuttgart: Andreas Vester, Werastraße 23, 70182 Stuttgart, Tel. 0711 22475-21, Fax 0711 22475-49; München: Jörg Bönsch, Nymphenburger Straße 14, 80335 München, Tel. 089 545907-18, Fax 089 545907-24
Druckunterlagen an: iq media marketing gmbh, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. 0211 887-2387, Fax 0211 887-2686
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 30 vom 01.01.2009.
Gesamtherstellung: Vogel Druck- und Medienservice GmbH & Co. KG, 97204 Höchberg

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

Bei jeder autorisierten (oder gesetzlich 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 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN

75 Varick Street, New York, NY 10013-1917
Editor in Chief: John Rennie, Chairperson: Annette Thomas, President: Steven Yee, Vice President: Frances Newburg, International Managing Director: Kevin Hause, Vice President, Finance and General Manager: Michael Florek, Managing Director, Consumer Marketing: Christian Dorbandt, Vice President and Publisher: Bruce Bradford



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



Strom, Benzin, Hybrid?

Elektroautos, April 2009

Die Fakten gehen beim Elektroauto in einem Schwall von Euphorie und Wunschdenken unter: Zwischen Stromspeichermöglichkeit und -notwendigkeit klappt eine Lücke von fast zwei Zehnerpotenzen – und bislang gibt es kaum Ansätze für eine Überbrückung dieser Diskrepanz.

Dr. Siegfried Krüger, Bremen



ALEXEY DUDOLADOV / ISTOCKPHOTO

Verbrennungsmotoren weiterentwickeln

Natürlich ist Forschung am Elektroauto für jeden Automobilhersteller außerordentlich wichtig. Aber die Praxis ist ernüchternd – deshalb ist die Weiterentwicklung des Verbrennungsmotors noch wichtiger. Demnächst wird VW einen neuen Motor vorstellen, der im Polo nur noch 3,2 Liter auf 100 Kilometer verbraucht. Damit ist er in Sachen Verbrauch, Gewicht, Reichweite, Fahrbarkeit und Sicherheit nicht zu schlagen, auch wenn hier mit dem Polit-Schlagwort »Hybrid« nichts zu holen ist. Herrn Löser scheint entgangen zu sein, dass die Mineralöl- und Automobilhersteller synthetische Kraftstoffe entwickelt haben, die nicht in die Nahrungskette eingreifen. Hier liegt die Zukunft des Straßenverkehrs, nicht etwa beim Elektroauto.

Christian Bartsch, Dieburg

Frieren in Elektroautos?

In Ihrem Artikel findet sich nirgends ein Hinweis, wie die Beheizung des Fahrgastraums erfolgen soll. Abwärme steht hier nicht zur Verfügung, Verlustwärme würde ich kaum erwarten. Autos vom Typ des »Opel Ampera« würden sich wegen des ständig und gleichmäßig arbeitenden Nachlademotors gut zur Abwärmenutzung für die Fahrgastzelle eignen, aber seltsamerweise fehlt immer ein Hinweis auf diese Möglichkeit. Und die Heizenergie aus der Batterie zu ziehen und dadurch die Reichweite der Elektroautos zu vermindern, dürfte nicht erstrebenswert sein. Was also soll geschehen, damit wir im Elektroauto nicht frieren müssen?

Hans-Malte Rombrecht, Quernheim

Antwort von Prof. Dirk Uwe Sauer:

Zu diesen Problemen ist in der Tat noch wenig geforscht worden. Heutige

Fahrzeuge sind thermisch gesehen alles andere als optimal: Pro Stunde wird bis zu 30-mal die komplette Innenluft ausgetauscht. Ähnlich wie dies lange Zeit beim Hausbau der Fall war, hat sich über dieses Thema schlicht keiner Gedanken gemacht. Aber das Instrumentarium, das für andere Einsatzzwecke entwickelt wurde, kann man natürlich auch auf das Auto loslassen: thermische Speicher, Fenster mit Beschichtungen, dünne Vakuumisolationselemente, Wärmetauscher und so weiter. Aber selbst bei Batterien und Elektromotoren gehen rund 10 bis 15 Prozent der Energie in Form von Wärme verloren. Daraus ließe sich etwa ein Kilowatt Wärmeleistung gewinnen.

Lesen Sie ein Interview mit Prof. Dirk Uwe Sauer zu »Elektromobilität«:

www.spektrum.de/artikel/997215

Weitere Leserreaktionen unter:

www.spektrum.de/artikel/983274

Turbulenzen um die Fluidmechanik

Zum Widerstand bei turbulenter Umströmung, April 2009

Auf S. 85 schreibt der Autor, dass turbulente Strömungen weniger Widerstand erzeugen als laminare. Diese Aussage trifft nur dann zu, wenn eine Ablösung und dadurch ein erhöhter Druckwiderstand auftritt. Die turbulente Grenzschicht kann der Kontur bei positivem Druckgradienten länger folgen als eine laminare, dadurch wird der Ablösepunkt nach hinten verschoben, der Druckrückgewinn verbessert und der Widerstand reduziert. Beispiele sind die erwähnten Golfbälle und Motorradhelme.

Bei anliegenden Strömungen wird hingegen versucht, die Grenzschicht laminar zu halten und so den Widerstand zu reduzieren. Eine Möglichkeit hierzu bieten zum Beispiel der Haihaut nachempfundene so genannte Riblets.

Tobias Winnemöller, Aachen

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:

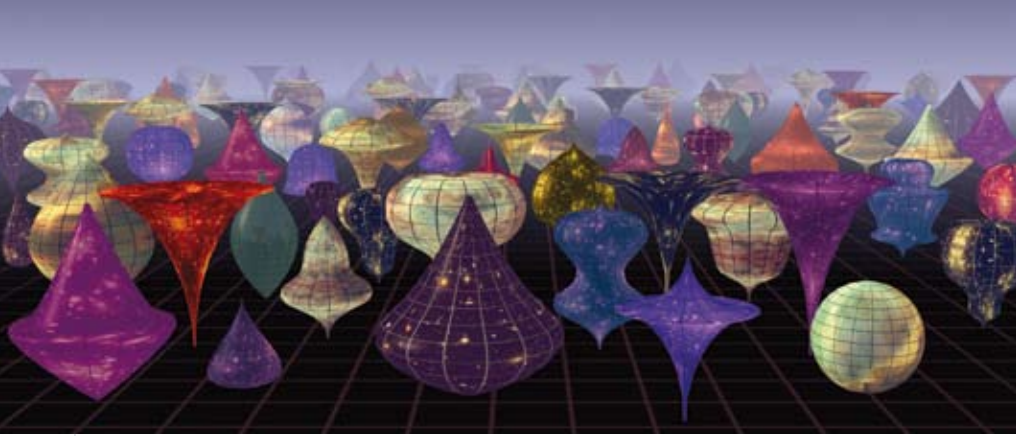
Spektrum der Wissenschaft

Redaktion Leserbriefe

Postfach 10 48 40

69038 Heidelberg (Deutschland)

E-Mail: leserbriefe@spektrum.com



REKSTOR REBE

Die Stringtheorie und das anthropische Prinzip

Ist die Stringtheorie noch eine Wissenschaft?, Mai 2009

Logisch unzulässig

Das »Prinzip« besteht aus dem Antezedens A »Das von uns beobachtete Universum ist für die Entwicklung intelligenten Lebens geeignet« und dem Konsequens B »Wir existieren, um das Universum zu beobachten«.

Das anthropische Prinzip schließt nun vom Konsequens zurück auf das Antezedens: Weil wir die Welt beobachten, muss ein Element im Beobachteten für die Entwicklung des Beobachters »geeignet« sein. Ist dies aber logisch zulässig?

Gemäß der Wahrheitstafel der Konditionalsätze folgt aus einem wahren Antezedens (etwa der empirisch überprüften Tatsache: Es regnet) das wahre Konsequens (etwa: Die Straße ist nass); dieser Schluss ist nach der Definition der als Implikation bezeichneten Folge zweier Sätze wahr.

Falsch aber ist nach ebenderselben Wahrheitstafel die Folge der Sätze: Aus einer wahren Feststellung (die Straße ist nass), als Konsequens gesetzt, folgt ein als früher angenommenes wahres Antezedens (es hat geregnet).

Dieser – logische – »Rück«-Schluss von einem Sachverhalt auf einen ihn bedingenden Grund ist unzulässig. Es hätte auch etwas anderes als Regen, zum Beispiel ein Wasserrohrbruch, die Straße überschwemmen können.

Folglich: Wenn wir das Universum beobachten können, besagt das über ein unsere Beobachtungsfähigkeit bedingendes Universum gar nichts. Aus der Tatsache, dass wir die Fähigkeit haben, das Universum zu beobachten, lässt sich weder eine Aussage deduzieren, wie sein früherer Zustand beschaffen gewesen sein müsse, noch überhaupt eine Aussage über die Existenz eines vorausgehenden Zustands.

Peter Kühn, Bremen

Unwissenschaftlich

Trotz seines vorsichtigen Umgangs mit dem anthropischen Prinzip kann Professor Lüst nicht darüber hinwegtäuschen, dass das anthropische Prinzip absolut unwissenschaftlich ist: Die fein abgestimmten Naturkonstanten ermöglichen Leben – aber aus dieser Existenz des Lebens lassen sich keine Naturkonstanten ableiten, denn diese waren zuerst da. Woher die Feinabstimmung der Naturkonstanten kommt, ist eine andere Frage.

Klaus Teutenberg, Lindlar

Nicht ausreichend als Erklärung

Es mag zwar sein, dass kleine Änderungen an Naturkonstanten die Entstehung des Lebens verhindert hätten. Daraus folgt jedoch nicht, dass dies auch für große Änderungen gilt. Schon von längerer Zeit habe ich dazu im »New Scientist« von zwei Untersuchungen gelesen.

In der ersten wurde im Computer eine der vier Fundamentalkräfte, die schwache Wechselwirkung, »ausgeknipst«. Dazu mussten eine ganze Reihe von Naturkonstanten geändert werden. Das damit berechnete Universum sah deutlich anders aus als unseres, weil unter anderem bestimmte Sorten von Sternen nicht entstehen konnten. Der »ursprüngliche« Weg zur Entstehung des Lebens war ebenfalls »verbaut«, aber es gab stattdessen andere Prozesse, die eine Entstehung des Lebens ermöglichten.

In der zweiten Simulation wurden einzelne Naturkonstanten nicht um kleine Beträge modifiziert, sondern beispielsweise gleich um den Faktor 10. Auch hierbei gab es eine Reihe von Konstellationen, bei denen die Entstehung des Lebens ebenfalls möglich war. Da in dieser Arbeit nur ein winzig kleiner Ausschnitt des Konfigurationsraums untersucht wurde, muss man damit rechnen,

dass es noch weitere »Treffer« bei anderen Kombinationen gibt.

Die Frage danach, warum die beobachteten Naturkonstanten exakt die Werte haben, die wir kennen, wartet damit weiterhin auf eine Erklärung. Nach den oben genannten Untersuchungen reicht das von Herrn Lüst ins Spiel gebrachte anthropische Prinzip jedenfalls nicht als Erklärung aus.

Jörg Michael, Hannover

Antwort des Autors Prof. Dieter Lüst:

Man sollte das anthropische Prinzip immer mit der gebotenen Vorsicht behandeln. Herr Michael hat Recht, es gibt unter Umständen noch andere denkbare Universen, die auch intelligentes Leben, also Beobachter zulassen.

Zum Beispiel wird dies in einer Arbeit von Anthony Aguirre aus dem Jahr 2001 erklärt, »The Cold Big-Bang Cosmology as a Counter-Example to Several Anthropic Arguments«. Der Autor gibt hier Gründe dafür an, dass menschliches Leben auch nach einem »kalten« Big Bang entstanden sein könnte (die meisten Kosmologen gehen hingegen von einer extrem heißen »Ursuppe« und entsprechend unterschiedlichen Folgeprozessen aus, *Anm. d. Red.*).

Ich will das gar nicht ausschließen. Interessanterweise aber gibt derselbe Autor zusammen mit Max Tegmark, Martin Rees (einem der Urväter der anthropischen Idee) und Frank Wilczek (Nobelpreis im Jahr 2004 für die Entdeckung der asymptotischen Freiheit in der starken Wechselwirkung) in einer weiteren Arbeit aus dem Jahr 2005, »Dimensionless Constants, Cosmology and Other Dark Matters«, sehr starke Argumente für das anthropische Prinzip, die mit der Häufigkeit von Dunkler Materie und so genannten Axionen zu tun haben.

Ich bin auch der Meinung, dass das anthropische Prinzip nicht unbedingt vollkommen eindeutig sein muss. Es reicht aus, dass es in einer Vielzahl von Möglichkeiten einige wenige bevorzugte Szenarien gibt. Man sieht also, die Sache ist noch offen für weitere Debatten, Diskussionen und wissenschaftliche Untersuchungen.

Die ganze Antwort und weitere Leserreaktionen: www.spektrum.de/artikel/987526

ÖKOLOGIE

Artenschwund durch Lichtmangel

■ Urbanisierung und moderne Landwirtschaft lassen kaum noch Platz für seltene Pflanzen und Tiere. Besonders groß ist der Artenschwund in den Wiesen. Längst steht fest, dass dies an der Düngung liegt; denn intensiv gedüngte, nährstoffreiche Fettwiesen sind viel artenärmer als naturbelassene Magerrasen. Doch der zu Grunde liegende Verdrängungsmechanismus war bisher umstritten. Jetzt konnten ihn Wissenschaftler von Universität und ETH Zürich definitiv ermitteln.

Demnach ist der Wettbewerb um das Licht der entscheidende Faktor. Vom hohen Nährstoffangebot profitieren vor allem die schnell wachsenden Pflanzen: Sie wuchern und beschatten den Boden. Damit entziehen sie den langsam wachsenden Konkurrenten das Licht als Lebens-



In diesen Kästen verhin- derte künstliche Beleuch- tung von unten eine Ab- nahme der Biodiversität. Demnach sorgt Lichtmangel für die Verarmung von überdüngten Wiesen.

YANN HAUTIER, UNIVERSITÄT ZÜRICH

grundlage. Der Wettbewerb um Nährstoffe spielt dagegen keine nennenswerte Rolle. Das zeigten Yann Hautier und seine Kollegen in Gewächshausversuchen, bei denen sie den Unterwuchs künstlich beleuchteten. In diesem Fall konnte sich auch die sonst überwucherte Vegetation behaupten.

»Unsere Untersuchungen legen Konsequenzen für das Management von Grasland und für die Methoden der nachhaltigen Bewirtschaftung nahe«, erklären die Autoren. In jedem Fall gelte es, den Nährstoffeintrag zu begrenzen, »wenn die Pflanzenvielfalt geschützt werden soll«.

Science, Bd. 324, S. 636

WERKSTOFFE

Molekularsieb mit XXL-Poren

■ Die guten ins Töpfchen, die schlechten ins Kröpfchen – bei erbsengroßen Gegenständen mag diese Scheidung noch visuell möglich sein. Geht es jedoch um Sortier- und Trennungsvorgänge auf molekularer

Die Zeichnung der Molekülstruktur des neuen Zeolithen ITQ-37 zeigt einen Blick in seine riesigen Poren.

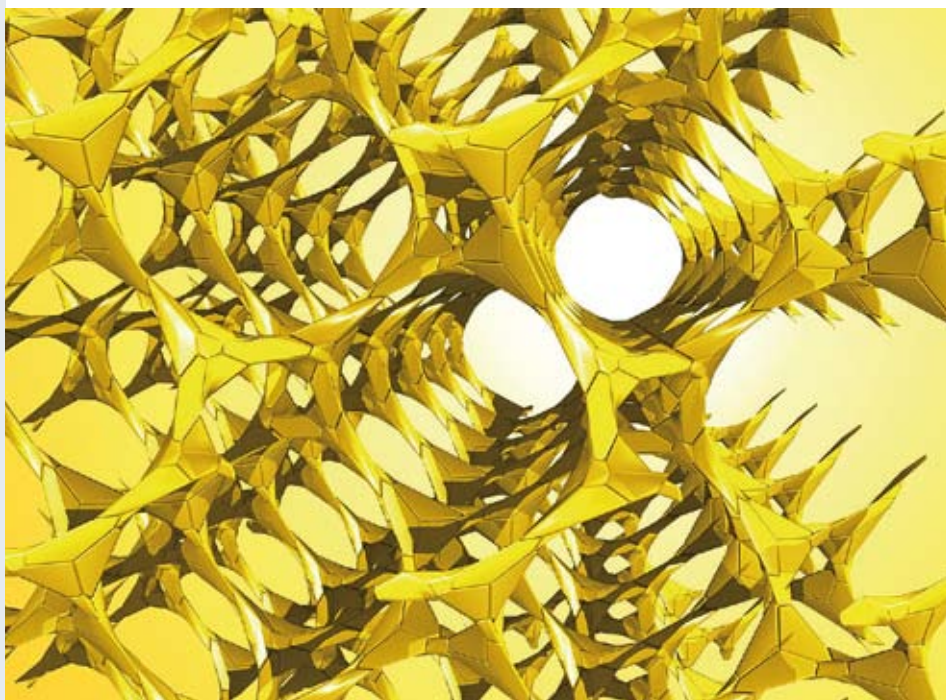
Ebene, sind raffiniertere Verfahren vonnöten. Wissenschaftler von der Universität Stockholm haben die Palette der dazu geeigneten Werkzeuge nun um ein Molekularsieb mit bisher unerreichter Porenweite ergänzt. Die ITQ-37 genannte Substanz dürfte neue Möglichkeiten bei der Stofftrennung von größeren Molekülen eröffnen.

Natürliches Vorbild waren die Zeolithe: eine große, vielgestaltige Gruppe von

Mineralen, die zu den Aluminosilikaten, den siliziumhaltigen Hauptbestandteilen des normalen Erdreichs, gehören. Sie sind regelrecht von Kanälen und Hohlräumen durchsetzt. Man kann auch künstliche Varianten davon herstellen. Die Porengröße hängt dann von den Ausgangsstoffen und dem Verfahren ab.

Xiaodong Zou und seine Kollegen führten eine zusätzliche Stellschraube ein, indem sie einen Teil des Siliziums durch Germanium ersetzten. Dieses Element steht im Periodensystem in der gleichen Gruppe eine Reihe tiefer. Es ähnelt in seinen chemischen Eigenschaften deshalb dem Silizium, ist jedoch schwerer und größer. Die Forscher erhielten durch ihren Kunstgriff einen Kristall mit Kanälen, deren Umriss von 30 Germanium- und Siliziumatomen gebildet wird, die durch einzelne Sauerstoffatome verbunden sind. Die Poren erreichen dadurch an der breitesten Stelle eine Weite von etwa zwei Nanometern – absoluter Rekord. Das eröffnet neue Möglichkeiten für die Trennung und katalytische Umsetzung von Molekülen dieser Größe, die in bisherige Zeolithe nicht eindringen konnten.

Nature, Bd. 458, S. 1154



CHARLOTTE BONNEAU UND TOM WILLHAMMAR, STOCKHOLMS UNIVERSITÄT

INSEKTENKUNDE

Der Duft des Lebens

■ Nicht nur wir Menschen bestatten aus Pietät und Hygienegründen unsere verstorbenen Angehörigen. Auch Staaten bildende Insekten wie die Ameisen befördern, um das Nest sauber zu halten, ihre verblichenen Mitbewohner auf die Müllhalde – ein Verhalten, das als Nekrophorese bezeichnet wird. Doch wie stellen sie das Ableben fest? Schließlich haben sie keine Ärzte, die einen offiziellen Totenschein ausfertigen. Man könnte denken, sie merken es schlicht,

wenn die Leiche nach Verwesung riecht, und schaffen sie dann weg. Doch das wäre für die Nesthygiene zu spät.

Deshalb machen es die Insekten genau umgekehrt: Wie Entomologen der University of California in Riverside nun herausgefunden haben, räumen sie einfach alles weg, was sich nicht als lebendig zu erkennen gibt. Als Ausweis für das Nichtgestorbensein muss jedes Tier, das diesem Schicksal entgehen will, einen bestimmten Duft verströmen. Er besteht aus den Substanzen Dolichodial und Iridomyrmecin, die zu den ätherischen Ölen zählen und am Hinterleib der Ameisen ständig produziert werden. Nach dem Tod eines Tiers verflüchtigt sich das Parfum, wie



Eine Ameise schafft einen toten Nestgenossen weg.

DONG-HWAN CHOE, UC RIVERSIDE

Dong-Hwan Choe und Kollegen ermittelten, in weniger als einer Stunde.

Zum Beweis ihres Befunds besprühten die Forscher gestorbene Ameisen mit den beiden Duftstoffen. Daraufhin blieben die Kadaver unbehelligt.

PNAS, Bd. 106, S. 8251

NEUROBIOLOGIE

Satt lernt sich's leichter

■ Nach einem opulenten Mittagessen erscheint jeder Gedanke als große Anstrengung, und manchmal hilft nur ein kleines Nickerchen, um aus dem mentalen Tief wieder herauszukommen. Leichte Kost über den Tag verteilt gilt deshalb als Geheimtipp gegen Abgeschlagenheit. Doch im Widerspruch zu dieser Alltagserfahrung haben Wissenschaftler an der University of California in Irvine nun festgestellt, dass Ratten mit einem Sättigungsgefühl wesentlich bessere Gedächtnisleistungen erbringen als hungrige Tiere.

Die Nager fanden sich in einem Labyrinth schneller zurecht, wenn Daniele

Piomelli und seine Kollegen ihnen nach der jeweiligen Trainingseinheit Oleoylethanolamid (OEA) injizierten. Dieses körpereigene Hormon wird normalerweise freigesetzt, sobald Fette in den Dünndarm gelangen. Es meldet die Nahrungsaufnahme an das zentrale Nervensystem und führt über Wechselwirkungen mit diversen Rezeptoren zu einem Sättigungsgefühl.

Die Forscher konnten auch genauer ermitteln, wie das geschieht, indem sie bekannte Hemmstoffe in bestimmte Hirnregionen spritzten und prüften, ob der gedächtnisfördernde Effekt verloren ging. Demnach prägen sich die Ratten Erinne-

rungen im satten Zustand über den gleichen Mechanismus besonders gut ein wie nach einer aufregenden Erfahrung. In beiden Fällen spielt der so genannte Mandelkern eine wichtige Rolle, der für die Verarbeitung von Emotionen von zentraler Bedeutung ist.

Dass Ratten nach einer Mahlzeit eine größere Merkfähigkeit haben, erscheint durchaus sinnvoll; denn es hilft ihnen, sich die Wege, Risiken und Hindernisse auf der Nahrungssuche einzuprägen, damit sie ergiebige Futterstellen auch später wieder auffinden können.

PNAS, Bd. 106, S. 8027

ASTRONOMIE

Frühester Gammablitz registriert

■ Am 23. April registrierte der NASA-Satellit Swift einen hellen Gammastrahlungsblick. Seine Alarmmeldung veranlasste Forscher auf dem gesamten Planeten, ihre Teleskope unverzüglich auf die Quelle zu richten. Der Ausbruch hochenergetischer Strahlung selbst dauerte zwar nur etwa zehn Sekunden. Doch sein Nachleuchten im Sternbild Löwe hielt viele Stunden an, und die dabei registrierte elektromagnetische Strahlung barg sensationelle Informationen. Demnach hatte sich der Ausbruch vor mehr als 13 Milliarden Jahren ereignet, als das Universum erst 630 Millionen Jahre alt war. Ursache des Ereignisses, das nach seinem Datum GRB 090423

genannt wurde, war vermutlich der Kollaps eines sehr massereichen frühen Sterns.

Jochen Greiner und seine Kollegen vom Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik analysierten die Daten des Detektors GROND, der am Teleskop auf dem La-Silla-Observatorium in Chile montiert ist. So konnten sie die Rotverschiebung der empfangenen Strahlung bestimmen. Diese Größe ist, da sich das Universum ausdehnt, umso höher, je früher ein Ereignis stattgefunden hat. Im Fall von GRB 090423 betrug sie etwa 8. Messungen mit anderen Teleskopen bestätigten diesen Wert.

Damit ist GRB 090423 der älteste und fernste je beobachtete Gammastrahlungs-

Die Zeichnung illustriert die Abstrahlung eines Gammablitzes durch einen kollabierenden Stern.

blitz. Er stellte den bisherigen Rekordhalter GRB 080913 nach lediglich sieben Monaten in den Schatten. Dieser hatte mit einer Rotverschiebung von »nur« 6,7 einen Blick 12,8 Milliarden Jahre zurück in die Geschichte des Alls gestattet.

MPG-Pressemitteilung



DIJANA IVEREIGH / ARKENAS

PALÄANTHROPOLOGIE

Von Kopf bis Fuß ein Hobbit

■ Im Jahr 2003 entdeckten Forscher in einer Kalksteinhöhle auf der indonesischen Insel Flores die Skelettreste eines nur knapp einen Meter großen menschenähnlichen Wesens, das dort vor etwa 18 000 Jahren gelebt hatte. Sie interpretierten den Fund als Abkömmling des *Homo erectus*, der sich als Anpassung an den kleinen Lebensraum zu einer Zwergform entwickelt habe, was auch von vielen Tierarten als Inselverzweigung bekannt ist. Tolkienfans gaben dem offiziell *Homo floresiensis* benannten Wesen den Spitznamen Hobbit.

Andere Forscher bestritten jedoch diese Deutung und sahen in dem weiblichen Fossil einen modernen Menschen, der unter Mikroenzephalie litt: einer Entwicklungsstörung, die mit Zwergwuchs und einem stark verkleinerten Gehirn einhergeht. Nun haben gleich zwei Forschergruppen mit

Im Fuß von *Homo floresiensis* steht die große Zehe parallel zu den anderen und ist nicht abgewinkelt wie bei den Affen.

neuen Untersuchungen die Hobbit-Theorie untermauert.

Eleanor M. Weston und Adrian M. Lister vom Natural History Museum in London verglichen die Reduktion der Hirnmasse bei kleinen Nilpferden auf Madagaskar als Folge der Inselverzweigung mit den Befunden beim Flores-Fossil. Demnach ist die Größenrelation zwischen Festland- und Inselbewohnern in beiden Fällen ähnlich. Das spricht für die Abstammung des Flores-Wesens von einem Frühmenschen. Ein Team um M. J. Morwood von der Stony Brook University (New York) stellte am linken Fuß des Fossils fest, dass die große Zehe parallel zu den anderen steht und nicht abgewinkelt ist wie bei den Affen. Allerdings ist der Fuß im Verhältnis zu Ober- und Unterschenkel sehr viel länger als beim Menschen. Morwood und seine Kollegen bezweifeln deshalb sogar die Abstammung des Flores-Wesens vom *Homo erectus*. Vielmehr müsse es einen primitiveren Vorfahren geben, dessen Ausbreitung in Asien bisher nicht dokumentiert ist.

Nature, Bd. 459, S. 81 und S. 85

ZOOLOGIE

Giftige Drachen

■ Unter den Tieren, denen das Attribut »Drachen« zugeschrieben wird, trägt es der Komodowaran mit Sicherheit zu Recht. Der exzellente Jäger mit seinem Schuppenpanzer, langen Schwanz und messerscharfen Gebiss speit zwar kein Feuer, um seine Beute zu erlegen, doch als todsicheres Mittel injiziert er hochwirksames Gift in die Bisswunde seines Opfers. Das haben jetzt Wissenschaftler von der University of Melbourne (Australien) nachgewiesen.

Janette A. Norman und ihre Kollegen untersuchten das Gebiss von *Varanus komodoensis* per Magnetresonanztomogra-

fie. Dabei entdeckten sie entlang dem Unterkiefer eine ganze Reihe von Drüsen, die sich über Kanäle fortsetzen und zwischen den scharfen Zähnen enden. In diesem Gewebe ließ sich massenspektrometrisch ein Mix aus fünf toxischen Proteinen nachweisen, die den Blutdruck senken, die Gefäße weiten und den Wundverschluss verhindern. Das dadurch in Schockstarre versetzte Opfer verblutet in einem Dämmerzustand, was auch Berichte von Augenzeugen bestätigen.

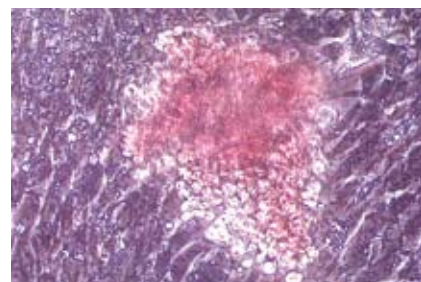
Zugleich widerlegt die Untersuchung die alte These, dass beim Biss übertragene Krankheitskeime für den Tod der Beute verantwortlich sind. Die Wissenschaftler konnten keine pathogenen Bakterien im Rachen der Echsen finden. Ein Vergleich mit dem australischen Salzwasserkrokodil *Crocodylus porosus* zeigte außerdem, dass der Waran mit seinem relativ schwachen Biss dem Beutetier keine tödliche Verletzung zufügen kann. Allerdings vermag sein Kiefer hohe Zugkräfte auszuhalten, so dass das Beutetier beim Versuch, sich loszureißen, seine Wunden vergrößert und mehr Gift aufnimmt.

PNAS, Online-Vorabveröffentlichung

EMBRYONALENTWICKLUNG

Blutbildung durch Herzschlag

■ Embryonale Stammzellen brauchen für die Differenzierung – also die Verwandlung in Bestandteile verschiedener Gewebetypen – geeignete Informationen und Signale. Sie müssen diese Botschaften erkennen und in Regelkreise für die Aktivierung von Genen integrieren, um als Reaktion darauf spezifische Strukturen und Eigenschaften auszubilden. Dabei können selbst mechanische Reize als Auslöser dienen. So haben Wissenschaftler um George Q. Daley vom Children's Hospital in Boston (Massachusetts) nun gezeigt, dass es der vom Herzen erzeugte Blutstrom ist, der durch Scherkräfte an den Wänden der Blutgefäße noch undifferenzierten Zellen die Botschaft übermittelt: Eure Aufgabe ist die Hämatopoese, die Produktion von Blut.



LUIGI ADAMO UND GUILLERMO GARETAL-CARBERA, HARVARD MEDICAL SCHOOL BOSTON

Die roten Blutzellen in dieser Kolonie entwickelten sich aus Stammzellen, die einem Flüssigkeitsstrom ausgesetzt waren.

In ihren Experimenten setzten Daley und seine Kollegen embryonale Stammzellen von Mäusen auf Nährstoffplatten einem künstlich erzeugten Flüssigkeitsstrom aus. Dieser ähnelte in seiner Intensität dem natürlichen Blutstrom. Die Zellen wandelten sich daraufhin zu einem höheren Prozentsatz in Blutzellen, als wenn sie keinem mechanischen Scherstress ausgesetzt waren. Zudem ließen sich verstärkt Markerproteine wie Runx1, Myb und Klf2 nachweisen, die charakteristisch für Blut bildendes Gewebe sind.

In einem Kontrollversuch hemmten die Forscher die Produktion von Stickoxid, das als Signalstoff für die Übermittlung von mechanischen Reizen bekannt ist. Daraufhin unterblieb die gesteigerte Produktion von Blutzellen im Flüssigkeitsstrom – ein klarer Beleg für die Scherkräfte als Auslöser der Hämatopoese.

Nature, Online-Vorabveröffentlichung



CHRIS KIEGELMANN

Stolz posiert dieser Komodowaran neben seiner Beute.


Schwäbische Venus

Mit ihren Reizen reizt die Dame nicht gerade, deren Elfenbeinskulptur Archäologen um Nicholas Conard von der Universität Tübingen nun in der Höhle »Hohle Fels« bei Schelklingen auf der Schwäbischen Alb entdeckt haben. Mit ausladenden, hoch aufragenden Brüsten, einem akzentuierten Po und überdimensionaler Vulva diente die mindestens 35000 Jahre alte Figur wohl als Fruchtbarkeitssymbol. Mehrere tief eingeschnittene waagrechte Linien ziehen sich über ihren Unterleib bis zum Rücken und symbolisieren vermutlich eine Art Schurz.

Statt des Kopfes saß auf den Schultern ein inzwischen verwitterter Ring zum Befestigen an einem Band oder Gürtel.

Die sechs Zentimeter große Skulptur war in sechs Stücke zerbrochen, ist aber fast vollständig erhalten – nur links fehlen Oberarm und Schulter. Der Sensationsfund beweist, dass altsteinzeitliche Künstler sich der figürlichen Darstellung von Menschen früher widmeten als bisher gedacht. Eine vergleichbar bedeutende Venusfigur, die 1908 im österreichischen Willendorf entdeckt worden war, ist nur rund 27000 Jahre alt.



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

Antrieb für Nanoraketen

Wie man winzige Röhren aus dünnen Schichten, die sich selbst aufrollen, dazu bringen kann, ohne mitgeführten Treibstoff durchs Wasser zu sausen

Von Oliver G. Schmidt

Der Traum von winzigen U-Booten, die durch unsere Adern fahren, begeistert spätestens seit den Filmen »Die phantastische Reise« (1966) und »Die Reise ins Ich« (1987) Liebhaber der Sciencefiction. Doch mit dem Thema beschäftigt sich auch eine wachsende Schar von Wissenschaftlern weltweit; auch sie fasziniert die Vision, durch winzige Maschinen gezielt Medikamente im menschlichen Körper verteilen zu können oder Krankheitserreger zu bekämpfen. Die Natur verfügt bereits über solche Nanomaschinen. Sie heißen Viren oder Bakterien und können sich hervorragend durch Wasser bewegen. Aber wie realistisch sind künstliche Minifahrzeuge, die durch Flüssigkeiten schwimmen und sich gar steuern lassen?

Große Schiffe werden am Reißbrett konstruiert, im Dock gefertigt und dann zu Wasser gelassen. Auf die Mikro- oder Nanowelt lässt sich diese Vorgehensweise jedoch nicht einfach übertragen; denn dort gibt es kaum Werkzeuge, mit denen man schweißen, fräsen, drehen oder hämmern könnte. Deshalb gilt es, die

ureigensten Mechanismen im Mikro- und Nanokosmos zu nutzen, um dreidimensionale Architekturen mit komplexer Funktion zu schaffen.

Die Herstellung eines winzigen Zylinders mag das verdeutlichen. Eine elegante Möglichkeit besteht darin, auf einem Substrat drei hauchdünne Schichten aus unterschiedlichen Materialien anzubringen, wobei die zwei oberen gegeneinander verspannt sind. Löst man diese nun ab, indem man die Lage darunter von der Seite nach und nach entfernt, rollen sie sich automatisch auf. Dabei verrichten sie ein gutes Stück komplizierter Arbeit ganz von selbst, die sonst für das Herausdrehen oder Fräsen eines Hohlzylinders – nötig wäre.

Derartige selbstorganisierende Prozesse spielen auf kleinen Längenskalen eine sehr wichtige Rolle. In unserem Fall erübrigt sich auch eine Schweißnaht zur Befestigung benachbarter Wicklungen. Diese kleben auf Grund der Bindungskräfte zwischen den Atomen gleichsam von selbst zusammen.

Der Durchmesser der Röhren hängt von der Dicke der Schichten, der einge-

bauten Verspannung zwischen ihnen und der Elastizität der Materialien ab. Durch Variation dieser Parameter sind Werte von wenigen Nanometern bis zu Hunderten von Mikrometern realisierbar. Die Möglichkeit, den Durchmesser über viele Größenordnungen zu variieren, ist einzigartig und macht die Röhren vielseitig nutzbar. Zudem lässt sich das Aufrollprinzip auf fast beliebige Kombinationen von Materialien anwenden.

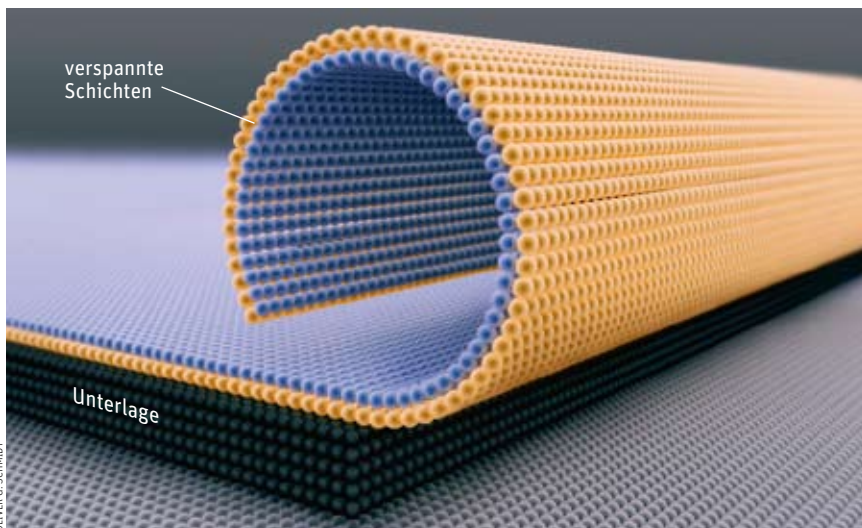
In meiner Arbeitsgruppe haben wir auf diese Weise beispielsweise Röhren erzeugt, deren innere Schicht aus Silber besteht. Das Edelmetall ist katalytisch aktiv, kann also chemische Reaktionen stark beschleunigen. Das aber lässt sich für einen Antriebsmechanismus nutzen, der das Röhren in eine winzige Rakete verwandelt (*Advanced Materials*, Bd. 20, S. 4085). Wenn die Silberoberfläche beispielsweise mit Wasserstoffperoxid in Berührung kommt, bewirkt sie, dass es sich zersetzt. Dabei entstehen winzige Sauerstoffblasen, die aus dem Röhren ausgestoßen werden. Sofern dieses sich zum einen Ende hin verengt, entweicht das Gas auf der anderen Seite. Mit seinem Rückstoß beschleunigt es das Röhren dann ähnlich einem Düsentriebwerk in die entgegengesetzte Richtung (*Small, im Druck*). Es fungiert also gewissermaßen als Mikrojet.

Umgebung als Treibstoffquelle

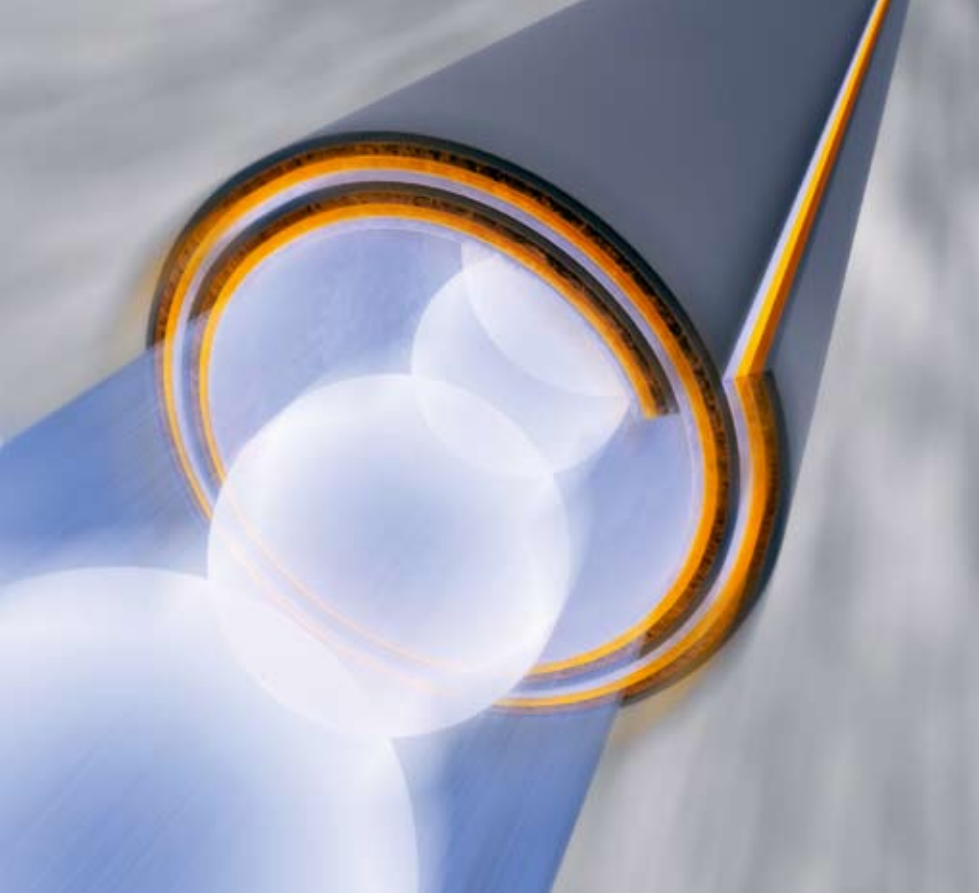
Man beachte, dass dieses Mini-U-Boot den Treibstoff nicht an Bord mitführen muss, sondern aus der Umgebung entnimmt. Das scheint mir ein wichtiger Vorteil, wenn solche Nanomaschinen im Körper Krankheiten bekämpfen oder Aufräumarbeiten erledigen sollen. Da wäre es ungeschickt, wenn sie einen schweren Tank mit Treibstoff mitschleppen müssten, dessen Vorrat zudem nicht lange reicht. Im menschlichen Körper könnte man das Wasserstoffperoxid lokal mit Hilfe des Enzyms Glukose-Oxidase, das an der Innenwand des Röhrens angebracht würde, aus der in der Blutbahn vorhandenen Glukose herstellen.

Natürlich stellt sich sofort die Frage, wie sich die Bewegung von so kleinen Objekten in Flüssigkeiten steuern lässt.

Nanoröhren rollen sich von selbst auf, wenn man die Unterlage zweier gegeneinander verspannter Schichten von der Seite her auflöst.



OLIVER G. SCHMIDT



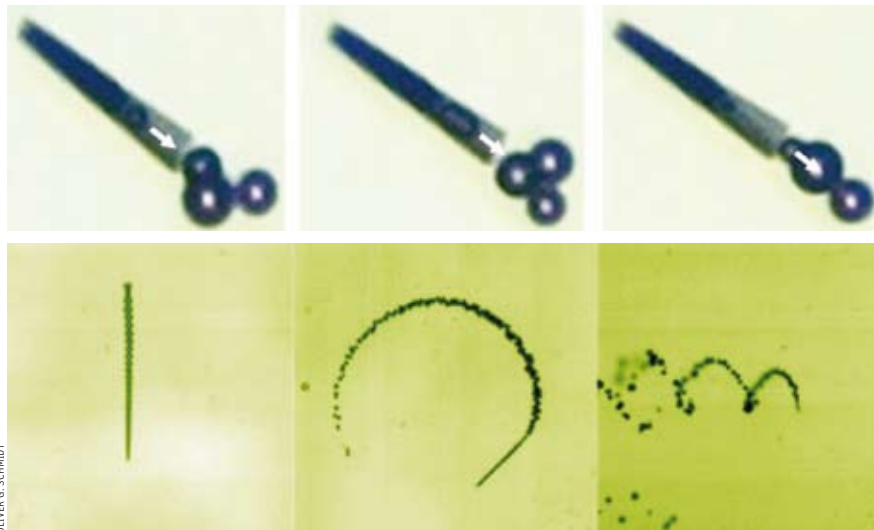
OLIVER G. SCHMIDT

Bei einem rotationssymmetrischen Röhren, das sich zu einer Seite hin leicht verjüngt, entweichen die Bläschen entlang der Längsachse aus der größeren Öffnung. Damit treiben sie das Mini-U-Boot geradeaus vorwärts. Ist das Röhren dagegen asymmetrisch geformt, kann es eine Kreisbahn oder auch eine spiralförmige Bewegung ausführen. Außerdem besteht die Möglichkeit, magnetische Schichten – etwa aus Eisen – in die Rakete einzuwickeln. Dann folgt sie einem von außen angelegten Magnetfeld und lässt sich so in beliebige Richtungen dirigieren.

Wie schnell kann ein solches Mikro-U-Boot schwimmen? Diese Frage ist vor

Ein leicht konisch geformtes Nanoröhrchen, dessen innerste Schicht aus Silber besteht, kann Treibstoff aus dem umgebenden Medium für die eigene Fortbewegung nutzen. So katalysiert das Edelmetall die Zersetzung von in Wasser gelöstem Wasserstoffperoxid. Die dabei gebildeten Sauerstoffbläschen werden ausgestoßen und treiben, wie die Zeichnung veranschaulicht, mit ihrem Rückstoß das Röhren an.

Die mikroskopischen Aufnahmen zeigen, wie Gasbläschen im Nanozylinder entstehen und daraus entweichen (oben). Das Röhren kann sich je nach seiner Form geradeaus, im Kreis oder auch auf einer Spiralbahn bewegen (unten).



OLIVER G. SCHMIDT

allem auch deshalb interessant, weil für derart winzige Objekte das für uns dünnflüssige Wasser plötzlich zäh wie Sirup wird. Dies liegt daran, dass bei ihnen die Massenträgheit im Vergleich zu den Reibungskräften verschwindend gering ist. Ein Gleiten, wie wir es beim Schwimmen kennen und ausnutzen, existiert auf der Nano- und Mikrometer-skala deshalb nicht. Die Fortbewegung ähnelt eher einer schwergängigen Bewegung im Morast. Hört der Vortrieb auf, sollte das Mikro-U-Boot sofort stoppen.

Stop and go mit Bläschen

Zeitlupenaufnahmen seiner Bewegung bestätigen das. Sie zeigen, dass das Röhren ruckartig immer ein Stück vorwärts schießt und wieder anhält. Die Geschwindigkeitsspitzen entstehen genau in dem Moment, wenn ein Bläschen ausgestoßen wird. Dann gibt es einen Stopp, bis sein Nachfolger entweicht. Allerdings folgen die Bläschen meist sehr rasch aufeinander, so dass die Raketen für das menschliche Auge im Mikroskop gleichmäßig dahinzuschwimmen scheinen.

Diese mittlere Geschwindigkeit kann, relativ betrachtet, sehr groß sein. So legt die Rakete bis zu 50-mal ihre eigene Länge pro Sekunde zurück – mehr als irgendein uns bekannter Fisch Fischlängen pro Sekunde schwimmen kann. In absoluten Einheiten ist die Mikrorakete allerdings langsamer als jede Schnecke und kommt pro Stunde nur etwa einen Meter weit.

Die Realisierung autonomer, steuerbarer Antriebe ist ein erster Schritt auf dem Weg zu komplexen Nanomaschinen, die ihre Energie aus der Umgebung beziehen, um selbstständig anspruchsvolle Tätigkeiten auszuüben. Am Ende dieses Weges werden eines fernen Tages, so unsere Hoffnung, multifunktionelle Nanoroboter stehen, die nicht nur wie in heutigen Sciencefiction-Filmen Wartungs- und Reparaturaufgaben in lebenden Organismen erledigen, sondern überall in den schwer zugänglichen Nischen einer submikroskopischen Welt, mit deren Erschließung wir gerade erst begonnen haben, heute noch unvorstellbare Filigranarbeiten durchführen.

Oliver G. Schmidt ist Professor für Materialsysteme der Nanoelektronik an der Technischen Universität Chemnitz und Direktor des Instituts für Integrative Nanowissenschaften am Leibniz-Institut für Festkörper und Werkstofforschung in Dresden.

WÄHLEN SIE AUS UNSEREN VORTEILSABOS:

JAHRESABO:

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



Das Buch »Unser Fenster zum Weltall« präsentiert astronomische Entdeckungen aus 400 Jahren. Die beiliegende DVD bietet zudem reiches Zusatzmaterial wie Animationen, Computersimulationen und Experteninterviews.

Weitere
aktuelle
Präsente unter
spektrum.de/juli



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



EIN ABO – VIELE VORTEILE

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

Ihr Zugang zu den
Onlinevorteilen:

www.spektrum.de/plus

Spektrum
DER WISSENSCHAFT

Wissenschaft aus erster Hand

MEHR WISSEN, WENIGER ZAHLEN, NICHTS VERPASSEN!

LESER WERBEN LESER:

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



Der DriversChoice-Tankgutschein über € 30,- lässt Sie der nächsten Benzinerhöhung deutlich gelassener entgegensehen.



Der Laptopbag von Reisetheil ist die ideale Tasche für Ihr Notebook. Mit zwei Innentaschen sowie einer extra gepolsterten Außen-Stecktasche für das Mobiltelefon. Tragegurt mit Komfort-Schulterpolster.

SO KÖNNEN SIE BESTELLEN:



MIT DER BESTELLKARTE



TELEFON: 06221 9126-743



FAX: 06221 9126-751



E-MAIL: service@spektrum.com

www.spektrum.de/juli

SPEKTRUM VERSCHENKEN

VERSCHENKEN SIE EIN JAHR
LESEVERGNÜGEN

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

www.spektrum.de/juli

MINIABO

SIE MÖCHTEN SPEKTRUM
DER WISSENSCHAFT GERNE
NOCH TESTEN?

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

www.spektrum.de/juli

PRODUKT DES MONATS

Handytrim®: Je nach Geschwindigkeit der rotierenden Scheibe bauen sich Zugkräfte bis zu 10,4 kg an den Alugriffen des Handytrim® auf.

Schreibtischarbeiter gewöhnen sich spielerisch eine gesündere Sitzhaltung an und lösen effektiv

Verspannungen. Preis für Abonnenten: € 29,- inkl. Versand Inland (statt € 34,50).

www.spektrum.de/plus



ÜBER
16%
PREIS
VORTEIL

Künstliche innere Uhr konstruiert

Nicht nur unser äußeres Leben, sondern auch unser Stoffwechsel folgt einem 24-Stunden-Takt. Verantwortlich dafür ist unsere innere Uhr. Deren genaue Funktion wirft aber noch viele Fragen auf. Nun konnten Schweizer Forscher eine einfache synthetische Version in Zellkultur realisieren.

Von Sandra Czaja

Sobald morgens die Sonne aufgeht und wir die Augen öffnen, künden Lichtrezeptoren mit ihren Signalen dem Nucleus suprachiasmaticus vom anbrechenden Tag. Dieses Kerngebiet, das im Gehirn direkt über der Kreuzung der Sehnerven liegt, gilt als Haupttaktgeber der »inneren Uhr«, die den Schlaf-wach-Zyklus, die Herzfrequenz, den Blutdruck und auch die Körpertemperatur steuert. Licht spielt dabei insofern eine Rolle, als es dafür sorgt, dass der zirkadiane Rhythmus mit dem Tagesverlauf synchronisiert ist. Tatsächlich läuft die innere Uhr auch weiter, wenn man Menschen längere Zeit künstlicher Dunkelheit aussetzt. Nur geht sie dann nach einer Weile falsch.

Wie schafft es der Nucleus suprachiasmaticus, einen Rhythmus mit einer Periode von ungefähr 24 Stunden zu erzeugen? Offenbar bildet er eine Art Oszillator. Bei der Tauffliege wie beim Menschen wurden schon einige Komponenten dieses rückgekoppelten Systems entdeckt. Dazu gehören die Gene *clock*, *cycle* (bei *Drosophila*) beziehungsweise *bmal1* (beim Menschen), *period*, *timeless* und *cryptochrome*. Deren Proteinprodukte lagern sich teils zu Dimeren zusammen und fördern oder hemmen die Bildung des jeweils anderen Eiweißstoffs. Wie sich aus dieser Interaktion ein zeitlicher Rhythmus ergibt, kann man sich zwar grob vorstellen. Im Detail sind die molekularen Mechanismen aber nicht aufgeklärt.

Eine Möglichkeit, zu einem tieferen Verständnis zu gelangen, besteht darin, immer weitere Feinheiten darüber zu erkunden, wie die innere Uhr reguliert wird. Angesichts der Komplexität des

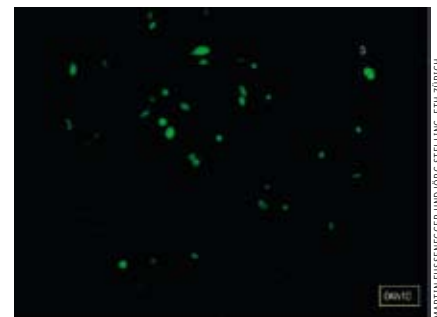
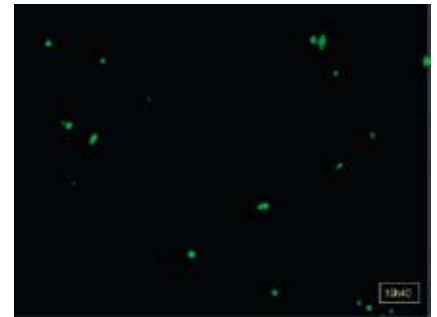
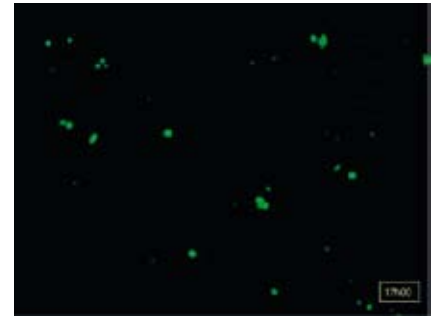
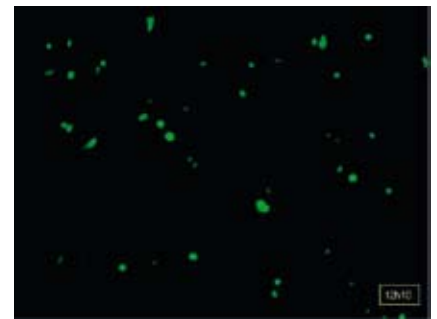
Systems ist das jedoch mühsam und verspricht zumindest keinen schnellen Erfolg. Deshalb entschloss sich eine Gruppe um Martin Fussenegger von der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich (ETH) zum umgekehrten Weg. Sie wollte einen möglichst einfachen biologischen Oszillator künstlich konstruieren, um daran die wichtigsten Grundvoraussetzungen und Prinzipien zu erkennen (*Science*, Bd. 321, S. 126).

Raffinierte Rückkopplungen

Anders als eine Gruppe um Jesse Stricker von der University of California in San Diego, der das fast gleichzeitig beim Bakterium *Escherichia coli* gelang (*Nature*, Bd. 457, S. 309), arbeiteten die Schweizer Forscher mit kultivierten Säugerzellen. Sie wählten dafür Oozyten des chinesischen Zwerghamsters. »Wir haben in ihnen Module von künstlichen Genkontrollsystemen wie in einer elektronischen Schaltung kombiniert«, erklärt Fussenegger. Dabei wurden die Laborarbeiten von Simulationen am Computer begleitet. »Durch die Modellierungen gelang es, den Oszillator so detailliert zu entwerfen, dass er zuverlässig funktioniert und sogar seine Frequenz und Amplitude einstellbar sind«, erläutert Jörg Stelling, der ebenfalls maßgeblich an den Untersuchungen beteiligt war.

Wie bei den amerikanischen Kollegen enthält auch der biologische Chronometer der Schweizer Forscher eine positive und eine negative Rückkopplungsschleife. Verwirklicht ist sie jeweils durch zwei eingeschleuste künstliche Gene. Diese wurden so konstruiert, dass sie sich durch die Gabe eines Antibiotikums abschalten lassen.

Für die positive Rückkopplung sorgt das Gen für einen tetrazyklinabhängi-



Zellen mit künstlicher innerer Uhr leuchteten über Stunden hinweg periodisch grün auf.

gen Transaktivator (tTA), der seine eigene Produktion fördert. Zugleich aktiviert er ein zweites Gen, das für das negative Feedback sorgt. Es trägt die Bauanleitung für einen pristinamycin-abhängigen Transaktivator (PIT), der die Erzeugung von tTA hemmt. Das geschieht nach der so genannten Antisense-RNA-Methode.

Wie kann man sich das vorstellen? In der Erbsubstanz DNA ist ein Strang aus Nucleotiden, die wie Buchstaben die genetische Information enthalten, durch einen »gegensinnigen« Strang aus komplementären Nucleotiden zu einer Doppelspirale ergänzt. Beide passen zueinander wie eine Hohlform und das daraus erzeugte Gussstück. Wenn ein in einem

Gen verschlüsseltes Protein hergestellt werden soll, trennen spezielle Enzyme die Doppelhelix wie einen Reißverschluss auf und erzeugen vom sinntragenden Strang Abschriften der betreffenden Sequenz. Die dabei entstehenden RNA-Moleküle übermitteln die genetische Botschaft dann quasi als Blaupause zu den Eiweißfabriken der Zelle und werden deshalb Boten-RNAs genannt.

Verräterisches Blinken

Bringt man nun ein gegensinniges RNA-Molekül aus komplementären Nukleotiden in die Zelle ein, lagern sich beide zu einer Doppelhelix aneinander. Als Folge davon ist die Boten-RNA blockiert und kann nicht mehr in das zugehörige Protein übersetzt werden. Nach diesem Prinzip funktioniert die Anti-Sense-RNA-Methode zur gezielten Abschaltung von Genen.

Nach dem gleichen Schema wurde PIT so konstruiert, dass seine Boten-RNA komplementär zu derjenigen von tTA ist. Sie bindet deshalb dessen Boten-RNA und blockiert sie. Dadurch sollte es zu einem zyklischen Auf und Ab kommen. Zunächst bildet sich tTA, das seine eigene Produktion weiter ankurbelt. Zugleich sorgt es für die Bildung von PIT. Dieses beginnt aber nun die Produktion von tTA zu drosseln, indem es dessen Boten-RNA abfängt. Damit behindert es mit einer zeitlichen Verzögerung allerdings auch seine eigene Produktion, da dafür ja tTA benötigt wird. Sobald die Konzentration von PIT auf null gesunken ist, beginnt der Zyklus von vorn.

Um die periodischen Schwankungen nachzuweisen, führten Fussenegger und seine Kollegen als Indikator noch das Gen für das grün fluoreszierende Protein (GFP) der Alge *Aequorea victoria* in ihre Säugerzellen ein und koppelten es derart mit einem Steuerelement, dass es von tTA aktiviert wurde. Im Rhythmus mit dessen Bildung sollte die Zelle also leuchten.

Tatsächlich konnten die Forscher ein periodisches Blinken beobachten: Ihr künstlicher Oszillator funktionierte. Damit war es erstmals gelungen, Säugerzellen mit einer synthetischen inneren Uhr auszustatten. Diese ließ sich, wie Versuche ergaben, sogar steuern: Mit der Anzahl der Gene für tTA und PIT, welche Forscher in die Zellen einschleusten, verlängerte sich die Periode der Oszillation, während ihre Amplitude abnahm.

Durch Zugabe von Tetrazyklin oder Pristinamycin ließ sich die Uhr anhalten.

Die Konstruktion eines solchen künstlichen Taktgebers ist fraglos ein Gewinn für die Grundlagenforschung; zeigt sie doch, welche Voraussetzungen ein einfacher biologischer Oszillator erfüllen muss und wie er sich steuern lässt. Aber auch praktische Anwendungen sind denkbar. Statt GFP kann man genauso gut jeden anderen Eiweißstoff damit zyklisch erzeugen.

Aus diesem Grund ließe sich solch ein künstlicher Regelkreislauf eventuell auch medizinisch einsetzen – zum Beispiel zur Behandlung von Typ-1-Diabetes. Die Insulinausschüttung erfolgt nämlich ebenfalls oszillierend: Die Beta-

zellen der Bauchspeicheldrüse geben das Hormon – abhängig vom Blutzuckerspiegel – alle drei bis sechs Minuten in die Blutbahn ab. Beim Typ-1-Diabetes sind diese Zellen zerstört, und das Insulin muss künstlich zugeführt werden.

Mit Injektionen lässt sich jedoch niemals die Präzision der physiologischen Steuerung des Zuckerstoffwechsels erreichen. Würden Körperzellen dagegen mit einem Regelkreislauf wie dem hier beschrieben versehen, bei dem Insulin statt GFP entsteht, könnten sie vielleicht die Funktion der zerstörten Betazellen übernehmen.

Sandra Czaja studiert an der Technischen Universität Dortmund Wissenschaftsjournalismus.

CHEMIE

Das fünfte Element

Manche kennen es vielleicht vom Borax, einem früher gebräuchlichen Haushaltsreiniger, doch für die wenigsten dürfte Bor ein Begriff sein. Selbst für Chemiker birgt es noch manches Geheimnis. So enthüllten Computersimulationen nun eine neue, exotische Zustandsform des reinen Elements.

Von Lars Fischer

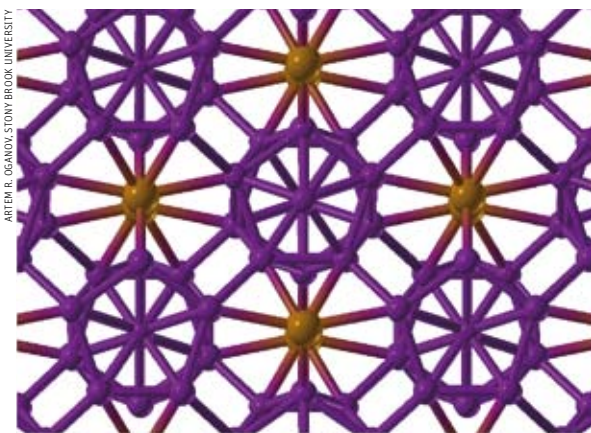
Die Kapriolen des Elements Bor überraschen selbst Chemiker immer wieder. Im Grenzbereich zwischen Metallen und Nichtmetallen angesiedelt, gibt es sich höchst eigenwillig. So neigt es weder dazu, als Partner in kleinen Molekülen mit kovalent gebundenen Atomen aufzutreten, noch fühlt es sich in ionischen Verbindungen mit regulärem Kristallgitter wohl. Auch dichte Kugelpackungen – das Ideal der meisten Metalle – verschmäht es.

Stattdessen bildet der launische Stoff bevorzugt Ikosaeder aus zwölf Atomen, die sich in vielerlei Varianten untereinander und mit anderen Elementen verbinden. Die in Zwanzigflächern angeord-

neten Boratome füllen allerdings nur etwa 34 Prozent des verfügbaren Raums aus, weniger als halb so viel wie die dicht gepackten Orangen in einer Obstkiste. Deshalb gibt es unzählige Festkörper, die außer dem Hauptbestandteil Bor noch andere – meist metallische – Elemente wie Magnesium, Nickel oder gar Plutonium als Lückenbüßer enthalten.

Sicher nachgewiesene Modifikationen des reinen Elements sind dagegen rar. Sie beschränken sich auf alpha- und beta-

Im Druckbereich zwischen 19 und 89 Gigapascal bildet elementares Bor dieses nun entdeckte, ungewöhnliche Kristallgitter. Es besteht aus negativ geladenen Ikosaedern (violett) und positiv geladenen Hanteln (ockerfarben).



Bor, die bei niedrigen Drücken und Temperaturen stabil sind, sowie eine tetragonale Form, die bei zehn Gigapascal, dem 100 000-fachen Atmosphärendruck, und etwa 2300 Kelvin entsteht. Auch ihre Bausteine sind die beim Bor allgegenwärtigen Ikosaeder. Bei über 89 Gigapascal schließlich halten die vielen Hohlräume dem Druck nicht mehr stand. Dann kollabieren die Polyeder, und das Element nimmt Zuflucht zu einer platzsparenderen Schichtstruktur, die auch vom Gallium bekannt ist, das im Periodensystem zwei Reihen tiefer steht.

Eine schizophrene Struktur

Doch im Bereich zwischen beiden Druckextremen ist das Verhalten des Bors noch weitgehend unbekannt. Hier weist sein Phasendiagramm – wie Chemiker eine Zeichnung nennen, in der die Stabilitätsbereiche der einzelnen Modifikationen in Abhängigkeit von Temperatur und Druck aufgetragen sind – eine große Lücke auf. Mitten in diesem weißen Fleck hat ein internationales Wissenschaftlerteam unter Leitung von Artem R. Oganov von der State University of New York in Stony Brook nun eine weitere Erscheinungsform des Bors entdeckt und gamma-B28 getauft. Die stabilen, dunkelgrauen Kristalle entstehen bei Drücken über 19 Gigapascal.

Als ebenso schwierig wie spannend erwies es sich, die Anordnung der Atome in dem seltsamen Material aufzuklären. Borhaltige Kristalle haben oft extrem komplexe Strukturen. Bei ihnen kann die Elementarzelle, das sich regelmäßig wiederholende Grundelement des Kristalls, aus Dutzenden und Aberdutzenden von Atomen bestehen. Herkömmliche Methoden wie die Röntgenstreuung sind damit überfordert – sofern man nicht wie bei den Proteinen weitere Tricks anwenden kann.

Hilfe fanden die Forscher beim Kollegen Computer. Sie hatten früher schon einen Algorithmus entwickelt, der Modifikationen von chemischen Verbindungen unter hohem Druck berechnet, und dabei etliche interessante Entdeckungen gemacht (Spektrum der Wissenschaft 1/2007, S. 18). Nun wandten sie das Verfahren auf elementares Bor an. Der Computer berechnete zuerst, welche Kristallstruktur unter den fraglichen Drücken die niedrigste potenzielle Energie aufweist und darum wahrscheinlich entsteht. Anschließend simulierte das

Programm das komplizierte Beugungsmuster, das diese Struktur im Röntgenstrahl ergäbe. Es war ein durchschlagender Erfolg: Das Diagramm stimmte genau mit den experimentell gemessenen Daten überein.

Die vom Rechner gefundene Struktur hat es in sich. Der hohe Druck zwingt die Boratome, unterschiedliche chemische Eigenschaften anzunehmen. Der Kristall enthält plötzlich zwei völlig verschiedene Sorten davon. Die eine bildet die altbekannten Ikosaeder, die in einem einfachen Gitter angeordnet sind, das dem des Kochsalzes entspricht. Zwischen diesen Zwölfergruppen liegen jedoch Hanteln aus je zwei Boratomen.

Beide Strukturelemente sind für sich genommen Halbleiter und weisen wie diese eine Bandlücke auf – einen verbotenen Energiebereich zwischen den Zuständen für die an der chemischen Bindung beteiligten Valenz- und die frei beweglichen Leitungselektronen. Es gibt

jedoch einen gravierenden Unterschied. Bei den Bor-Zwanzigflächnern liegen die energiereichsten Elektronen fest gebunden im Valenzband. Bei den B₂-Hanteln befinden sie sich dagegen frei beweglich im Leitungsband. Deshalb können sie in das energetisch tiefer liegende Valenzband der B₁₂-Ikosaeder übergehen. Dadurch enthält der Festkörper gleichzeitig positiv und negativ geladene Boratome – bei reinen Elementen ein ungewöhnliches Phänomen.

Mehr als 200 Jahre nach seiner Entdeckung hat das Bor also noch ein Geheimnis preisgegeben. Vermutlich war es nicht das letzte. Aber die Chemiker hegen die begründete Hoffnung, dass es mit moderner Technik gelingt, sämtlichen Kapriolen des Elements mit der Ordnungszahl fünf nach und nach auf die Schliche zu kommen.

Lars Fischer hat Chemie studiert und arbeitet als freier Wissenschaftsjournalist in Heidelberg.

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

Was Schnecken zu Linkshändern macht

Schneckenkönige mit spiegelverkehrten Gehäusen gelten unter Sammlern als wertvolle Rarität. Neue Erkenntnisse zum genetischen Hintergrund dieser Anomalie beleuchten nun die frühe Entwicklung zweiseitiger Lebewesen.

Von Ralf Strobel

Schon seit über 500 Millionen Jahren haben die allermeisten Tierarten – sie gehören zur Gruppe der so genannten Bilateria – zwei weitgehend gleiche Körperhälften. Diese Grundform wird bereits sehr früh in der Embryonalentwicklung festgelegt, wenn ein bis dahin kugelförmiger Haufen aus einigen Dutzend Zellen die ersten Strukturen ausbildet. Für eine Weile bleibt der heranwachsende Körper zunächst völlig spiegelsymmetrisch. Erst später brechen innere Organe wie der gewundene Darm oder das Herz mit seinen zwei Kreisläufen diese Symmetrie.

In seltenen Fällen kommt es dabei jedoch zu Fehlern, die dazu führen, dass einzelne oder sogar alle Organe seiten-

verkehrt im Körper liegen. Eine solche Fehlbildung, die Mediziner Situs inversus (vertauschte Plätze) nennen, tritt beim Menschen bei einem von 8000 bis 25 000 Neugeborenen auf (Spektrum der Wissenschaft 10/1999, S. 36). Oft handelt es sich um eineiige Spiegel-Zwillinge.

Die seitenverkehrte Körperanlage kommt auch bei Gehäuseschnecken vor. Hier lässt sich das Phänomen gut von außen an der Spiralrichtung der Schalen erkennen. Diese sind bei den meisten Arten dextral oder rechtshändig: Sie winden sich zur Spitze wie die Finger der rechten Hand um die Daumenrichtung. Eine von mehr als 10 000 Schnecken hat jedoch ein linksgewundenes, sinistrales Gehäuse. Tatsächlich ist ihr gesamter Körper seitenverkehrt aufgebaut. Weichtiere gehören nämlich zur großen Grup-



TAIWAN ENDEMIC SPECIES RESEARCH INSTITUTE (TESRI)

Das Gehäuse der tropischen Tellerschnecke *Biomphalaria glabrata* ist normalerweise linkshändig: Es windet sich zur Spitze wie die Finger der linken Hand um den Daumen. An diesem Weichtier und der meist rechtshändigen großen Eulen-Napfschnecke wurden jetzt genetische Faktoren ermittelt, welche die Drehrichtung der Schale bestimmen.

pe der Spiralia, bei deren Embryonen sich die ersten Zellen schräg teilen. Jede neue Zellebene entsteht leicht verdreht zur vorherigen, was zu einer spiralförmigen Zellkugel führt. An der Drehrichtung dieser Spirale orientieren sich alle späteren Zellen. Wird sie umgekehrt, spiegelt dies den gesamten Körper.

Schon 1923 fand Alfred H. Sturtevant heraus, dass der Grund für den seitenverkehrten Aufbau bei Schnecken weder eine Mutation noch ein spontaner Fehler, sondern eine seltene Genvariante ist. Sie wird rezessiv vererbt, kommt also nur zum Tragen, wenn beide Elternteile sie an den Nachwuchs weitergeben. Auch in diesem Fall tritt sie aber erst in der Enkelgeneration in Erscheinung; denn die ersten Teilungen der befruchteten Eizelle sind noch ausschließlich vom Erbgut der Mutter vorprogrammiert.

Warum bei fast allen Arten von Gehäuse-schnecken jeweils eine Drehrichtung dominiert, ist noch nicht definitiv geklärt. Wahrscheinlich erleichtert es die Paarung; denn bei den gespiegelten Tieren sitzen auch die Geschlechtsöffnungen auf der anderen Körperseite. Zudem führen diese Exemplare, da ihr Gehirn ebenfalls seitenverkehrt angelegt ist, ihren Paarungstanz in entgegengesetzter Richtung – und damit meistens erfolglos – auf.

Beim Menschen ist die Situationen offenbar komplizierter. So erwies sich zur Überraschung vieler Wissenschaftler, dass auch Personen mit Situs inversus meistens Rechtshänder sind.

Ein Forscherteam um Cristina Grande von der University of California in

Berkeley hat nun genauer untersucht, woher die Zellen der Schneckenembryonen eigentlich wissen, ob sie sich auf der linken oder rechten Körperseite befinden (*Nature*, Bd. 457, S. 1007). Dazu untersuchte es zwei verschiedene Spezies: die normalerweise dextrale große Eulen-Napfschnecke (*Lottia gigantea*) und eine sinistrale tropische Tellerschnecke (*Biomphalaria glabrata*). Wie zu erwarten, verläuft bei beiden schon die spiralförmige Teilung der Eizelle entgegengesetzt.

Einseitig aktive Gene

Im erst seit Kurzem kartierten Genom von *L. gigantea* stießen die Forscher auf zwei Sequenzen, die den schon von Säugetieren bekannten Genen *Nodal* und *Pitx* sehr ähnlich sind. Sie werden dort nur auf der linken Seite von Embryonen aktiv und produzieren Signalstoffe, die das einseitige Wachstum von Organen anregen. Grande und ihre Kollegen mutmaßten, dass die beiden Gene bei den Napfschnecken eine ähnliche Funktion erfüllen. Um das zu prüfen, untersuchten sie deren Aktivität in den Embryonen der Weichtiere.

Ob ein Gen aktiv ist, lässt sich daran erkennen, ob zahlreiche Abschriften von ihm – so genannte Boten-RNA-Moleküle – im Zellplasma vorliegen, wo sie von Ribosomen in Eiweißstoffe übersetzt werden. Die Forscher tränkten deshalb die Embryonen der beiden Schneckenarten mit Farbstoffen, die sich gezielt an die Boten-RNA-Moleküle von *Nodal* und *Pitx* anlagern. Tatsächlich zeigte sich, dass die zwei Gene bei der dex-


tralen Art nur in der rechten und bei der sinistralen in der linken Hälfte aktiv sind. Vermutlich hemmen sie dort das Wachstum von Zellen, welche die Kalkschale produzieren. Das Gehäuse wächst daher auf der einen Seite schneller als auf der anderen und windet sich.

Die Forscher konnten die maßgebliche Rolle der beiden Gene auch direkt beweisen, indem sie die Wirkung von *Nodal* chemisch blockierten. Die Schneckenlarven bildeten daraufhin zwar immer noch ein Gehäuse. Es war jedoch nicht gewunden, sondern hatte die Form einer geraden Röhre. Diese Wuchsform blieb dauerhaft erhalten, auch wenn *Nodal* nicht länger gehemmt wurde. In weiteren Untersuchungen stellte sich heraus, dass schon das 32- oder 64-Zell-Stadium die entscheidende Phase ist, in der das Gen die Körperseiten festlegt.

Diese Entdeckung hat große Bedeutung für die Entwicklungsbiologie. Da sich Schnecken und Säugetiere stammesgeschichtlich so fernstehen wie kaum zwei andere zweiseitige Lebewesen, dürfte ein ähnlicher Mechanismus schon beim Urahn aller Bilateria die Entwicklung der beiden Körperhälften gesteuert haben. Allerdings wurde bei Insekten noch keine Parallele zu *Nodal* entdeckt. Deshalb galt es bisher als Besonderheit von Wirbeltieren. Diese Theorie ist durch seinen Nachweis bei Weichtieren nun widerlegt. Untersuchungen an weiteren Spezies sollten ein klareres Bild darüber ergeben, wie sich dieses Regelsystem im Lauf der Evolution entwickelt und verändert hat.

Die nächste Frage lautet nun natürlich, warum *Nodal* bei den Schnecken nur auf einer Seite aktiv ist und wie es diese Seite erkennt. Der Grund muss letztlich in der Teilungsrichtung der Eizelle liegen. Diesem Zusammenhang wollen Grande und ihre Kollegen nun als Nächstes nachgehen.

Ralf Strobel ist Student am Lehrstuhl für Wissenschaftsjournalismus der TU Dortmund.

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

Allergieantikörper gegen Krebs

Die eigentliche Funktion von Antikörpern, die Allergien auslösen, liegt noch im Dunkeln. Nach jüngsten Befunden könnten sie jedoch zur Krebsbekämpfung dienen. Erste Versuche stimmen die Forscher hoffnungsvoll.

Von Thorsten Braun

Allergiker sterben seltener an Krebs. Zu diesem erstaunlichen Ergebnis kam vor drei Jahren eine Forschungsgruppe um Michelle C. Turner von der University of Ottawa (Ontario), die im Rahmen einer epidemiologischen Studie die Daten von rund 1,2 Millionen US-Amerikanern auswertete. Innerhalb der Beobachtungszeit von 18 Jahren ergab sich für Personen, die sowohl unter Asthma als auch unter Heuschnupfen litten, eine um elf Prozent geringere Wahrscheinlichkeit, einem bösartigen Tumor zu erliegen, als für Teilnehmer ohne Allergie.

Wurden bei der Auswertung nur Nichtraucher berücksichtigt, waren die Unterschiede allerdings nicht mehr so deutlich. Da sich Allergiker eventuell gesundheitsbewusster verhalten und dadurch eine Krebserkrankung vermeiden, sollen nun weitere Untersuchungen klären, ob Allergien das Tumorrisiko tatsächlich reduzieren.

Für die Immunologin Erika Jensen-Jarolim vom Institut für Pathophysiologie der Medizinischen Universität Wien bestätigten die Ergebnisse der Studie dennoch einen Verdacht, den sie schon seit einiger Zeit hegt: »Das Immunsystem könnte gegen Tumorzellen mit den gleichen Waffen vorgehen wie gegen Stoffe, die eine allergische Reaktion auslösen.«

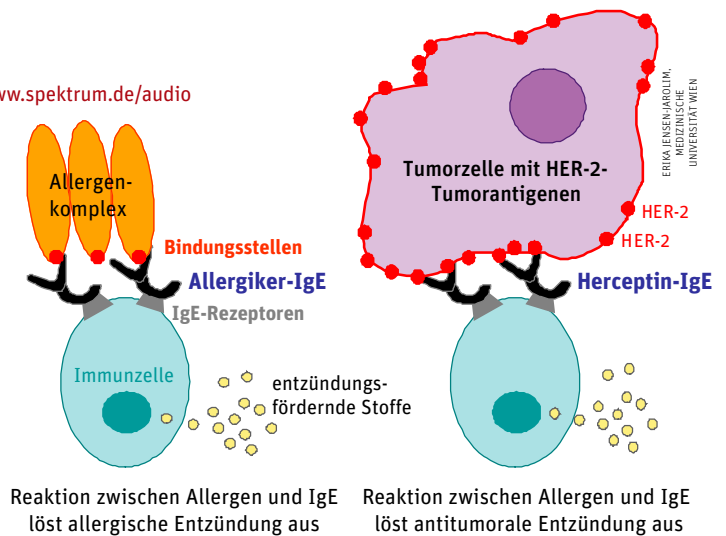
Die unrühmliche Hauptrolle bei Heuschnupfen und Asthma spielt eine bestimmte Sorte von Antikörpern, die an die Proteine der Blütenpollen andocken und weitere Abwehrzellen des Immunsystems mobilisieren. Es handelt sich um Immunglobuline (Ig) der Klasse E. Wie alle Antikörper haben sie die Form eines Y, wobei jeder der beiden Arme spezifisch

das gleiche Antigen – in diesem Fall ein Allergen – erkennen kann. Ihr Stiel weist jedoch die Besonderheit auf, sich an Mastzellen und so genannte basophile Granulozyten zu heften. Dadurch sind IgE-Antikörper überwiegend membranbound und liegen im Gegensatz zu den Vertretern der anderen Klassen kaum frei im Blutplasma vor.

Zwar weiß man, wie eine allergische Reaktion im Detail abläuft, doch warum das Immunsystem von Allergikern die an sich harmlosen Blütenpollen bekämpft, ist noch nicht wirklich geklärt. Auch welche Aufgaben IgE-Antikörper bei gesunden Personen haben, liegt nach wie vor im Dunkeln. Nach einer gängigen Theorie sollen sie eigentlich dafür da sein, einen Angriff auf Würmer und andere Parasiten einzuleiten.

Jensen-Jarolim teilt diese Ansicht nicht. »Zwar haben Patienten mit parasitären Erkrankungen erhöhte IgE-Werte, aber sie entwickeln auch vermehrt Asthma«, begründet sie ihre ablehnende Haltung. Aber wozu sind IgE-Antikörper dann gut? Dass sie nur dazu dienen sollen, Menschen krank zu machen, erscheint kaum vorstellbar. Deswegen ist der Wiener Forscherin eine andere Idee gekommen: Vielleicht könnten diese Antikörper eine zentrale Rolle im Kampf gegen den Krebs spielen.

Mittlerweile hat Jensen-Jarolim erste experimentelle Belege für ihre These gefunden. So stellten sie und ihre Mitarbeiter fest, dass Mäuse, die sie mit einem Brustkrebsprotein fütterten, spezifische IgE-Antikörper dagegen produzierten. Voraussetzung war, dass die Magensäure der Tiere mit Medikamenten neutralisiert wurde, damit das Protein unverdaut den Darm erreichen und von dort ins



Bei Allergikern binden Antikörper vom IgE-Typ harmlose Substanzen und veranlassen nach der Anlagerung an Abwehrzellen des Immunsystems die Ausschüttung entzündungsfördernder Stoffe. Nach ersten Befunden lässt sich diese unerwünschte Reaktion auch zur Krebsbekämpfung einsetzen. Der monoklonale Antikörper Herceptin erkennt das Protein HER-2 auf der Oberfläche von Tumorzellen. Eine IgE-Variante dieses IgG-Moleküls löste in Zellkulturen eine Entzündungsreaktion gegen den Krebs aus.

Lymphsystem gelangen konnte. Anschließend isolierten die Wissenschaftler die Antikörper aus abgenommenem Mäuseblut und brachten sie in einer Petrischale mit Mastzellen zusammen. Dann fügten sie menschliche Brustkrebszellen hinzu. Nachdem die Antikörper diese erkannt hatten, stimulierten sie die Mastzellen und veranlassten sie zur Freisetzung von Botenstoffen, die im Körper eine massive Attacke gegen die Krebszellen ausgelöst hätten.

Schluckimpfung für Krebskranke?

Dieses bemerkenswerte Ergebnis weckt die Hoffnung, dass eine ähnliche Schluckimpfung auch Tumorkranken helfen könnte. Freilich kann man Resultate von Tierversuchen nicht ohne Weiteres auf den Menschen übertragen. Immerhin aber gibt es seit einigen Jahren schon Antikörper, die zu therapeutischen Zwecken an Patienten eingesetzt werden. Nur sind es allesamt Immunglobuline der Klasse G, die solide Tumoren nicht besonders gut erreichen. Deshalb müssen sie in großen Mengen verabreicht werden, was eine Therapie sehr teuer macht. Jensen-Jarolim ist überzeugt davon, dass sich

IgE-Antikörper besser eignen, weil die Abwehrzellen, mit denen sie fest verbunden sind, aktiv ins Gewebe eindringen. »Im Gegensatz zu den hauptsächlich frei im Blut schwimmenden IgG-Antikörpern finden sie so leichter Tumorzellen«, sagt die Forscherin. Daher sollten kleinere Mengen genügen.

Zusammen mit der Biophysikerin Hannah Gould vom Londoner King's College hat Jensen-Jarolim vor Kurzem eine Möglichkeit erdacht, die Wirkung beider Immunglobulin-Klassen direkt zu vergleichen. Ausgangspunkt war der monoklonale Antikörper Trastuzumab der Firma Roche, der schon seit einigen Jahren unter dem Handelsnamen Herceptin zur Behandlung bestimmter Brustkrebsarten zugelassen ist. Er erkennt das Protein HER-2 auf der Oberfläche von Krebszellen.

Die Teams der beiden Forscherinnen erzeugten eine IgE-Variante dieses IgG-Moleküls, die ebenfalls an HER-2 andockt. In Petrischalen brachten sie die beiden Typen jeweils mit Monozyten – im Blut zirkulierenden Immunzellen, die körperfremde Strukturen vernichten – und den Brustkrebszellen zusammen. Tatsächlich erkannten beide Antikörpervarianten das Tumorphprotein HER-2 und aktivierten dadurch die Monozyten.

Diese zerstörten die Krebszellen allerdings, je nachdem durch welchen Antikörper sie stimuliert worden waren, auf

völlig unterschiedliche Weise. Bei der IgE-Variante trieben sie sie in den programmierten Zelltod (Apoptose). Hatten die Tumorzellen dagegen die IgG-Form angelagert, nahmen die Monozyten sie in sich auf und zerlegten sie mit Hilfe spezieller Enzyme. Jensen-Jarolim erklärt das damit, dass sich der Stiel der beiden Antikörper an unterschiedliche Rezeptoren auf den Immunzellen anlagert.

Ermutigt durch die positiven Ergebnisse aus der Kooperation plant die Pionierin der Allergo-Onkologie nun, einen Schritt über Versuche mit Zellkulturen in Petrischalen hinauszugehen. Auch Hunde können an Brustkrebs leiden, wobei die Tumorzellen ebenfalls HER-2-Moleküle an der Oberfläche tragen. Jensen-Jarolim möchte deshalb eine Hundevariante ihres IgE-Antikörpers herstellen und an erkrankten Vierbeinern in der Veterinärklinik der Universität Wien erproben. Erst wenn das erfolgreich ist, können klinische Versuche am Menschen folgen.

In Deutschland verfolgt Edzard Spillner, Gruppenleiter am Institut für Biochemie und Molekularbiologie der Universität Hamburg, einen ähnlichen Ansatz wie Gould und Jensen-Jarolim. Er hat eine IgE-Variante von Cetuximab hergestellt. Das ist ein monoklonaler Antikörper auf IgG-Basis, den Merck unter dem Namen Erbitux gegen metastasierenden Darmkrebs anbietet. Als Spillner

die IgE-Form im Reagenzglas mit Monozyten und Krebszellen zusammenbrachte, wurden diese ebenfalls abgetötet.

»Im Körper ist die Situation natürlich viel komplexer, da ein bestimmter Antikörper nicht nur eine einzige, sondern unterschiedliche Sorten von Abwehrzellen rekrutieren kann«, äußert sich Spillner vorsichtig. Seiner Ansicht nach haben IgE-Moleküle gewöhnlich eine allgemeine Überwachungsfunktion. »Man sollte sich von der Idee lösen, dass es eine bestimmte Klasse von Antikörpern gibt, die für die Bekämpfung aller Krebserkrankungen besonders geeignet ist«, findet er. »Da ein IgE-Antikörper jedoch andere Abwehrmechanismen als sein IgG-Pendant in Gang setzt, könnten sich beide ergänzen und in ihrer Wirkung verstärken.«

Trotz der positiven Befunde zeigen weder Roche noch Merck bisher größeres Interesse an den IgE-Varianten ihrer Kassenschlager Herceptin und Erbitux. Vielleicht ändere sich das erst, so Jensen-Jarolim, wenn der Patentschutz für beide Produkte ablaufe. Sie hofft dennoch auf eine baldige Zusammenarbeit mit der Pharmaindustrie: »Wir sind auf sie als Partner angewiesen, um therapeutische IgE-Antikörper durch die klinische Entwicklung zu bringen.«

Thorsten Braun ist promovierter Chemiker und freier Wissenschaftsjournalist in Berlin.

NANOTECHNOLOGIE

Pinzette für Moleküle

Forscher konnten nun mit Licht DNA-Stücke einfangen – in einem Spalt, den sie in einen optischen Wellenleiter geritzt hatten. Damit existiert ein weiteres Hilfsmittel zur Verwirklichung des Traums vom Labor auf einem Chip.

Von Stefan Maier

Oft sind es kleine oder sogar winzige Abwandlungen eines bewährten Konzepts und keineswegs die viel beschworenen »Quantensprünge«, die neue Horizonte in den angewandten Wissenschaften eröffnen. Und seit dem Siegeszug der Nanotechnologie hat das Wörtchen »klein« ja auch einen ganz neuen, fast magischen Klang. Einen neuerlichen

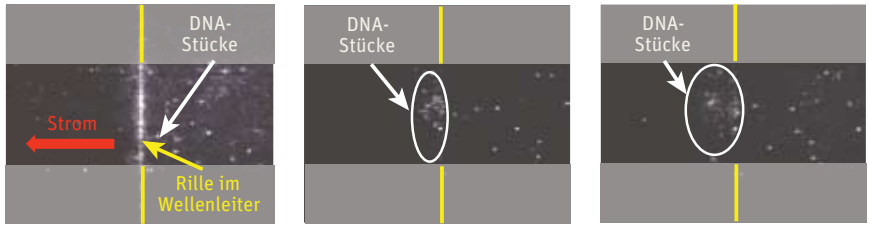
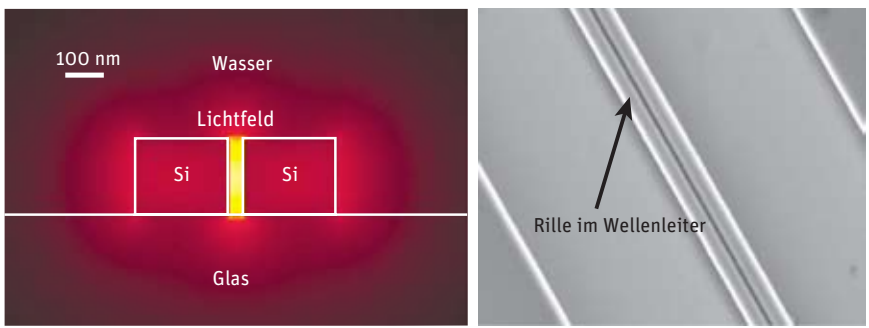
Beleg dafür liefert nun die Errungenschaft einer Gruppe um Michal Lipson von der Cornell University in Ithaca (US-Bundesstaat New York).

Die Forscher haben einen herkömmlichen optischen Wellenleiter aus Silizium durch eine winzige Aussparung in der Mitte in eine Falle für Biomoleküle verwandelt (*Nature*, Bd. 457, S. 71). Damit existiert nun ein weiterer Baustein für den Traum vieler Biochemiker, Phar-

mazeuten und Mediziner: ein Mikrolabor auf einem Halbleiterchip, das vollautomatisch Analysen und Synthesen durchführt.

Die neue Falle basiert auf der gewitzten Kombination einer optischen Pinzette mit einem Wellenleiter. Dessen bekanntester Vertreter ist wohl die Glasfaser. Im Bereich der Telekommunikation dient sie als Rückgrat des Breitband- und Kabelnetzes zum Transport von Daten über weite Strecken.

Auf Chips benutzt die Industrie statt Glas dagegen meist Siliziumblöcke mit rechteckigem Querschnitt. Das Prinzip ist aber das gleiche: Ein eingespeister Lichtstrahl wird durch Totalreflexion an der Grenzfläche zur umgebenden Luft oder einem anderen Medium, dessen Brechungsindex kleiner als der des Halbleiters ist, im Inneren entlanggeleitet. Al-



Vorbeiströmende DNA-Stücke bleiben in der Rille hängen. Beim Abschalten werden die DNA-Stücke freigesetzt ... und von der Strömung fortgeführt.

In einer Rille in einem optischen Wellenleiter (rechts oben) konzentriert sich das Lichtfeld (links oben). Deshalb sammeln sich dort vorbeiströmende DNA-Moleküle (links unten) und werden nach Abschalten des Laserlichts wieder freigesetzt (rechts unten).

60 Nanometer breiten Spalt und ließen echte langkettige Biomoleküle darüberströmen. Dabei handelte es sich um DNA-Stücke aus dem Bakteriophagen Lambda, in denen jeweils 48502 Nukleotid-Bausteine aneinandergereiht waren. Diese Moleküle hatten Lipson und seine Mitstreiter, um sie sichtbar zu machen, mit Fluoreszenzstoffen gekoppelt. Videoaufnahmen dokumentierten, dass auch in diesem Fall einzelne Teilchen festgehalten und erst nach dem Ausschalten des Laserstrahls wieder freigegeben wurden.

lerdings muss es sich um Infrarotstrahlung handeln, da Silizium für sichtbares Licht nicht durchlässig ist.

Optische Pinzetten gibt es zwar noch nicht im Alltag, teilweise aber schon in Klassenzimmern. Im einfachsten Fall bestehen sie aus nichts weiter als einem Laserstrahl, den man per Mikroskop in eine Flüssigkeitszelle fokussiert. Winzige Partikel, die in die Nähe des Brennpunkts gelangen, werden elektrisch polarisiert, zum Fokus hingezogen und dort schließlich eingefangen. Sie lassen sich dann mit dem Lichtstrahl nach Belieben durch die Flüssigkeit bewegen.

Solche optischen Pinzetten, die Mitte der 1980er Jahre entwickelt wurden, eignen sich zur Manipulation von Teilchen mit Durchmessern zwischen etwa 0,1 und 10 Mikrometern. Besonders schön wäre es natürlich, wenn sich auch einzelne Moleküle damit einfangen ließen. Dem steht aber leider ein grundlegendes Problem der Optik entgegen: die so genannte Beugungsgrenze. Demnach ist es nicht möglich, Lichtstrahlen auf einen beliebig kleinen Punkt zu fokussieren, sondern nur auf ein Scheibchen mit einem Durchmesser von etwa der halben Wellenlänge der verwendeten Strahlung. Das entspricht bei sichtbarem Licht einigen hundert Nanometern.

In Brennpunkten mit derart großen Durchmessern lassen sich Moleküle aber nicht einfangen. Für solche Winzlinge müsste das Licht viel stärker gebündelt sein. Zudem ist der Brennpunkt im Normalfall kreisförmig, während Biomoleküle eine lang gestreckte Form haben. Eine ideale Falle wäre deshalb ein »Stab« aus Licht, dessen Durchmesser deutlich unterhalb der Beugungsgrenze liegt. Genau das hat Lipsons Gruppe nun zusam-

men mit dem Biologen David Erickson aus einem Nachbarlabor realisiert.

Die optische Falle der Forscher besteht aus einem Wellenleiter aus Silizium, in dessen Zentrum mittels Elektronenstrahlolithografie ein schmaler Spalt eingeritzt wurde. Dieser hat natürlich automatisch Linienform; zugleich liegt seine Breite im Bereich zwischen 60 und 120 Nanometern und damit weit unterhalb der Beugungsgrenze. In dem Spalt konzentriert sich, wie Computersimulationen ergaben, ein Großteil der Energie des in den Leiter eingespeisten Lichtstrahls. Daher sollte die Lichtintensität dort für das Einfangen von lang gestreckten Teilchen mit Durchmessern von nur wenigen Dutzend Nanometern ausreichen. Physiker sprechen von optischen Nahfeldkräften, die in der Umgebung des Schlitzes wirken und die Partikel festhalten.

Nanoteilchen in der Falle

Um die Probe aufs Exempel zu machen, brachten die Forscher einen Kanal über dem Wellenleiter an, der senkrecht zu einem eingeritzten, 100 Nanometer breiten Spalt verlief. Durch ihn ließen sie eine Flüssigkeit über den Schlitz strömen, die 75 Nanometer dicke Polystyrolkugeln mit sich führte, und speisten per Glasfaser Laserlicht in den Wellenleiter ein. Tatsächlich blieben viele Partikel in dem Spalt hängen und bewegten sich erst weiter, wenn der Laser abgeschaltet wurde. Außerdem wurden die gefangenen Teilchen durch den Lichtdruck des Strahls innerhalb des Schlitzes ein kurzes Stück senkrecht zur Strömungsrichtung der Flüssigkeit transportiert.

Nach diesem erfolgreichen ersten Test wagten die Forscher den entscheidenden nächsten Schritt: Sie erzeugten einen nur

Damit ist die prinzipielle Eignung derartiger Wellenleiter als optische Pinzetten für Biomoleküle bewiesen. Bevor sie routinemäßig eingesetzt werden können, gilt es allerdings noch einige Hürden zu überwinden. Zwar ist die zum Einfangen nötige Lichtleistung mit nur wenigen hundert Milliwatt so klein, dass die Laser moderner Lichtmikroskope dafür ausreichen. Doch war die Geschwindigkeit, mit der sich die eingefangenen Polystyrolkugeln längs des Spalts transportieren ließen, mit 1,5 Mikrometern pro Sekunde noch recht gering. Eine optische Pinzette sollte aber erlauben, die gewünschten Objekte nicht nur zu packen, sondern auch gezielt an einen anderen Ort zu bugsieren.

Bei Biomolekülen ließ sich überhaupt keine Verschiebung am Schlitz entlang beobachten. Das hängt damit zusammen, dass die Geschwindigkeit, mit welcher der Lichtdruck ein Teilchen bewegt, mit der fünften Potenz des Partikeldurchmessers abfällt. Ein weiteres Problem bestand darin, dass sich einige Teilchen an den Seiten des Licht leitenden Halbleiters anlagerten, weil auch dort schwache Nahfeldkräfte wirken.

Es gibt also noch einige Punkte, bei denen die Forscher ihre Findigkeit beweisen können. Doch der Grundstein ist gelegt, und die verbleibenden Schwierigkeiten bei der praktischen Anwendung sollten nicht unüberwindlich sein.

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

Springers Einwürfe

Machen uns die Quanten frei?

Verfechter der Willensfreiheit suchen kleinste Schlupflöcher.

Ganz klar: Wenn ich meinen Arm bewegen will, erteilt dieses »Ich will« entsprechenden Muskeln in Schulter und Arm den Befehl, sich zusammenzuziehen, und mit den Augen kann ich verfolgen, wie die Muskelsklaven gehorchen. Anschaulich erlebe ich eine Befehlskette vom Wollen zum Tun, vom Geist zum Körper.

Störend wirkt nur, dass mein Geist neuerdings von den Hirnforschern mit großem Erfolg als Körperteil erforscht wird, nachdem ihn manche Denker schon zuvor zum Gemeinschaftsprodukt von Geschichte und Sprache erklärt hatten. Damit verliert mein Wille das vermeintlich Voraussetzungslose; er erweist sich wie alles Übrige als Gesellschafts- und Naturerscheinung. Man kann das als Erkenntnisgewinn begrüßen oder als Angriff auf die Freiheit skandalös finden.

Ein Geist als Erstursache, der nach Lust und Laune dies oder das tut oder unterlässt, ist aber, finde ich, erst recht ein Skandal. Damit reihe ich mich nicht unbedingt unter die gängigen Karikaturen »naiver« Realisten, tumber Naturalisten oder bornierter Positivisten ein, sondern finde mich in illustrierter Gesellschaft. Schon im 17. Jahrhundert fand Spinoza, als er sein axiomatisches System der Ethik formulierte, schlagende Argumente gegen beliebige Freiheit des Willens. Und seither blickt die Kritik der Willensfreiheit auf eine imponierende philosophische Tradition zurück.

Dennoch war auch das gegnerische Lager um Argumente nicht verlegen. Die einen fanden mit Kant – und gegen Spinoza –, ethisches Handeln setze nun einmal Freiheit von natürlichen Handlungsbedingungen voraus, basta. Die anderen suchten in der Naturwissenschaft selbst Freiheitsgründe.

Ein besonders hartnäckiges Argument der letzteren Art beruft sich auf die Quantenphysik. Die sei nicht streng deterministisch, sondern mache Wahrscheinlichkeitsaussagen. Na bitte, rufen die Apostel der Willensfreiheit, die Natur lässt uns Spielräume! Doch dieser fragwürdige Gedanke verwechselt Freiheit mit Zufall. Die Natur funktioniert angeblich nicht als unerbittliches Räderwerk à la Newton, und dies erlaubt dem menschlichen Willen, den mikroskopischen Schlupf der Quantenkausalität irgendwie zum eigenen Vorteil zu nutzen. Wie das gehen soll, weiß freilich niemand.

Zuletzt ist mir das tot geglaubte Argument in einem Essay von Martin Heisenberg wieder begegnet (*Nature*, Bd. 459, S. 164). Der renommierte Fliegenhirnforscher und Sohn Werner Heisenbergs, eines Begründers der Quantenmechanik, meint tatsächlich, die von seinem Vater entdeckte Unbestimmtheitsrelation schaffe den ersehnten Spielraum für unbedingt freies Handeln.

Nur: Wie stellt er sich das vor? Lauern in unserem Gehirn kleine Quantenverwandte des maxwellschen Dämons an jeder Synapse und lassen wie Zollbeamte nur diejenigen Neurotransmitter passieren, die von der geistigen Willenszentrale mit gültigen Papieren ausgestattet wurden? Welche unbekanntere höhere Macht vermag mit den Quanten so ganz nach Belieben umzuspringen?

Bis zu solchen Details versteigen sich die Adepten der Quantenfreiheit selten. Ihnen genügt die vage Erleichterung darüber, dass subjektive Handlungsmacht aus scheinbar gutem physikalischem Grund nicht mit objektiver Kausalität kollidieren muss. Muss sie übrigens tatsächlich nicht, auch ganz ohne Quantenunschärfe – siehe eine lange Reihe philosophischer Begriffsanalysen, von Baruch de Spinoza bis Peter Bieri.

Dennoch bleibt die Idee der Quantenfreiheit wohl so unausrottbar wie in den Feuilletons die Metapher vom »Quantensprung«: Man möchte damit einen überraschend großen Wandel ausdrücken – und zitiert doch bloß die kleinstmögliche Zustandsänderung überhaupt.



Michael Springer



wichtige onlineadressen

▶ CONTOO

Das Konferenzportal zur Organisation, Verwaltung und Präsentation wissenschaftlicher Tagungen
www.contoo.de

▶ Managementwissen

per Fernlehre kostengünstig
ortsunabhängig erwerben
Qualitätsmanager, Qualitätsbeauftragter
www.cqa.de

▶ Expedition Zukunft

ScienceExpress – ein Wissenschaftszug
fährt quer durch Deutschland
www.expedition-zukunft.org

▶ Kernmechanik – von Kernspin bis Kosmologie, von Dunkler Materie und Energie

www.kernmechanik.de

▶ SciLogs

Die größte deutschsprachige Webseite
mit Wissenschaftsblogs
www.scilogs.de

▶ Lärm im Labor?

Dagegen haben wir was:
www.sonation.com

▶ FASZINATION UNIVERSUM 3D-Wandkarte des Sonnensystems, EUR 29,90

boehle@weltraum-versand.de
www.weltraum-versand.de

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

iq media-marketing gmbh
Susanne Förster
Telefon 0211 61 88-563
E-Mail: susanne.foerster@iqm.de

Auf der Spur der *kosmischen* Beschleuniger

Die vielleicht spektakulärsten Phänomene des Weltalls verraten sich durch extrem energiereiche kosmische Strahlung. Um deren Quellen zu identifizieren, gehen Gammaastronomen höchst trickreich vor.

In Kürze

- ▶ Die Erde ist einem Bombardement durch extrem energiereiche **kosmische Teilchen** ausgesetzt. Noch wissen die Forscher wenig über deren Herkunft.
- ▶ Den Partikelstrom begleiten aber auch Gammastrahlen, deren Quellen sich leichter entdecken lassen.
- ▶ Neue bodenbasierte **Gammateleskope** werden das Rätsel der kosmischen Beschleuniger vermutlich bald lösen.

Von Jan Hattenbach

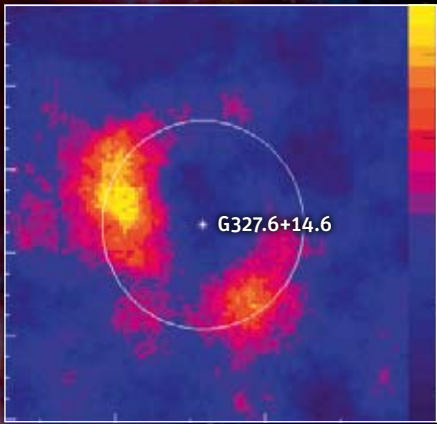
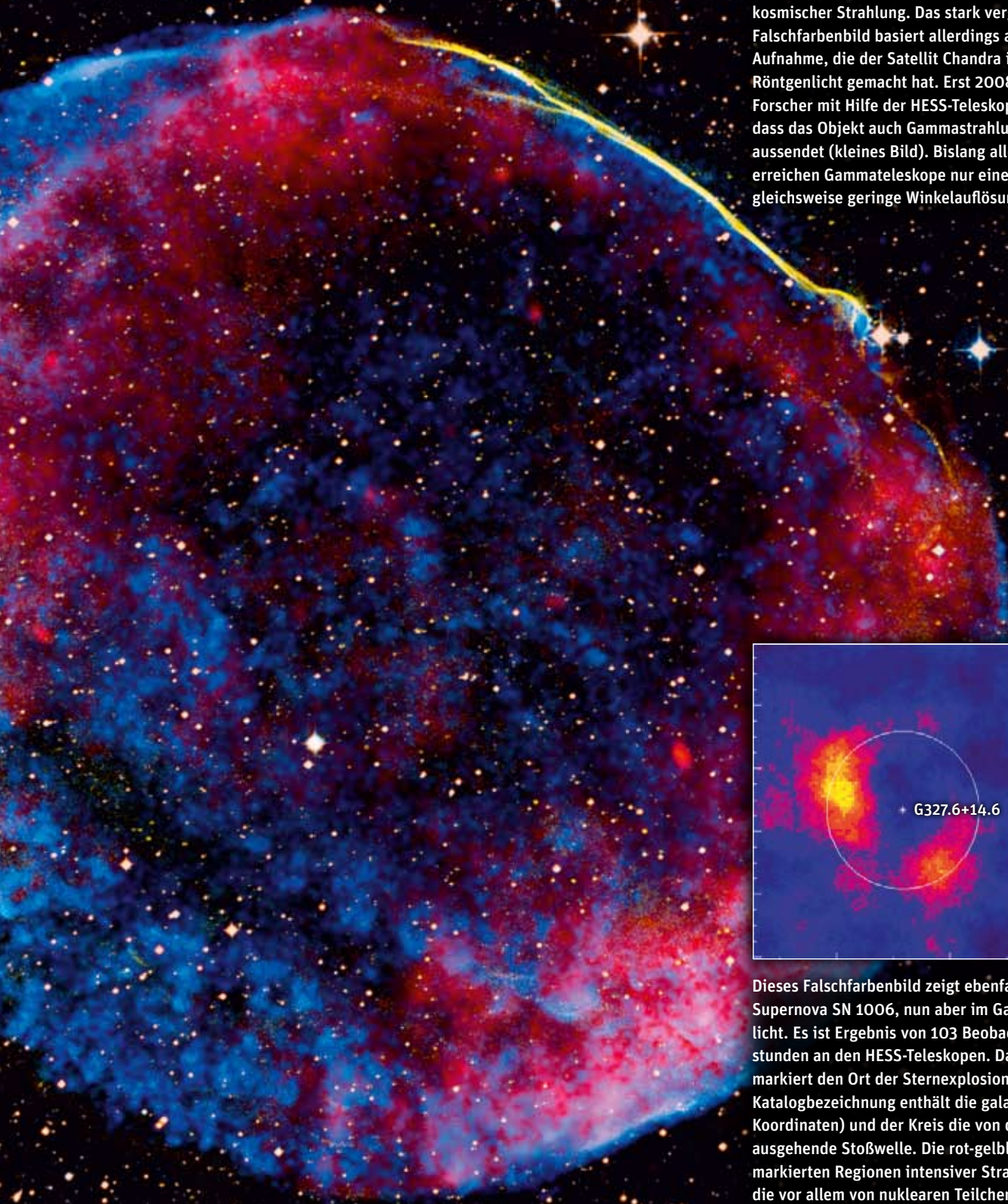
Victor Franz Hess stand vor keiner leichten Aufgabe, als er die ungewöhnlichen Ergebnisse seiner Forscherkollegen zu erklären versuchte. Um 1912 wurde die beobachtete Ionisation von Luftmolekülen in der Atmosphäre weithin mit einer irdischen Ursache begründet: Strahlung nämlich, die von radioaktiven Substanzen im Boden ausgeht. Einige wenige Wissenschaftler hatten jedoch festgestellt, dass die Luftionisation mit zunehmender Höhe keineswegs so stark abnahm, wie die Modelle vermuten ließen. Vielerorts herrschte allerdings die Überzeugung, dies sei schlicht das Ergebnis von Messfehlern und der Verwendung unzuverlässiger Instrumente.

Beinahe hätte man so eine der wichtigsten Informationsquellen übersehen, die das Universum uns bereitstellt. Victor Hess aber (1883–1964) entdeckte sie. Bei Ballonfahrten

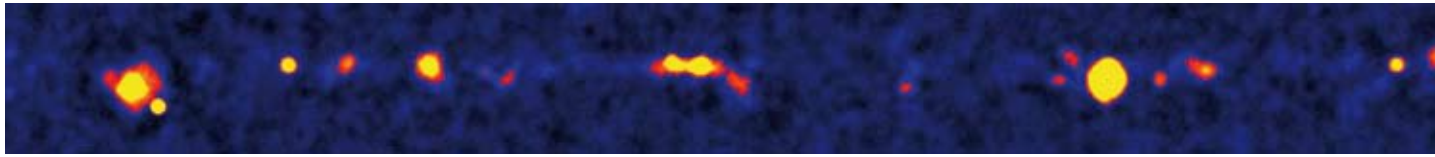
in die nahe Atmosphäre stellte er fest, dass die Leitfähigkeit der Luft mit der Höhe sogar zunimmt, und postulierte daraufhin die Existenz einer »Höhenstrahlung«. Tatsächlich wurde mit der Zeit klar, dass die Erde einem fortwährenden Bombardement geladener Teilchen aus dem All ausgesetzt ist. 1936 erhielt Hess für seine Entdeckung den Nobelpreis, und seit einigen Jahren erinnern auch die HESS-Gammateleskope in Namibia an den österreichischen Physiker. Doch dazu später.

Die kosmische Strahlung, wie sie mittlerweile genannt wird, fasziniert Astronomen und Astroteilchenphysiker bis heute. Immerhin liefert sie ihnen Daten (und Materie) aus den entferntesten Regionen im Kosmos. Ihren Hauptanteil machen geladene Teilchen wie Wasserstoff- und Heliumkerne, also Protonen und Alphateilchen, sowie Elektronen aus. Einige von ihnen sind wahre Boliden; Sie besit-

Die im Jahr 1006 am Nachthimmel aufge-
tauchte Supernova SN 1006 ist möglicher-
weise das beste Beispiel für eine Quelle
kosmischer Strahlung. Das stark vergrößerte
Falschfarbenbild basiert allerdings auf einer
Aufnahme, die der Satellit Chandra im
Röntgenlicht gemacht hat. Erst 2008 wiesen
Forscher mit Hilfe der HESS-Teleskope nach,
dass das Objekt auch Gammastrahlung
aussendet (kleines Bild). Bisläng allerdings
erreichen Gammateleskope nur eine ver-
gleichsweise geringe Winkelauflösung.



Dieses Falschfarbenbild zeigt ebenfalls die
Supernova SN 1006, nun aber im Gamma-
licht. Es ist Ergebnis von 103 Beobachtungs-
stunden an den HESS-Teleskopen. Das Kreuz
markiert den Ort der Sternexplosion (die
Katalogbezeichnung enthält die galaktischen
Koordinaten) und der Kreis die von dort
ausgehende Stoßwelle. Die rot-gelblich
markierten Regionen intensiver Strahlung,
die vor allem von nuklearen Teilchen stammt,
finden auf der Röntgenaufnahme (großes
Bild) eine Entsprechung. Möglicherweise
deuten sie auf Magnetfeldlinien hin, die das
Objekt durchziehen.



Beim Durchmustern der Milchstraße mit den HESS-Teleskopen stießen die Astronomen auf über 40 und damit unerwartet viele Gammaquellen. Die Grafik zeigt Orte energiereicher Gammastrahlung im Bereich der Milchstraßenebene. Aus welchen kosmischen Objekten die Strahlung stammt – Supernovae etwa oder Pulsaren –, ist in vielen Fällen noch ungeklärt.

zen Energien von bis zu 10^{20} oder 10^{21} Elektronvolt. Selbst im weltgrößten Teilchenbeschleuniger, dem Large Hadron Collider, werden Protonen auf gerade einmal 7×10^{12} eV gebracht. Doch manche kosmischen Protonen treffen mit derselben Energie auf die Atmosphäre, mit der ein Körper der Masse von einem Kilogramm, fallengelassen aus einem Meter Höhe, auf den Erdboden schlägt.

Die Antwort auf die Frage, welchen Naturphänomenen die Partikel ihre hohen Energien verdanken, fällt den Astrophysikern bis heute schwer. Klar ist immerhin, dass in solchen kosmischen Beschleunigern extreme physikalische Bedingungen herrschen müssen. Auffälligerweise folgt die Verteilung der Teilchenenergien einem Potenzgesetz: Partikel mit niedriger Energie beobachten die Forscher wesentlich häufiger als solche mit sehr hoher Energie. So treffen pro Minute und Quadratmeter einige Dutzend Teilchen auf die Atmosphäre, die immerhin rund 10^{12} eV aufweisen. Von den energiereichsten Partikeln erreichen uns indessen nur wenige pro Jahr und Quadratkilometer.

»Thermische« Energieverteilungen, wie sie etwa bei der von Sternen ausgehenden Strah-

Und welche Art von nichtthermischen kosmischen Objekten sind dort zu finden?

Im Lauf der Zeit haben Wissenschaftler eine ganze Reihe von Modellen aufgestellt. Ihren Überlegungen zufolge gelten explodierende Sterne als eine Hauptquelle der kosmischen Teilchenstrahlung. Bei solchen Supernovae wird Materie weit in den Raum hineingeschleudert. Diese Teilchenwolken – ihre Masse beträgt ein Vielfaches der Sonnenmasse, und sie durchqueren den Raum mit Geschwindigkeiten von mehreren tausend Kilometern pro Sekunde – führen ein starkes Magnetfeld mit sich und erzeugen Stoßwellen, sobald sie mit dem umgebenden Medium zusammenprallen. Das Magnetfeld in diesen Stoßwellen kann geladene kosmische Partikel tatsächlich so stark beschleunigen, wie wir dies beobachten.

Kandidaten für kosmische Beschleuniger sind auch kompakte Überreste von Supernovae, nämlich Pulsare, Schwarze Löcher und die ins All geschleuderten Gashüllen ihrer Vorläufersterne. Außerhalb unserer Milchstraße suchen die Forscher ebenfalls: in Regionen kollidierender Galaxien, in dem heißen Gas, das den Raum zwischen den Sternsystemen

Forscher suchen die Superbeschleuniger: Supernovaüberreste mit ihren ins All geschleuderten Gashüllen

lung auftreten, besitzen ein Maximum, dessen Wert vor allem von der Temperatur des Körpers abhängt. Photonen höherer sowie niedriger Energien werden in diesem Fall deutlich seltener gemessen. Das Potenzgesetz deutet hingegen auf »nichtthermische« Quellen hin: Die Teilchen standen zum Zeitpunkt ihrer Beschleunigung also nicht im thermischen Gleichgewicht mit ihrer Umgebung. Stattdessen müssen sie ihre Energie durch viele aufeinander folgende »Stöße« erhalten haben. Die Beschleunigungsmechanismen, die dort am Werk sind, glauben theoretische Astrophysiker zwar mittlerweile recht gut zu verstehen. Doch gleich tut sich die nächste Frage auf: Wo genau laufen diese Mechanismen ab?



LABORATOIRE D'ANNECY-LE-VIEUX DE PHYSIQUE DES PARTICULES (LAPP)



MPI FÜR KERNPHYSIK / HESS / SUW-GRAFIK

in Galaxienhaufen erfüllt, vor allem aber in den Aktiven Galaktischen Kernen (AGK) anderer Sternsysteme. Denn diese beherbergen Schwarze Löcher mit mehreren Millionen Sonnenmassen, die Materie aus ihrer Umgebung anziehen und Partikel dabei bis fast auf Lichtgeschwindigkeit beschleunigen.

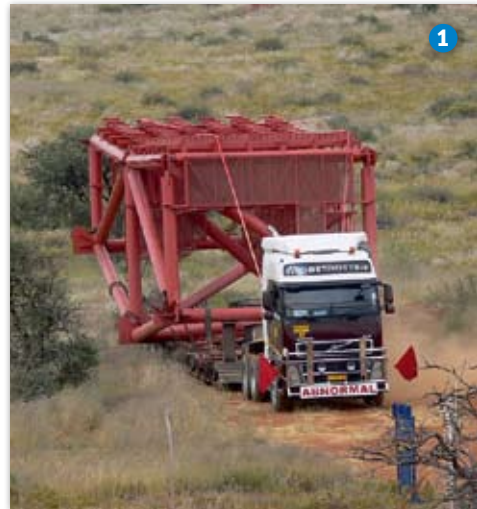
Die meiste Information geht verloren

Um ihre Modelle bestätigen zu können, müssen die Astronomen nun die Quellen der Teilchenstrahlung identifizieren, also die Herkunft der kosmischen Teilchen bestimmen. Magnetfelder in der Milchstraße zwingen die geladenen Partikel jedoch, lange bevor sie die Erde erreichen, auf komplexe, verwirbelte Flugbahnen. Dabei geht jegliche Information über ihre ursprüngliche Richtung und damit über ihren Ursprungsort verloren.

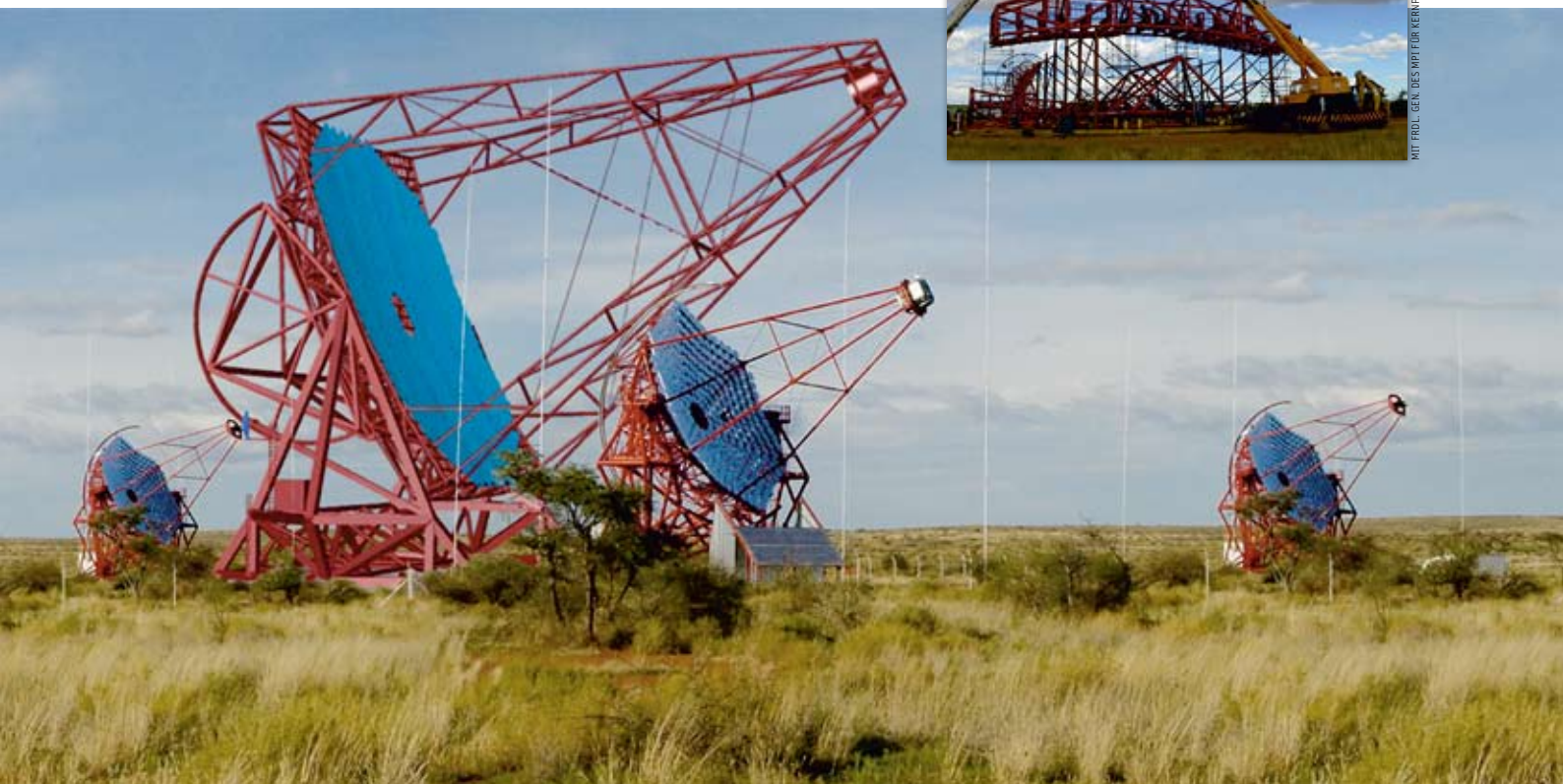
Unbeeinflusst bleiben nur die elektrisch neutralen Photonen, die ebenfalls Teil der kosmischen Strahlung sind. Besonders ergiebig für die so genannte Objektastronomie des nichtthermischen Universums ist die Untersuchung von Gammaphotonen mit Energien von einigen Megaelektronvolt (MeV, 10^6 eV) bis weit in den Teraelektronvoltbereich

Die vier namibischen 12-Meter-HESS-I-Teleskope werden bald durch ein fünftes Teleskop, HESS II, mit einem Spiegel von 28 Meter Durchmesser ergänzt. Dessen stählerne Spiegelträger gelangen derzeit auf Baustelle im namibischen Hochland. Das Foto darunter (2, im Hintergrund ein HESS-I-Teleskop) zeigt die kreisförmigen Schienen, auf denen das Teleskop später rollen wird. Die ersten Spiegelträger wurden schon aufgelegt (3).

Fertig gestellt ist HESS II bislang nur in dieser Fotomontage des französischen Teilchenphysiklabors LAPP (unten), die es inmitten der vier HESS-I-Instrumente zeigt. Stangenförmige Blitzableiter schützen die Anlage vor Gewittern. Ein Kompromiss ist die Farbe der Stahlkonstruktion. Dank ihrer heizen sich die Träger tagsüber relativ wenig auf, nachts wiederum reflektieren sie wenig Licht.



MIT FROL. GEN. BES. MPI FÜR KERNPHYSIK



(10^{12} eV) hinein. Die beobachteten Gammaquanten können also weit mehr als eine Billion Mal energiereicher als Photonen des sichtbaren Lichts sein. Sie entstehen ebenfalls direkt in den kosmischen Beschleunigern, oder zumindest in ihrer Nähe – dort, wo die beschleunigten geladenen Teilchen mit interstellarer Materie wechselwirken. Von hier aber durchqueren die neutralen Photonen das Weltall völlig geradlinig und helfen den Forschern bei der Suche nach ihren Ursprungsorten.

Ein großer Teil der kosmischen Strahlung wird von der irdischen Atmosphäre absorbiert, insbesondere auch Gammastrahlen. (Das ist natürlich gut so, denn die ionisierende Strahlung wäre für Lebewesen tödlich.) Im Raumzeitalter setzen die Wissenschaftler darum auf Satelliten wie Fermi, der im Juni 2008, damals noch unter dem Namen GLAST, in den Orbit befördert wurde (siehe »Ein Fenster zum heißen Universum«, SdW April 2008, S. 34). Er ist das derzeit leistungs-

GRÖSSE TRIFFT SCHNELLIGKEIT – DIE MAGIC-TELESKOPe AUF LA PALMA

Dem Himmel im Gammalicht widmen sich weltweit vier Großprojekte, neben den HESS-Teleskopen (siehe Interview S. 34/35) auch VERITAS in der Wüste von Arizona und das australische CANGAROO-III. Das derzeit größte Tscherenkow-Teleskop der Welt befindet sich aber auf der Kanareninsel La Palma.

MAGIC ist Dreh- und Angelpunkt der Arbeit von rund 150 Wissenschaftlern aus neun Ländern. Unter Federführung des Max-Planck-Instituts für Physik untersuchen sie das Universum im Gammalicht, seit Kurzem sogar mit noch höherer Empfindlichkeit. Zwar war das Major Atmospheric Gamma Imaging Cherenkov Telescope ursprünglich als Einzelteleskop konzipiert worden. Aber jetzt wurde auch sein Zwilling MAGIC II eingeweiht, mit dem es überdies nach dem stereoskopischen Prinzip arbeiten kann.

Bei dieser Gelegenheit rühmten die Forscher nicht nur die ausgefeilte Technik ihres neuen Teleskops. Im Rahmen des begleitenden Kolloquiums gaben sie auch

Einblicke in die Forscherseele. Eckard Lorenz zum Beispiel. Als »Traum und Albtraum« lässt sich zusammenfassen, was der Elementarteilchenphysiker über den langen Weg von der Idee bis zum fertigen Teleskop zu berichten hatte. Lorenz gilt als einer der Väter von MAGIC, arbeitete aber ursprünglich an einem Teilchenbeschleuniger des europäischen Teichenforschungszentrums CERN. Dort hatte er begonnen, sich für die »natürlichen Beschleuniger« im Universum zu interessieren: Schwarze Löcher etwa, Pulsare oder Supernovae. Diese beschleunigen Partikel auf weit höhere Energien als die von Menschenhand gebauten Geräte und versprechen Einblicke in eine neue Physik.



FOTOS DIESER DOPPELSEITE: JAN HATTENBACH

Zwillinge auf dem Roque de los Muchachos: Auf dem Observatoriumsgelände ist links MAGIC I und rechts das jetzt eingeweihte Zwillinginstrument MAGIC II zu sehen. Die Ausleseelektronik befindet sich in dem Gebäude mit dem roten Dach. Das weiße Gebäude beherbergt ein Instrument für die Atmosphärenmessung, gehört aber nicht zum MAGIC-Projekt. Im Wesentlichen sind MAGIC I und II baugleich, etwa hinsichtlich Größe, Fläche und Geschwindigkeit.

Vor einigen Jahren ist Lorenz aber, wie er selbst formuliert, »aus dem Tunnel auf die Berge« gezogen. Mit einer Hand voll Kollegen nahm er dort die Planung eines Teleskops für die energiereiche Gammastrahlung in Angriff. Die Entwicklung war Pionierarbeit und bereitete den Beteiligten einiges Kopfzerbrechen, denn es galt nicht nur technische Probleme zu lösen. Auch die skeptische und bisweilen sogar ablehnende Haltung vieler Forscherkollegen musste Lorenz' Team überwinden. Im

Jahr 2003 wurde aus dem Traum aber Realität: MAGIC I ging an den Start und arbeitet seither erfolgreich.

Dank MAGIC II hat sich nun die Spiegelfläche des Gesamtsystems verdoppelt, und dessen Empfindlichkeit ist gestiegen, so dass auch besonders schwache Strahlung untersucht werden kann. Seine Energieschwelle, die bislang bei 50 bis 60 Gigaelektronvolt lag, dürfte nun auf etwa 40 bis 50 GeV sinken. Weil Satellitenteleskope wie Fermi bis hinauf zu einigen 10 GeV messen können, ist nun fast das gesamte Gammaskpektrum für astronomische Beobachtungen zugänglich.

Die MAGIC-Teleskope bestechen nicht zuletzt durch ihre schiere Größe. Jeder der beiden segmentierten Hohlspiegel verfügt über 234 Quadratmeter aktive Fläche, ihr Durchmesser beträgt jeweils 17 Meter. Der Spiegel von MAGIC II besteht aus 234 quadratischen, beweglich gelagerten Segmenten. Gestützt wird die Konstruktion von einer wabenartigen Struktur aus Kohlefaser, Epoxydharz und Aluminium. Die Brüder sind indessen nur fast Zwillinge: Die Spiegelsegmente von MAGIC I sind kleiner, aber zahlreicher.

Die Erbauer der Teleskope haben viel dafür getan, dass die Teleskope jeweils gerade einmal 70 Tonnen wiegen. Denn dies versetzt sie in die Lage, binnen maximal

Am 25. April wurde MAGIC II eingeweiht – das Foto zeigt den Augenblick, kurz bevor die Bänder durchschnitten wurden. Wind und Wetter ist das Teleskop schutzlos ausgesetzt. Doch die polierten und mit einer Quarzschicht überdampften Aluminiumspiegel sind recht unempfindlich: Die Leistung von MAGIC I hat nicht nachgelassen, obwohl die Spiegel seit 2003 nicht mehr gereinigt wurden.

fähigste Gammastrahlenobservatorium in einer Erdumlaufbahn.

Solche Satelliten ähneln eher Teilchendetektoren als Teleskopen. Denn Gammastrahlen kann man nicht wie Licht bündeln und fokussieren, weil sie zu energiereich sind, um von Linsen gebrochen zu werden. Stattdessen lässt man die Gammaphotonen im Detektor geladene Teilchen erzeugen und zeichnet deren Spuren mit in der Teilchenphysik erprobten Methoden auf. Anschließend werden

Energie und Herkunft des primären Gammaphotons rekonstruiert.

Doch Weltraumteleskope besitzen Detektorflächen von typischerweise nur etwa einem Quadratmeter. Beginnend ab etwa 30 MeV bis hin zu einigen zehn GeV ($1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$) sind die Raten eintreffender Gammaquanten für statistisch signifikante Ergebnisse noch ausreichend hoch. Jenseits davon ist die Zahl der »Treffer« aber zu selten (auch wenn Fermi für Energien bis etwa 300 GeV empfindlich



(Fast) im Fokus: Journalisten und Wissenschaftler – gespiegelt – auf der Plattform hinter der Kamera

MAGIC-Forscher das Geschehen in kürzester Zeit in den Blick nehmen (siehe »Gammablitz in neuem Licht«, SdW 1/2009, S. 14).

Was sie dann registrieren, ist schwaches Tscherenkowlicht (siehe nebenstehenden Artikel), das von den Spiegeln auf extrem empfindliche Kameras fokussiert wird. Mit 576 Fotovervielfachern ist diejenige von MAGIC I ausgestattet, ihr Pendant an MAGIC II verfügt sogar über 1089 dieser Lichtsensoren. Sie weisen selbst bei kürzesten Belichtungszeiten Lichtintensitäten weit unterhalb der menschlichen Wahrnehmungsgrenze nach.

Über optische Kabel gelangen die Daten dann in ein benachbartes Gebäude und werden dort digitalisiert und gespeichert. Hier befindet sich auch die Ausleseelektro-

50 Sekunden jeden beliebigen Punkt am Himmel anzupeilen. Die Astronomen wollen nämlich den nur minuten- oder sekundenlangen Gammablitz (*Gamma Ray Bursts*, GRBs) auf die Spur kommen, die ihnen auch Jahrzehnte nach ihrer Entdeckung weiterhin Rätsel aufgeben. Dank Satellitenfrühwarnsystemen, die das Aufblitzen solcher Blitze melden, können die

nik. Sie nimmt die nur zehn milliardstel Sekunden kurzen Tscherenkowblitze mit einer zeitlichen Auflösung von wenigen milliardstel Sekunden auf und unterdrückt gleichzeitig das »Rauschen«, in diesem Fall störendes Sternlicht. Jede Nacht kommen rund 2,5 Terabyte an Beobachtungsdaten zusammen.

MAGIC auf den Kanaren und HESS in Namibia dienen einem gemeinsamen Ziel. Sie sollen den Boden für ein großes, aus mehreren Dutzend Teleskopen bestehendes Gammastrahlenobservatorium bereiten: das Cherenkov Telescope Array (CTA).

Das tun sie auf unterschiedliche Weise. Während die HESS-Forscher auf bereits verfügbare Technik setzten und so binnen kurzer Zeit ein sehr erfolgreiches Beobachtungsprogramm etablierten, sitzen die MAGIC-Techniker regelmäßig in der Entwicklungswerkstatt. Zurzeit etwa arbeiten sie an einer neuartigen Kamera mit hybriden Fotosensoren, die klassisches Design mit Halbleitertechnologie kombinieren und bislang unerreichte Empfindlichkeit erreichen sollen.

Am Rande der Einweihungsfeier gab Manel Martinez, Vorsitzender des MAGIC-Lenkungsgremiums, auch schon einen kleinen Ausblick auf die Zukunft. Viele der gegenwärtig entwickelten und auf La Palma erprobten Techniken werden beim CTA wohl tatsächlich zum Einsatz kommen. Möglicherweise werden die Forscher sogar nicht einmal auf den Charme der Kanaren verzichten müssen. Einer der Standortkandidaten ist die Nachbarinsel Teneriffa, in Sichtweite von MAGIC. *Jan Hattenbach*



»FIRST LIGHT ÜBER DEN WOLKEN«

Über die Eröffnung von MAGIC II berichtete der Autor online unter www.spektrum.de/artikel/993766.

»WIR STEHEN KURZ VOR EINER ANTWORT«

Das kommende Jahr wird das HESS-Projekt entscheidend voranbringen. Denn mit HESS Phase 2 entsteht bald das größte Gammastrahlungsteleskop der Welt. Wohin entwickelt sich die noch immer junge Gammastronomie? »Spektrum der Wissenschaft« sprach mit Heinrich Völk vom Max-Planck-Institut für Kernphysik.

Spektrum der Wissenschaft: Herr Professor Völk, Sie haben das HESS-Projekt maßgeblich mitgestaltet. Welche Erkenntnisse hat es gebracht?

Heinrich Völk: Der wohl größte Erfolg ist, dass wir vermutlich mehrere Supernovaüberreste als Quellen kosmischer Strahlung identifiziert haben. Es ist uns gelungen, die Gasschalen und damit die Morphologie dieser Quellen aufzulösen und zu zeigen, dass sie tatsächlich Ausgangspunkte energiereicher Gammastrahlung der erwarteten Intensität sind. Wir glauben zudem zu wissen, welche geladenen Teilchen es sind, die diese Gammastrahlung erzeugen. Auch wenn noch nicht alle Kollegen einer Meinung sind, sind doch die entsprechenden Modelle konsistent mit den Beobachtungen. Der Schluss liegt sehr nahe, dass die Strahlung von nuklearen Teilchen, also hauptsächlich Protonen und Heliumkernen, und nicht etwa von Elektronen erzeugt wird.

Jüngst erst haben wir auch SN 1006 im Gammalicht entdeckt (siehe kleines Bild auf S. 29 und Literaturhinweis auf S. 37, *Anm. d. Red.*). Die Veröffentlichung, in der wir die theoretische Interpretation der Daten liefern, ist aber noch in Arbeit.

Spektrum: HESS hat auch die allgemeine Astronomie und die Kosmologie weitergebracht, wie der nebenstehende Artikel beschreibt. Manches, womit man gerechnet hatte, konnte das Teleskop aber offenbar nicht entdecken.

Völk: Starburst-Galaxien beispielsweise mit ihren extrem hohen Sternentstehungsraten haben wir bislang noch nicht gesehen, ebenso wenig wie Merger, Gala-

xien also, die sich auf Grund ihrer Gravitationskraft gegenseitig anziehen und schließlich zu einem einzigen Sternsystem verschmelzen. Auch die Beobachtung ganzer Galaxienhaufen im Gammalicht ist uns bisher nicht gelungen. Diese Quellen sind für HESS vermutlich einfach zu weit entfernt.

Spektrum: Wie steht es um seinen Nachfolger?

Völk: Noch vor einigen Monaten rechnete ich damit, dass HESS II Ende 2009 starten würde. Es kam aber unter anderem zu Problemen mit den industriell gefertigten Präzisionsteilen, außerdem stiegen im letzten Jahr die Stahlpreise enorm. Jetzt wird es wohl bis Mitte 2010 dauern, bis wir die ersten Beobachtungen machen können.

Spektrum: Was wird HESS II sehen?

Völk: Da es in Koinzidenz mit den vier kleineren Teleskopen arbeiten kann, konzentriert das System mehr Licht. Mit seiner Hilfe werden wir also schwächere Strahlung messen als bisher, und die Empfindlichkeit des Gesamtinstruments steigt auf das Doppelte an. Wünschen würden wir uns allerdings einen Faktor fünf bis zehn, aber trotzdem verringern sich die Messzeiten jetzt schon auf bis zu ein Viertel. Auch die Energieschwelle der gesamten Apparatur sinkt um rund die Hälfte auf etwa 70 GeV, vielleicht sogar tiefer.

Spektrum: HESS II ist also nicht das Ende der Fahnenstange?

Völk: Sowohl in technischer als auch in astronomischer Hinsicht ist es ein Zwischenschritt. Das nächste Ziel ist sicher ein Netzwerk aus vielen Tscherenkow-Teleskopen, ein Cherenkov Telescope Array oder CTA.

ist). Im Mittel müssten die Forscher etliche Jahre warten, wenn sie beispielsweise ein Gammaphoton mit 100 TeV nachweisen wollten – die höchste Energie, die bislang im kosmischen Gammabereich gemessen wurde.

Daher verwenden die Astronomen Teleskope auf dem Erdboden, die mit viel größeren Detektorflächen aufwarten können. Direkt »sehen« können sie die kosmischen Photonen zwar auch nicht. Doch die Gammaquanten la-



Heinrich Völk ist emeritierter Direktor am Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg.

Als möglicher Prototyp für spätere CTA-Teleskope spielt HESS II dabei eine wichtige Rolle. Es sind nämlich noch viele Fragen zu Mechanik und Elektronik offen, was die Herstellung solch großer Teleskope und ihres Betrieb im Array angeht. Außerdem wird HESS II auch eine Art Pfadfinderexperiment für die wissenschaftliche Ausrichtung des CTA sein.

Spektrum: Die richtig großen Entdeckungen stehen erst noch bevor?

Völk: Da kann man mit Sicherheit viel erwarten, von ganz neuen Typen von Gammaquellen bis hin zu erweiterten Studien über die bereits bekannten. Schalten wir mehrere Teleskope vom Typ HESS II und weitere kleine in einem CTA zusammen, können wir die Energieschwelle dramatisch bis auf 20 oder 30 GeV senken, während wir nach oben hin 100 TeV überschreiten. Am unteren Ende wird die bodengebundene Gammastronomie also in den Bereich der Satellitenteleskope vorstoßen, auf Grund der weitaus größeren Detektoren aber viel empfindlicher sein.

den ihre Energie in der Erdatmosphäre ab. Durch Wechselwirkung mit Luftmolekülen verwandeln sie sich in ein Elektron und sein Antiteilchen, das Positron. Energie und Impuls des ursprünglichen Quants verteilen sich dabei auf das neu entstandene Teilchenpaar. Dieses wiederum erzeugt weitere, energieärmerere Gammaphotonen. Weil sich der Prozess der Paarbildung vielfach wiederholt, wächst eine Lawine aus immer neuen Elektronen, Po-

Spektrum: Der Baubeginn soll zwischen 2012 und 2014 erfolgen?

Völk: Bis vor Kurzem hielt ich dieses Ziel noch für sehr optimistisch. Vor einigen Monaten räumte ASPERA, das europäische Netzwerk für die Koordination von Großexperimenten im Bereich der Astroteilchenphysik, dem CTA aber die höchste zeitliche Prioritätsstufe ein. Dazu trugen sicherlich auch die Erfolge von HESS, MAGIC und anderen Gammastrahlungsteleskopen bei. Jetzt liegt das CTA sogar noch vor Experimenten zur Neutrinoastronomie oder Gravitationswellenforschung, es könnte seinen Betrieb also durchaus vor 2015 aufnehmen.

Spektrum: Deutschland scheint führend in der Gammaastronomie. Auch MAGIC wird ja von der Max-Planck-Gesellschaft betrieben.

Völk: Letztlich sind beide Projekte große internationale Kooperationen, anders lässt sich das gar nicht leisten. Aber schön ist es natürlich, dass sie unter deutscher Leitung stehen.

Spektrum: Sie stecken schon jetzt viel Arbeit in das CTA. Was fasziniert Sie daran?

Völk: Als ich mich mit der Gammaastronomie zu beschäftigen begann, galt mein Interesse vor allem der Entdeckung des Ursprungs der kosmischen Strahlung. Doch ich glaube, dass bereits die heutigen Teleskope kurz davor stehen, dies anhand der Beobachtung von Supernovae und Pulsaren zu beantworten. Das interessanteste Forschungsgebiet der Zukunft ist für mich daher ein anderes: die nichtthermischen Phänomene bei der Bildung großräumiger Strukturen wie Galaxien und Galaxienhaufen. Ein CTA, das Galaxienhaufen im Gammalicht beobachtet, wird viel dazu beitragen können, dass wir mehr über die Geschichte des Universums und seine Entwicklung lernen. Aber man sollte das CTA nicht nur auf solche Quellen hin konzipieren, sondern im Gegenteil: Wir wollen ja auch unerwartete Quellen finden, und dazu müssen wir einen großen Energiebereich überdecken. Das braucht viele kleine ebenso wie große Teleskope.

Das Gespräch führte Jan Hattenbach.

sitronen und weiteren Photonen an, bis die gesamte Energie des ursprünglichen Quants auf viele hundert oder tausend Teilchen verteilt ist.

Am Ende besitzen die sekundären Gammaphotonen nicht mehr genug Energie zur Produktion weiterer Teilchenpaare, so dass sie die Luftmoleküle nur noch leicht aufheizen und die Lawine einige Kilometer über der Erdoberfläche erstickt. Die Sekundärteilchen sind jedoch fast mit Vakuum-Lichtgeschwindigkeit

unterwegs. Weil sie damit die Phasengeschwindigkeit des Lichts in der Luft übertreffen, erzeugen sie so genanntes Tscherenkowlicht. Das Spektrum dieses ultrakurzen Licht-»Blitzes«, der sich mit bloßem Auge nicht wahrnehmen lässt, erstreckt sich vom infraroten Teil des Spektrums über den gesamten optischen Bereich bis ins Ultraviolette. Ausgestrahlt wird er in einem engen Kegel, dessen Öffnung zur Erde hinzeigt und der entlang der Flugbahn des ursprünglichen kosmischen Gammaphotons ausgerichtet ist. Beim Auftreffen auf den Erdboden besitzt die Kegelöffnung dann einen Durchmesser von etwa 250 Metern.

Auf genau solche Signale wartet das aus vier Instrumenten bestehende HESS-Teleskopsystem in Namibia, das als internationales Projekt unter Leitung des Max-Planck-Instituts für Kernphysik steht. Seit Ende 2003 ist das High Energy Stereoscopic System im Einsatz, 2004 wurde es offiziell eingeweiht, und

»Ein Netzwerk aus vielen Tscherenkow-Teleskopen wird uns viel über die Geschichte des Universums verraten«

Mitte 2010 soll »HESS Phase 2« oder HESS II – ein zusätzliches Instrument mit 28 Meter Spiegeldurchmesser – seine Leistungsfähigkeit noch steigern (siehe Interview links). Dann wird es dem MAGIC-Teleskop auf La Palma (Kasten S. 32/ 33), dem derzeit größten Gammateleskop seiner Art, wieder den Rang ablaufen.

Errichtet ist HESS im namibischen Khomas-Hochland, in etwa 100 Kilometer Entfernung von der Hauptstadt Windhuk. Hier ist die Luft sehr klar und trocken, zudem liegt der Standort etwa 1800 Meter über dem Meeresspiegel. Beides trägt dazu bei, dass die irdische Lufthülle das eintreffende Tscherenkowlicht relativ wenig abschwächt, bevor es auf die Teleskopspiegel trifft. Vorzugsweise beobachten die HESS-Forscher den Zenit, denn dann ist die Abschwächung minimal. Außerdem hat er in diesen Breiten Besonderes zu bieten. Häufig nämlich gelangt hier eine astronomisch besonders attraktive Region in seine Nähe: das Zentrum der Milchstraße.

Die vier HESS-Teleskope besitzen Spiegelflächen von je 107 Quadratmeter und arbeiten in Koinzidenz, fokussieren also die gleichen Objekte. Dadurch wächst die effektive

Spiegelfläche, so dass die Teleskope weniger Belichtungszeit benötigen, als wenn sie dieselbe Quelle einzeln beobachten würden. Zum anderen erhöht sich durch ihre stereoskopische Verschaltung die Genauigkeit, mit der sich die Ursprungsrichtung der Gammaquanten ermitteln lässt. Und schließlich kann ein stereoskopisches System bestimmte Beiträge des Strahlungshintergrunds besser ausfiltern.

Aufleuchten vor dem Hintergrundrauschen

Dieses Rauschen entsteht durch Partikel, die ebenfalls Tscherenkowlicht erzeugen – und das tun im Prinzip alle Bestandteile der kosmischen Strahlung. Teilchenkaskaden, die von schweren Teilchen wie Protonen ausgelöst werden, lassen sich zwar auf Grund ihrer besonderen Struktur relativ einfach von den Gammasignalen trennen. Schnelle Elektronen erzeugen jedoch Teilchenschauer, die von Gammasignalen praktisch nicht zu unterscheiden sind. Erst wenn die Astronomen starke Quellen in den Blick nehmen, »leuchten« diese gewissermaßen vor dem durch die Elektronen verursachten Hintergrundrauschen auf.

Tscherenkowlicht in der Atmosphäre wird aber auch von Myonen produziert. Diese schweren Verwandten des Elektrons dringen als einzige geladene Teilchen bis zur Erdoberfläche vor. Dabei erzeugen sie ebenfalls einen Tscherenkowkegel, den ein einzelnes Teleskop nicht leicht von einem Gammaereignis unterscheiden könnte. Zwar ist die charakteristische Dauer von Myonen- im Vergleich zu

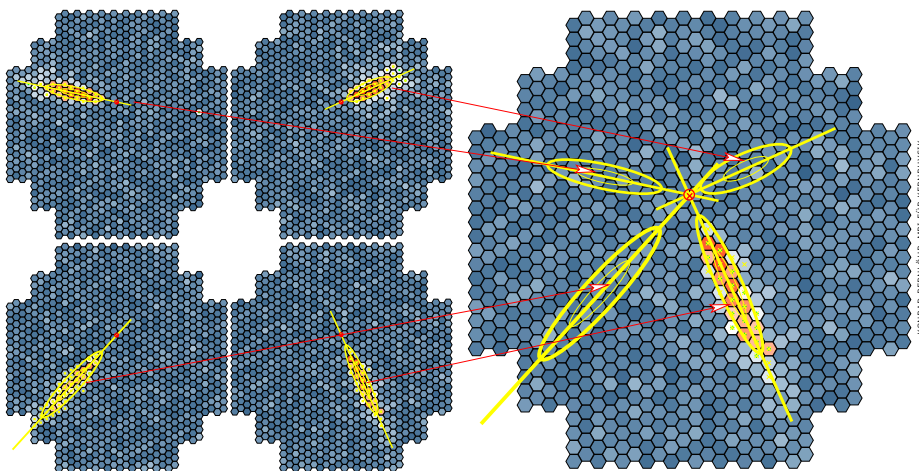
Gammaereignissen kürzer; um sie aber tatsächlich herauszufiltern, wären eine sehr genaue Zeitmessung und extrem umfangreiche Analysen erforderlichlich.

Doch der Durchmesser des Myonenkegels ist auf wenige Meter begrenzt. Der Myonenhintergrund lässt sich also mittels zweier im Abstand von einigen zehn Metern aufgestellten Teleskope trotzdem identifizieren, weil jeweils eines der Instrumente von dem Ereignis nichts bemerkt – anders als bei Gammaquanten, deren großer Kegel meist beide Teleskope erfasst. Indem die Astronomen die Myonenereignisse herausfiltern, senken sie die Schwelle, ab der sie auch Gammaquanten mit geringer Energie noch zuverlässig registrieren.

Diese Energieschwelle liegt bei HESS gegenwärtig zwischen etwa 100 und 150 GeV. Für HESS II allerdings kommt nicht nur ein größerer Spiegel zum Einsatz, auch die Stabilität der Träger und die Elektronik der Kamera wurden optimiert. Indem es zudem mit seinen kleineren Nachbarn verschaltet wird, lässt sich die Energieschwelle des Gesamtsystems voraussichtlich auf rund 75 GeV senken. Doch zwischen diesen Werten und der durch Satelliten nutzbaren Obergrenze klappt dann noch immer eine Energielücke, die erst künftige bodenbasierte Gammastrahlenteleskope werden schließen können.

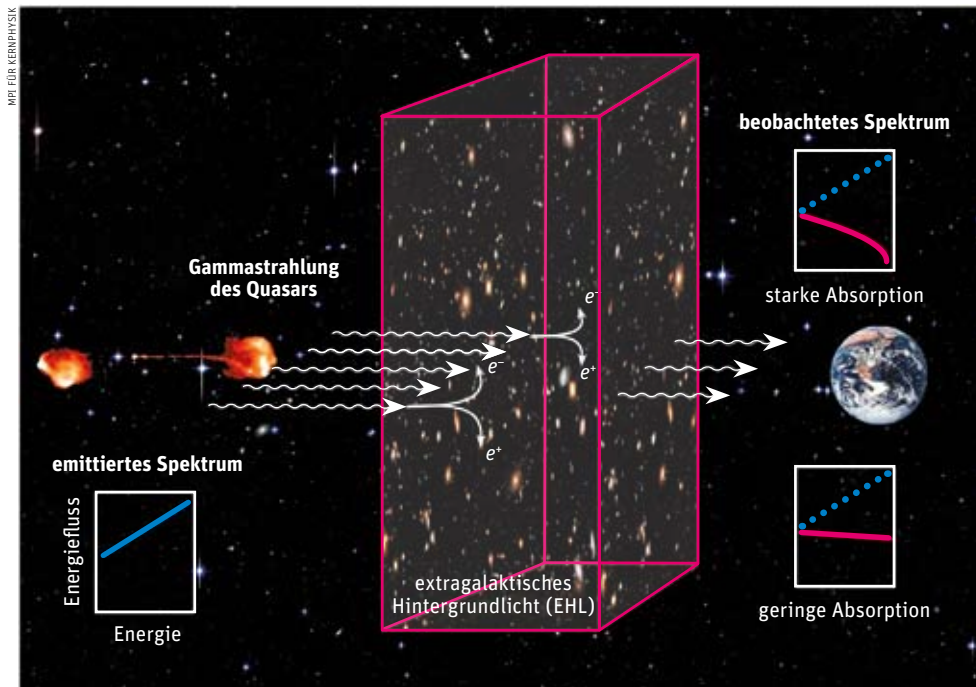
Längst aber zeigte HESS schon, was es kann. Beispielsweise ließen sich damit die Supernovaüberreste RX J1713.7-3946 und RX J0852.0-4622 beobachten, was die Vermutung bestätigt, dass auch die Stoßwellen von Supernovae zu den kosmischen Teilchenbeschleunigern zählen. Außerdem gelang es zum ersten Mal, die räumliche Struktur dieser Quellen im Gammalicht aufzulösen. Das Maß der wissenschaftlichen Herausforderung, das hinter solchen Ergebnissen steckt, können einige Zahlen illustrieren: RX J1713.7-3946 wurde anhand von genau 6702 Gammaphotonen nachgewiesen, die in 62,7 Stunden registriert wurden. Das entspricht gerade einmal 1,8 Photonen pro Minute. Bei der Aufnahme von SN 1006 (siehe S. 29) trafen sogar nur ein bis zwei Photonen pro Stunde ein.

Als HESS die galaktische Ebene der Milchstraße durchmusterte und dabei über 40-mal fündig wurde, entdeckte es auch zahlreiche bislang unbekannte Gammastrahlungsquellen. Einige davon sind so genannte Dunkle Beschleuniger: Sie strahlen offenbar ausschließlich im Gammalicht, ließen sich bislang also in keinem anderen Frequenzbereich beobachten. Insbesondere scheinen sie weder Radio- noch Röntgenstrahlung auszusenden. Das könnte darauf hindeuten, dass dort vor allem Bausteine von Atomkernen, aber kaum Elek-



KONRAD BERNLÖHR, MPI FÜR KERNPHYSIK

Stereo sehen verbessert nicht nur beim Menschen die Wahrnehmung. Die vier HESS-Teleskope fokussieren jeweils dasselbe Objekt. So werden vier Bilder desselben Ereignisses gewonnen (links, jeder Bildpunkt entspricht dabei einem Fotovervielfacher in der Kamera). Die elliptische Form entsteht, weil die Tscherenkowphotonen unter bestimmten Winkeln eintreffen – sie liefert also eine Richtungsinformation. Kombiniert man die Bilder stereoskopisch (rechts), liefert der Schnittpunkt der langen Halbachsen der Ellipsen Information über die Richtung des Teilchenschauers.



Wie sehr schwächt das extragalaktische Hintergrundlicht (EHL) die Gammastrahlung eines Quasars? Um das herauszufinden, treffen Theoretiker Annahmen über das emittierte Spektrum des Quasars (links unten, blau). Dieses wird beim Durchqueren des EHL verändert. Treffen nämlich energiereiche Gammaquanten auf EHL-Photonen, zerstrahlen sie in ein Elektron (e^-) und ein Positron (e^+). Bei geringer EHL-Dichte (rechts unten) weist das beobachtbare Spektrum (rosa) dann eine andere Form als bei hoher EHL-Dichte (rechts oben) auf. Im letzteren Fall gehen vor allem die energiereichsten Gammaquanten verloren.

tronen beschleunigt werden. Der ungewöhnliche Befund – eigentlich rechnen die Forscher stets mit beiden Teilchenarten – lässt sich vielleicht mit den Überbleibseln von Gammastrahlenausbrüchen erklären. Denn in deren extrem starken Magnetfeldern strahlen Elektronen ihre Energie rasch ab, so dass schließlich nur noch die Strahlung der schwereren Teilchen zu beobachten ist.

Die HESS-Daten erlauben auch Rückschlüsse auf das extragalaktische Hintergrundlicht (EHL), nicht zu verwechseln mit dem kosmischen Mikrowellenhintergrund (CMB). Unter dem Begriff EHL ist alles Licht zusammengefasst, das in der Geschichte des Universums von Galaxien ausgesandt wurde. Dieser Strahlungshintergrund versorgt Kosmologen mit Informationen über die großräumigen Strukturen im Universum und ihre Entstehungsgeschichte. Allerdings lässt er sich nicht ohne Weiteres beobachten. So, wie sich die Sterne nicht am helllichten Tag zählen lassen, wird auch das EHL von vielen Vordergrundquellen in unserer eigenen Galaxis überlagert.

Endlich völlig freie Sicht

Also verlegen sich die Astrophysiker auf indirekte Methoden. Das EHL schwächt die von Aktiven Galaktischen Kernen ausgehende Gammastrahlung auf ihrem Weg zur Erde ab. Ist die Energie eines Gammaquants aus einer solchen Region ausreichend hoch, so kann es sich bei seinem Zusammenstoß mit einem Photon des Hintergrundlichts in ein Elektron-Positron-Paar verwandeln. Das Quant geht also verloren, und die Intensität der Gammastrahlung nimmt ab. Damit aber ver-

fügen die Astronomen über ein indirektes Maß für die Dichte des Hintergrundlichts.

So konnten die HESS-Forscher 2006 belegen, dass das Universum für Gammastrahlung etwa doppelt so durchlässig ist wie bislang angenommen. Ihre Daten zur Energiedichte des extragalaktischen Hintergrundlichts stimmen in etwa mit den Ergebnissen anderer Studien überein; dabei wurden aus der Zählung weit entfernter Galaxien untere Grenzen für die EHL-Dichte abgeleitet. Aber auch dem MAGIC-Gammateleskop auf La Palma ist kurz darauf eine Bestätigung dieses Befunds gelungen. In etwa mit den Ergebnissen anderer Studien überein; dabei wurden aus der Zählung weit entfernter Galaxien untere Grenzen für die EHL-Dichte abgeleitet. Aber auch dem MAGIC-Gammateleskop auf La Palma ist kurz darauf eine Bestätigung dieses Befunds gelungen.

Gemeinsam mit HESS und dem im Bau befindlichen HESS Phase II markiert MAGIC (siehe Kasten S. 32/33) hinsichtlich Empfindlichkeit und Winkelauflösung derzeit die Spitze der bodenbasierten Gammaastronomie. Nach wie vor treibt die Astronomie aber der Wunsch um, endlich völlig freie Sicht auf das Gammauniversum zu bekommen. Um die verbleibende Energielücke zu schließen und die Empfindlichkeit der Teleskope weiter zu erhöhen, plant Europa ein Cherenkov Telescope Array (CTA), ein großes Netzwerk aus Tscherenkov-Teleskopen. Vor allem die Max-Planck-Gesellschaft und die französische Forschungsorganisation CNRS engagieren sich dafür, aber auch Japan will sich möglicherweise beteiligen. Denn in einem CTA liegt die Zukunft der Gammaastronomie. Wird es ebenso wie HESS nach dem stereoskopischen Prinzip aufgebaut, könnten die Forscher noch tiefer in den Gammahimmel vordringen – und weitere Überraschungen wären garantiert. <



Jan Hattenbach ist Physiker, Astronom und freier Wissenschaftsjournalist in Aachen.

Naumann-Godo, M. et al.: Discovery of SN 1006 in Very High Energy Gamma Rays with H.E.S.S. In: Proceedings of the 4th International Meeting on High Energy Gamma-Ray Astronomy, Heidelberg 2008.

Völk, H., Bernlöhr, K.: Imaging Very High Energy Gamma-Ray Telescopes. 2009. Preprint unter <http://arxiv.org/abs/0812.4198>.

Weitere Weblinks zum Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/995463.

Fällt er oder fällt er nicht?

Ein Trinkhalm im Sprudelglas steigt auf, weil sich kleine Gasblasen an ihn heften.

»Ich wollte es nicht glauben, als ich zum ersten Mal sah, wie der Strohhalm aus meiner Sodadose aufstieg ...«

Howie

Howie war fasziniert. »Ich wollte es nicht glauben«, sagt Nicholson Bakers Romanfigur in »Rolltreppe oder die Herkunft der Dinge«, »als ich zum ersten Mal sah, wie der Strohhalm aus meiner Sodadose aufstieg und über den Tisch hinaushing, kaum gehalten von den Einkerbungen an der Unterseite der Metallöffnung.« Dann versetzte die unerwartete Levitation den Büroangestellten in Ärger: »Wie konnten die Trinkhalmdesigner einen so elementaren Fehler begehen und einen Trinkhalm konstruieren, der weniger wog als das Zuckerwasser, in dem er stehen sollte?«

Diese Überlegung liegt nahe. Doch hätte Howie so auch erklären können, dass in Saft oder stillem Wasser nichts dergleichen geschieht? Tatsächlich schickt sich der Halm nur in kohlenstoffdioxidhaltigen Getränken an, das Glas zu verlassen. Schauen wir ihm dabei genau zu, erkennen wir, wie er sich allmählich mit zahlreichen, stetig wachsenden Gasbläschen überzieht. Zwar lösen sie sich ab, sobald ihre Auftriebskraft die Adhäsionskraft übersteigt, die sie am Halm festhält. Solange sie jedoch haften bleiben, ziehen sie den Halm mit sich nach oben. Anders gesagt: Er steigt auf, weil »seine« ohnehin geringe mittlere Dichte mit der Zunahme der anhaftenden Bläschen abnimmt. Denn diese müssen nun dem Trinkhalm zugerechnet werden.

Wann ist aber Schluss mit dem Aufsteigen? In dem Maß, in dem der Halm aus dem Wasser auftaucht, verkürzt sich sein eingetauchtes, mit Bläschen überzogenes Ende. Dadurch nimmt die Auftriebskraft ab, und zwar so lange, bis sie gerade so groß ist wie die Gewichtskraft des Trinkhalms – zumindest theoretisch. Denn mit dem allmählichen Kippen des auf dem Glasrand aufliegenden Halms ist es möglicherweise schon früher vorbei, dann nämlich, wenn sein unteres Ende an der Glaswand verankert. Schade, denn so lässt sich aus der Länge des noch eingetauchten Endes nicht erschließen, wie stark sich die mittlere Dichte des Halms durch die anhaftenden Bläschen verringert. Hier hilft nur noch der Griff zur Flasche, denn in ihr kommt es nicht zum Verankern (mittleres Bild).

Dass all diese Effekte nur auf der Sommerterrasse eine Rolle spielen, stimmt übri-



Das linke Glas (Bild oben) enthält fast stilles Wasser, rechts ist noch viel Kohlensäure enthalten. Weil der durch die Auftriebskraft anhaftender Gasbläschen aufsteigende Trinkhalm am Glas verankert oder gar herausfällt, ist die qualitative Betrachtung des Levitationsvorgangs erschwert. Da hilft nur der Griff zur Flasche: Die Länge, um die der Halm aus dem Wasser herausragt (Mitte), liefert ein anschauliches Maß für seinen Auftrieb. Bläschen bilden sich übrigens nur an kleinen Rauigkeiten des Halms (unten).



gens nicht. Von hier mag allenfalls die Inspiration kommen: Eine Rosine in Sprudelwasser beispielsweise sinkt zuerst zum Glasboden, überzieht sich dann aber schnell mit Gasbläschen, von denen sie zur Oberfläche transportiert wird. Dort geht ein Teil der Gasbläschen in die Luft über und die Rosine sinkt wieder ab – ein Vorgang, der sich viele Male wiederholt. Wozu das gut sein soll? Der Schiffbauingenieur Wilhelm Bauer fand es heraus. 1863 holte er erstmals einen gesunkenen Dampfer mit Hilfe von Hebeballons wieder zurück an die Wasseroberfläche. ◁



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



Literaturhinweis: Baker, N.: Rolltreppe oder die Herkunft der Dinge. S. 9. Rowohlt, Reinbek 1993.

Der Fall *Johann F.*

Ungewöhnliche Wege gehen Wissenschaftler, um eine bislang rätselhafte Variante der Alzheimerkrankheit aufzuklären: Sie recherchieren detektivisch in Kirchenarchiven und weiteren Quellen. Die Spur führt sie Jahrhunderte zurück in das Bistum Passau.

In Kürze

- ▶ Wenn die Alzheimerkrankheit relativ früh und gehäuft über Generationen in einer Familie auftritt, ist eine **genetische Ursache** sehr wahrscheinlich. Solche Familien bieten unter anderem die Möglichkeit, noch unbekannte Alzheimergene zu entdecken.
- ▶ Die erste großräumige **historische Bevölkerungsdatenbank Deutschlands**, die auf Informationen aus alten Kirchenbüchern basiert, ermöglichte es, den Stammbaum des zweiten von Alois Alzheimer untersuchten Patienten zu rekonstruieren. Dieser Mann litt an einer **ungewöhnlichen Variante der Krankheit**.
- ▶ Nun hoffen die Mediziner, über noch lebende, aber erkrankte Verwandte der **Ursache dieser Variante** auf die Spur zu kommen. Sie erwarten sich davon Aufschluss über die normalen und gestörten Mechanismen – und neue Ansätze für eventuelle Therapien.

Von Hans-H. Klünemann, Wolfgang Fronhöfer, Erich Fuchs und Herbert W. Wurster

Gerade einmal 54 Jahre alt war Johann F., als er mit schweren geistigen Beeinträchtigungen in die Königliche Psychiatrische Klinik von München eingeliefert wurde. Dort gelangte der Holzhändler in die Obhut von Alois Alzheimer (1864–1915), jenem Arzt und Neuropathologen, nach dem die häufigste Form von Demenz seit 1910 benannt ist. Von 1907 bis 1910 dokumentierte Alzheimer präzise, wie sich die Krankheit seines Patienten entwickelte. So sei Johann F. »vergesslich und schwerfällig«, finde sich nicht mehr zurecht und könne selbst einfache Aufträge nicht mehr ausführen. Stattdessen packe er »seine Bettstücke immer wieder zu einem Bündel zusammen und will damit fort«. Der Nervenarzt beschreibt seinen Patienten als »stumpf, leicht euphorisch«, das Nachsprechen sei noch immer gut, Gegenstände benutze er jedoch oft falsch. »Schon ganz frühzeitig«, hält Alzheimer fest, habe er bei seinem Patienten »eine ausgesprochene Wortverarmung« festgestellt, die sich schließlich »zu einem völligen Verlust der Spontansprache steigerte«.

Im Jahr 1910 stirbt Johann F. Die feingewebliche mikroskopische Untersuchung seines Gehirns offenbart Unerwartetes: Die Verhältnisse in der Hirnrinde unterscheiden sich deutlich von denen bei Auguste Deter. Die 1906 verstorbene Patientin war der erste von Alzheimer beobachtete Fall mit ähnlichen Symptomen einer frühen Demenz (siehe SdW 3/2001, S. 44). Wie dort findet er zwar viele klumpige Ablagerungen, so genannte Plaques,

außerhalb der Nervenzellen – nicht aber die zweite Auffälligkeit, nämlich die typischen faserigen »Bündel« innerhalb der Neurone.

Alzheimer selbst schildert das unerwartete Resultat 1911 so: »Recht bemerkenswert ist die Beobachtung, dass sich in zahlreichen, aus sehr vielen Stellen des Gehirns angefertigten Präparaten nicht eine einzige Zelle finden ließ, welche die von mir beschriebene eigenartige Fibrillendegeneration zeigte. Eine Zellveränderung also, welche in den bisher beschriebenen Fällen ... ungemein häufig vorkam ..., fehlte hier, obwohl die Plaques eine Größe und Häufigkeit zeigten wie in keinem der untersuchten Fälle.« Die mikroskopischen Präparate, die eingefärbten Gewebeschnitte, wurden übrigens zusammen mit weiteren Originalen in den 1990er Jahren in München wiederentdeckt (siehe Bildserie S. 42).

Unverändert bemerkenswert ist der Krankheitsfall Johann F. bis heute. Denn noch immer konnte nicht geklärt werden, was die außergewöhnliche Beobachtung von Alois Alzheimer zu bedeuten hat. Mediziner kennen zwar inzwischen viele weitere Fälle dieser so genannten Plaque-only-Alzheimerkrankheit – doch die in neuerer Zeit beschriebenen Patienten mit der »reinen Plaqueform« waren fast alle im Alter über 80 Jahren verstorben, und ihre Gehirnzellen enthielten oft eine weitere Sorte von Ablagerungen, die für die Parkinsonkrankheit und eine andere Art von Demenz typisch ist (siehe Randspalte S. 43). Unsere Arbeitsgruppe will dieses nahezu ein Jahrhundert alte Rätsel lösen. Die Kernfrage dabei lautet: Handelt es sich bei der reinen Plaqueform der Alzheimerkrankheit möglicherweise um eine Variante, die vererbt wird? Denn dann ließe sich eventuellen ursächlichen Ge-

AUS: KONRAD UND ULRICHE MAURER, ALZHEIMER – DAS LEBEN EINES ARZTES UND DIE KARRIERE EINER KRANKHEIT, PIPER, 1998; MIT FRIEDL. GER. VON KONRAD UND ULRICHE MAURER



Alois Alzheimer – stehend, dritter von rechts, mit seinen Mitarbeitern in München um 1910 – arbeitete dort in der Psychiatrischen Klinik. Zwischen 1907 und 1910 beschäftigte sich der fränkische Arzt und Millionär intensiv mit dem Leiden des bei Einweisung 54-jährigen Patienten Johann F. und dokumentierte dessen Krankheitsverlauf präzise. Im Obduktionsbuch trug er bei dem verstorbenen Mann »Alzheimer'sche Krankheit« ein, der erstmalige Vermerk überhaupt (unten).

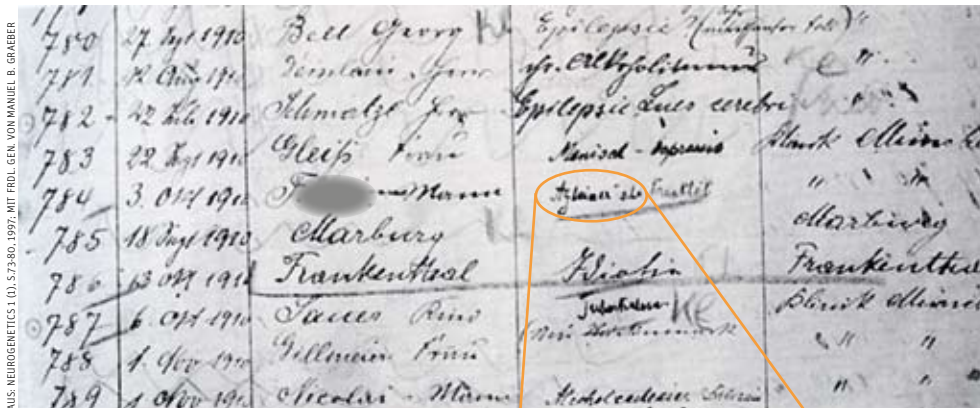
nen und dem besonderen Krankheitsmechanismus leichter auf die Spur kommen.

Auf moderne molekularbiologische Methoden können wir für unsere Untersuchungen nur bedingt zurückzugreifen. Eine komplette Sequenzierung aller bekannten Gene – also ein Bestimmen der Abfolge der Basen und damit der Buchstaben des Genetextes auf dem Erbmolekül DNA – ist bei alten Gewebeschnitten kaum möglich. Zum einen liegt die Erbsubstanz auf Grund der vorangegangenen Konservierung mit Formalin nur noch in Bruchstücken vor, zum anderen müssten fast alle historischen Glasplättchen zerstört werden, um an das dazwischen eingebettete Material heranzukommen. Eine molekularbiologische Analyse von winzigen Proben solch mikrometerdünner Gewebeschnitte hätte nur dann Aussicht auf Erfolg, wenn man zuvor genau weiß, worin der genetische Defekt besteht und wo er im Erbgut zu suchen ist.

Liegt es in der Familie?

Um Licht in das Dunkel zu bringen, betreiben wir aufwändige genealogische Nachforschungen in Kirchenarchiven mit jahrhundertalten Beständen. Wir suchen nach Indizien für eine solche Demenz bei den Vorfahren von Johann F., aber auch nach möglichen Nachfahren, die Träger einer Veranlagung sein können, ohne unbedingt selbst zu erkranken. Diese Ergebnisse wollen wir als Grundlage für nachfolgende humangenetische Analysen nutzen.

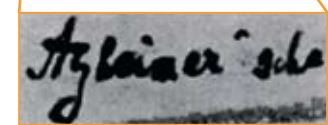
Was macht uns so sicher, überhaupt auf etwas »Genetisches« zu stoßen? Nun, die wesentlichen Erkenntnisse der bisherigen Forschung zur Alzheimerkrankheit an sich sprechen deutlich dafür.



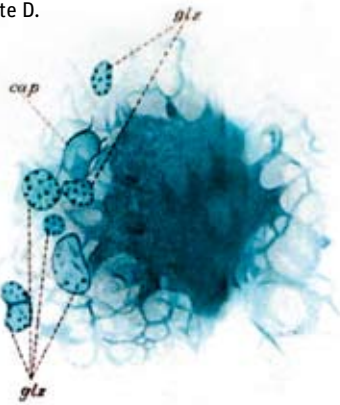
AUS: NEUROGENETICS 1 (1): 573-80, 1997, MIT FRIEDL. GER. VON MANUEL B. GRABER

Das beängstigende Hirnleiden raubt den Betroffenen ihr Gedächtnis, ihren Verstand, ihre Persönlichkeit. Und das alles, weil Nervenzellen in der Hirnrinde in großer Zahl zu Grunde gehen, besonders in beiden Schläfenlappen des Gehirns. Diese Lokalisation erklärt, warum es den betroffenen Menschen immer schwerer fällt, sich zu erinnern, warum ihr Sprach- und Denkvermögen nachlässt. Auch gelingt es ihnen immer weniger, sich zu orientieren oder Gegenstände zu erkennen und richtig zu handhaben. Im letzten Stadium der Erkrankung können sie das Bett nicht mehr verlassen und sind auf ständige Pflege angewiesen.

Wie man inzwischen weiß, lagern sich bei Alzheimerpatienten bestimmte Proteine beziehungsweise deren Spaltstücke auf krankhafte Weise ab. Die Plaques außerhalb der Neurone setzen sich hauptsächlich aus Beta-Amyloid zusammen, einem ungewöhnlichen Spaltstück des so genannten Beta-Amyloid-Vorläuferproteins. Dagegen beruhen die inneren Ablagerungen auf einem Protein namens »tau«. Dieser Eiweißstoff ist normalerweise ein stabilisie-



Plaque im Gehirn von Auguste D.



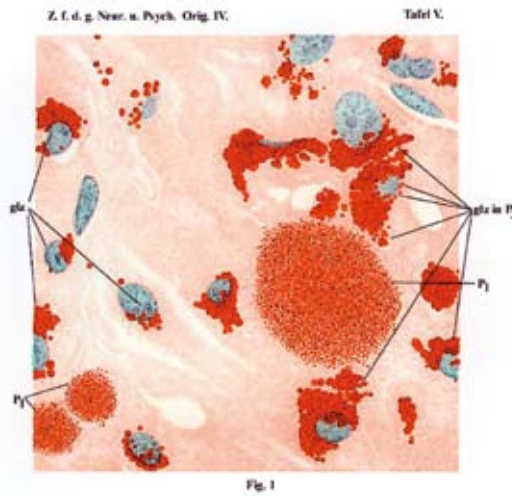
Johann F. erwies sich als ungewöhnlicher Fall. Anders als das Gehirn von Auguste D. (der ersten Patientin) und des Korbmachers R. M. enthielt sein Hirngewebe keine Fibrillenbündel neben den Plaques, Letztere dafür aber besonders ausgeprägt. Bei allen dreien handelte es sich um so genannte präsenile Fälle. Je jünger der Patient, desto höher die Wahrscheinlichkeit, dass eine genetische Belastung vorliegt. Abgebildet sind die historischen Zeichnungen.

- glz Gliazelle
- cap Kapillare
- P1 zentraler Teil, Kern der Plaque
- P2 peripherer Teil, Hof der Plaque

Neurofibrillen im Gehirn des Korbmachers R. M.



Plaques im Gehirn des Johann F., in so genannter Fettfärbung



derem auch beim normalen Alterungsprozess auftreten, aber dann gewöhnlich nicht derart stark. Hinzu kommt, dass die bislang ausfindig gemachten Alzheimergene allesamt wichtig für das Entstehen von Beta-Amyloid sind, dem »Baustein« der Plaques.

Nicht dass Alter und Alterung unerheblich wären: In westlichen Ländern leiden nach einer Studie 1,5 Prozent der Mittsechziger an Morbus Alzheimer, unter den 85-Jährigen sind es dann schon etwa 20 Prozent. Nach dem Alter gilt aber eine familiäre Belastung als bedeutendster Risikofaktor: Bei einem Viertel bis fast der Hälfte der untersuchten Alzheimerpatienten findet sich mindestens ein weiterer Betroffener in der engeren Blutsverwandtschaft. Verwandte ersten Grades tragen ein umso höheres Erkrankungsrisiko, je jünger der Patient war, als sich bei ihm die ersten Symptome zeigten. Andererseits kann sogar bei 80-jährigen eineiigen Zwillingen, deren Erbgut ja identisch ist, trotz Erkrankung des einen Zwillinges der andere verschont bleiben – neben den genetischen muss es also noch weitere, bislang unbekannte Faktoren geben, die für das Auftreten oder Ausbleiben der Krankheit verantwortlich sind.

Fundgrube Kirchenbucharchiv

Insgesamt sprechen die bisherigen Befunde nur bei den seltenen, klar erkennbar familiären Alzheimerformen für eine so genannte autosomal dominante Vererbung. Ein Träger des betreffenden Gens gibt es im Mittel an die Hälfte seiner Kinder weiter, die dann – weil das Gen dominant ist – praktisch durchweg als Erwachsene ebenfalls in einem relativ frühen Alter erkrankt. Identifiziert sind inzwischen dominante Defekte in drei Genen: Eines trägt die Bauanweisung für das Amyloid-Vorläuferprotein APP, die beiden anderen (das Presenilin-1- und das Presenilin-2-Gen) kodieren für Enzyme, die es spalten.

Als zusätzlicher genetischer Risikofaktor gilt das Vorhandensein des Apolipoproteins E4, kurz ApoE4. Es handelt sich um eine Variante eines Proteins, das Cholesterin im Blut transportiert. Besonders hoch ist das Demenzrisiko für Menschen, die reinerbig (homozygot) für E4 sind, also von beiden Elternteilen die entsprechende Genversion geerbt haben. Rund die Hälfte aller Alzheimerpatienten trägt aber andere Varianten und ist nicht einmal gemischerterbig für ApoE4. Die E4-Variante ist also weder hinreichend noch notwendig für das Entstehen einer Alzheimerdemenz. Wohlgedenkt: Hier handelt es sich nicht um einen Gendefekt, sondern um eine Genvariante, wie man sie von den Blutgruppen kennt – etwa nur A, nur B oder mischerbig AB.

render Bestandteil des inneren Gerüsts der Zelle, speziell der Leitschienen für den Transport von Substanzen. Weil Neurone sehr lange Fortsätze besitzen, sind funktionierende Leitschienen für sie besonders wichtig. Im Gehirn verstorbener Alzheimerpatienten sind die tau-Proteine aber meist unnatürlich vernetzt. So sah Alois Alzheimer bei seinem ersten Fall auffällige Ansammlungen von Fibrillen in den Nervenzellkörpern samt ihren Fortsätzen. Als »Bündel«, da noch geordnet, bezeichnete er 1907 die Gebilde in den Zellen, als »Knäuel«, da wirr, wenn die Zellen abgestorben waren.

Tau-Ablagerungen treten jedoch erst nach den Plaques auf. Zudem kommen sie noch bei etlichen anderen Erkrankungen vor, beispielsweise einer Demenzform namens Niemann-Pick-Krankheit vom Typ C. Unter anderem deswegen sehen viele Wissenschaftler die Plaques beziehungsweise deren Vorstufen als bedeutsamer für die Alzheimerkrankheit an – wenngleich diese Ablagerungen unter an-

PLAQUE OBERN UND NEUROFIBRILLEN AUS: F. NISSL, A. ALZHEIMER (HG.), HISTOLOGISCHE UND HISTOPATHOLOGISCHE ARBEITEN ÜBER DIE GROSSHIRNINDE, BD. 3, 1910, GUSTAV FISCHER VERLAG JENA

AUS BEITRAG VON A. ALZHEIMER IN: ZEITSCHRIFT FÜR GESAMTE NEUROLOGIE UND PSYCHIATRIE, 1911, BD. 4, S. 386-385

Die bisher bekannten Gene und ihre Proteine können leider erst eine kleine Zahl der Alzheimererkrankungen erklären. Daher ist es bedeutsam, weitere genetische Einflüsse zu finden. Denn mit jedem erkannten Faktor vergrößert sich die Chance, die Prozesse, die zur Alzheimerdemenz führen, auf molekularer Ebene besser zu verstehen. Damit wachsen die Möglichkeiten, Medikamente zu entwickeln, die gezielt in das Geschehen eingreifen.

Unser Beitrag dazu sind unter anderem intensive genealogische Nachforschungen zu Johann F., dem außergewöhnlichen Patienten von Alois Alzheimer. Sie führten uns nach Passau, in eines der größten deutschen Kirchenarchive. Solche Archive stellen eine ausgezeichnete Quelle dar: Auf Anordnung des Konzils von Trient wurde im 16. Jahrhundert jede katholische Pfarrei verpflichtet, Buch darüber zu führen, wann ein Gemeindeglied geboren wurde, wann es heiratete und verstarb.

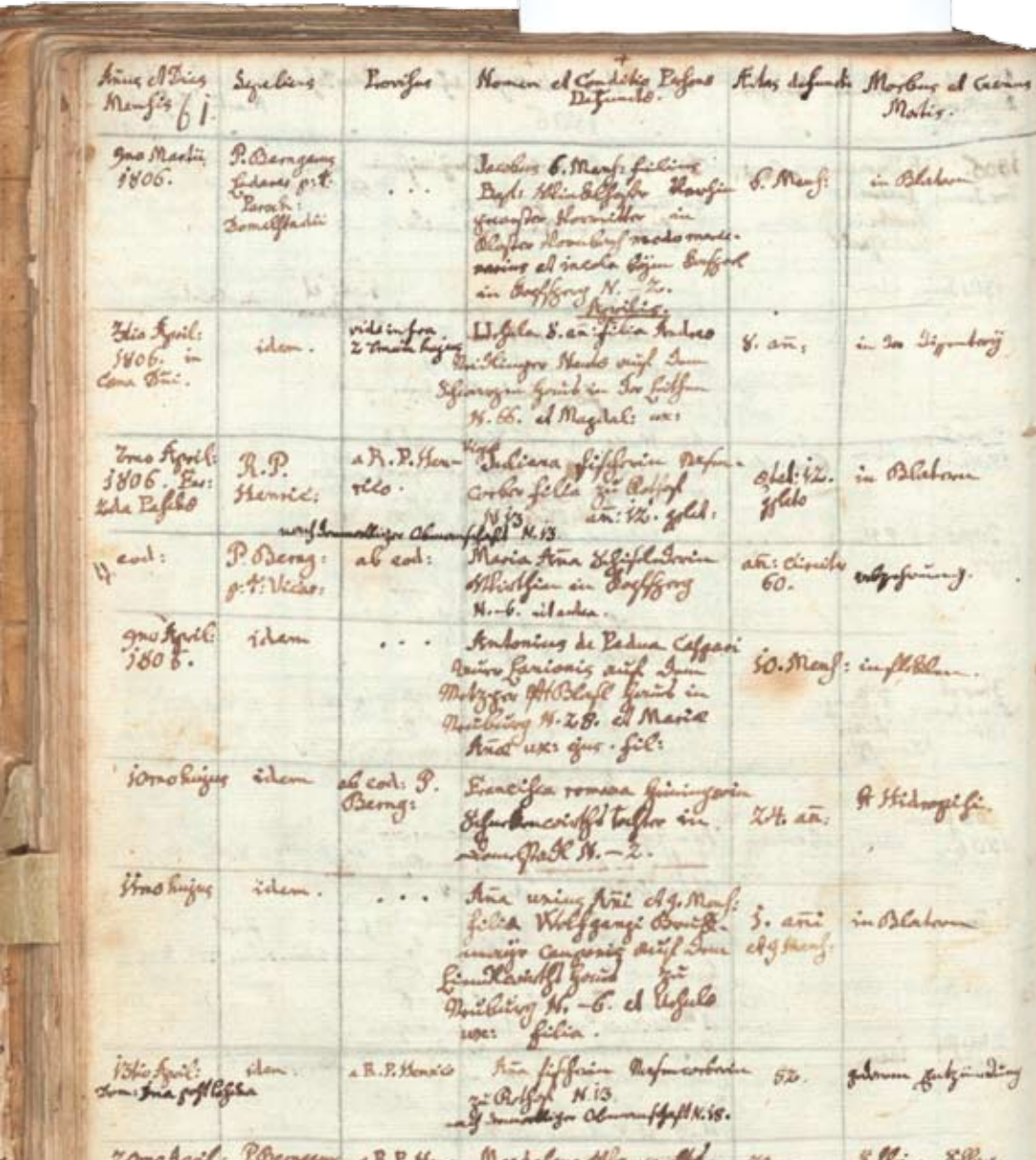
Neben diesen persönlichen Daten, die Verwandtschaftsbeziehungen nachvollziehen las-

sen, bietet ein Teil der historischen Kirchenbücher der Diözese Passau aber für unsere Zwecke ein wichtiges medizinisches Plus: Kraft eines bayerischen Gesetzes von 1792 mussten »die Toten durch einen bewährten Arzt oder einen geschickten Wundarzt« angeschaut werden. Von da an bis 1876 oblag der Kirche dort offiziell die Dokumentation auch der Leichenschau – die Eintragungen geben also Hinweise auf die Todesursache. (Seit 1876 existieren kirchliche und weltliche Personenregister nebeneinander.)

Ein weiterer Vorteil kommt hinzu. Im Südosten Bayerns, wo die Diözese Passau liegt, lebte eine überwiegend bäuerliche Bevölkerung, die kaum durch Zuwanderungen durchmischt wurde. Die genealogische und konfessionelle Situation ist in dieser Region seit dem 16. Jahrhundert bis etwa 1945 nahezu unverändert geblieben, was gleichzeitig bedeutet, dass sich fast die gesamte historische Bevölkerung der Diözese in unseren Quellen, den zentral gelagerten katholischen Pfarrmatrikeln, findet.

DIE REINE PLAQUEFORM

Bei einer US-Studie von 1993 an 147 verstorbenen Alzheimerpatienten zeigte rund ein Viertel der Gehirne die so genannte reine Plaqueform dieser Krankheit. Oft trat allerdings zugleich eine als Lewykörperchen bezeichnete Form von Ablagerung auf. Ob diese auch bei Johann F. vorkam, lässt sich an den wiederentdeckten Präparaten wegen der angewandten Färbemethode nicht erkennen. Michael Graeber am Max-Planck-Institut für Psychiatrie in Martinsried und seine Kollegen veröffentlichten den Fund 1997.



ARCHIV DES BISTUMS PASSAU

Historische Kirchenbücher des Bistums Passau ähnlich dieser Matrikel ermöglichten es, Vorfahren und Nachkommen von Johann F. zu ermitteln. Ein Teil der Pfarrmatrikeln verzeichnete bei Verstorbenen auch das Ergebnis der Leichenschau. Eine Übernahme der verschiedenen Einträge zu Taufe, Heirat, Paten- oder Trauzugenschaft und so fort in eine Datenbank verlangt gute Kenntnis alter Schriften. Zudem muss eine intelligente Software entwickelt werden, die eine sichere Zuordnung der Einträge zu einer bestimmten Person erlaubt, trotz Dialekt- und Schreibvarianten. Ein ergänzender Text mit Abbildung hierzu steht unter www.spektrum.de/artikel/992816.

Diese günstige Überlieferungs- und Erschließungssituation führte zur Etablierung einer Datenbank – ein umfangreiches Projekt, das die Archivare 1997 in Kooperation mit dem Institut für Softwaresysteme in technischen Anwendungen der Informatik der Universität Passau in Angriff nahmen. Es galt zunächst, die Einträge der Tauf-, Trauungs- und Sterbematrikeln aller Pfarreien des Bistums – schätzungsweise sechs Millionen Datensätze – vom Beginn der Überlieferung im späten 16. Jahrhundert bis zum Jahr 1900 in einer einfach zu handhabenden Datenbank zu erfassen. (Die Zeitgrenze hat datenschutzrechtliche Gründe.)

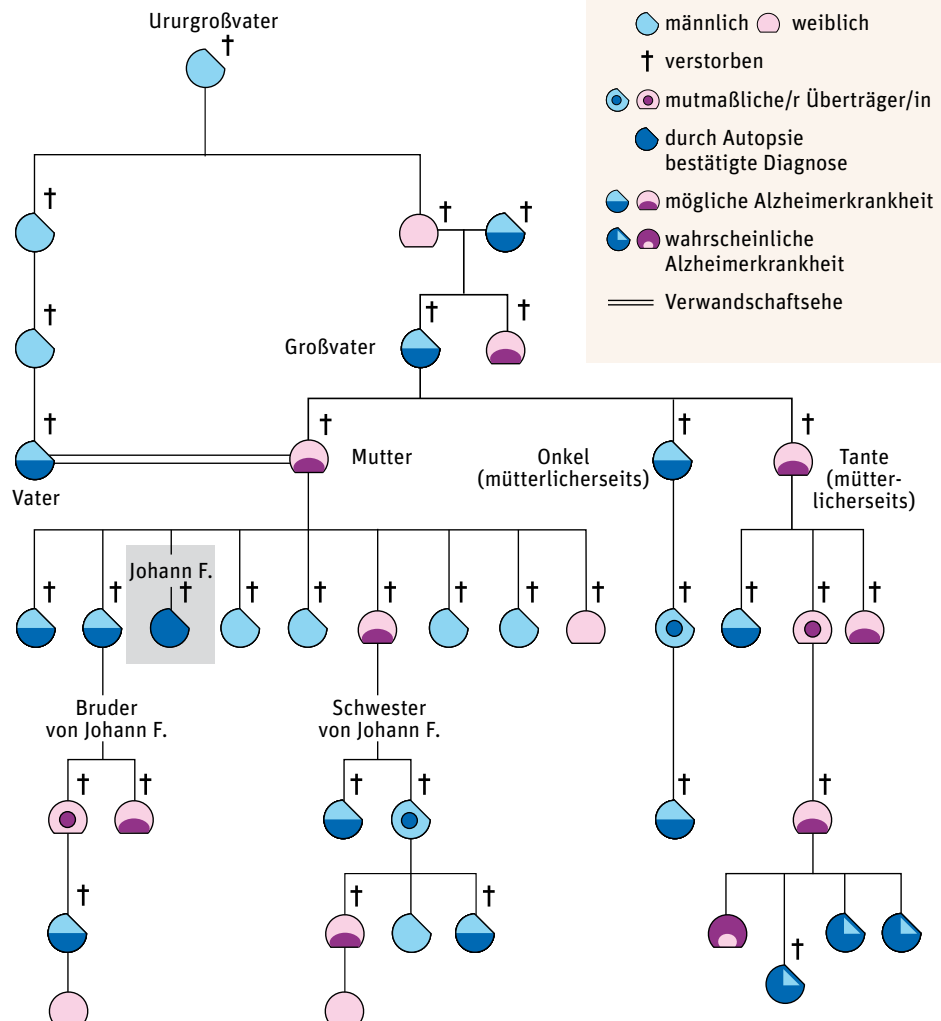
Die Datenbank ermöglichte es schließlich, die Familiengeschichte des Johann F. detailliert nachzuvollziehen. Aus den Angaben seiner Krankenakte ging zunächst hervor, dass er aus dem südlichen Landkreis Passau stammt.

Wie wir aus der Fachliteratur zudem wussten, war in den 1930er, 1950er und 1960er Jahren immer wieder über eine familiäre Häufung der Alzheimerkrankheit in Bayern berichtet worden. Gab es etwa verwandtschaftliche Beziehungen zwischen den in der Fachliteratur beschriebenen Fällen und Johann F.?

Letztlich erwies sich diese Idee als zwar interessante, aber falsche Fährte (immerhin stießen wir dabei auf Fälle mit einer bisher nicht bekannten Mutation im Presenilin-1-Gen). Doch der übrige Ansatz entpuppte sich als richtig. Insgesamt haben wir in den Kirchenbüchern bislang über 1400 Familienangehörige des Johann F. ermittelt, darunter rund 1000 Blutsverwandte. In einer Linie mit etwa 350 Abkömmlingen fanden sich keinerlei schriftliche Hinweise auf eine Hirnerkrankung. In anderen Linien entdeckten wir bisher insgesamt 53 Personen, bei denen davon

EINE FAMILIE MIT PROBLEMEN

Wie dieser vereinfachte rekonstruierte Stammbaum der Großfamilie von Johann F. illustriert, litten etliche Mitglieder bei ihrem Tod an Problemen, die eine Alzheimerkrankheit möglich erscheinen lassen (halb gefüllte Symbole). In der jüngeren Generation gibt es ein Geschwisterquartett, das nach dem Ergebnis von Standardtests wahrscheinlich Alzheimer hat (dreiviertel gefüllt). Einer der Betroffenen, inzwischen verstorben, wies keine Mutationen in bekannten Genen auf, die für bestimmte Demenzformen, darunter Alzheimer, relevant sind. Eine Autopsie seines Gehirns – die als einzige Untersuchung eine definitive Diagnose erlaubt, ob er wie Johann F. an der reinen Plaqueform litt – war nicht möglich.



SPKTRUM DER WISSENSCHAFT / BISKE-GRAFIK, WACH, H. KLÜNNEMANN ET AL. IN: ALZHEIMER DISEASE AND ASSOCIATED DISORDERS, OKT-DEZ. 2006, BD. 28(4), S.291-294

auszugehen ist, dass eine »Geisteskrankheit« zum Tod führte. Ab 1750 belegen die Kirchenbucheinträge, dass etliche der Ahnen des Johann F. an Problemen litten, die auf eine Alzheimerkrankheit hindeuten. Wohlgemerkt: hindeuten. Denn vor 1910 umschrieben die Ärzte das Leiden so, wie sie sich den Krankheitsprozess am besten erklären konnten. Erst 1910 wird die Bezeichnung »Alzheimersche Krankheit« zum ersten Mal eingetragen – und zwar eigenhändig von Alzheimer in das Sektionsbuch der Münchener Psychiatrischen Klinik: als Todesursache bei Johann F. (siehe Abbildung S. 41).

Fortschreitender Sprachverlust

Der erste Vorfahre, der vermutlich an Morbus Alzheimer litt, war einer seiner Urgroßväter mütterlicherseits. Er wurde 1764 geboren und starb mit 68 Jahren an »Wahnsinn«. Der Großvater von Johann F., ein Sohn des Ur-ahns, wurde 66 Jahre alt. Bei ihm ist als Todesursache »Gehirnwassersucht« vermerkt. Eine Schwester des Großvaters – also eine Großtante von Johann F. – verstarb mit 42 Jahren an »Wahnsinn«. Auch die Nachkommenschaft ihres Bruders, des Großvaters, war betroffen (Stammbaum im Kasten links). Drei seiner Kinder, darunter die Mutter von Johann F. nebst dessen Tante, hatten den Aufzeichnungen zufolge typische Symptome, die auf eine Alzheimerkrankheit hindeuten.

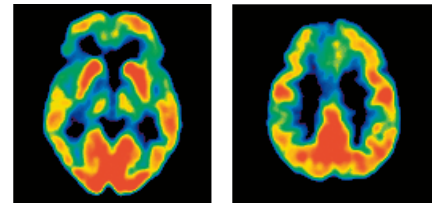
Und der Vater? Vor einiger Zeit entdeckten wir in der Staatsarchiv-Außenstelle Eichstätt auf einer notariellen Urkunde den Vermerk, der damals 67-Jährige habe seine Fähigkeit zu schreiben verloren. Auf einer acht Jahre älteren Urkunde steht dagegen noch seine Unterschrift. Er starb mit 69 an »Marasmus senilis«, was eine langsame Auszehrung aus verschiedenen Gründen bedeuten kann, wie auch einen körperlichen und geistigen Abbau. Ein Schlaganfall dürfte nicht für den Verlust der Schreibfähigkeit und den späteren Tod verantwortlich gewesen sein, wohl eher eine Demenz; denn ein Hirnschlag (»Apoplexie«) war wohlbekannt und wurde häufig als Todesursache in Kirchenbüchern verzeichnet.

Ein Leitsymptom bei der Krankheit seines Sohns Johann F. war der fortschreitende Sprachverlust. Aus der Linie der Tante hatten wir in deren Urenkelgeneration vier Nachkommen ausfindig gemacht, die anscheinend ebenfalls daran leiden (einer ist inzwischen verstorben). Für die Forschung könnte das ein Glücksfall sein, wenn das Gehirn nach dem Tod untersucht werden dürfte. Denn unter den Geschwistern von Johann F. und deren Nachfahren sind zwar weitere Fälle aufgetreten, die auf eine Alzheimerdemenz hindeuten,

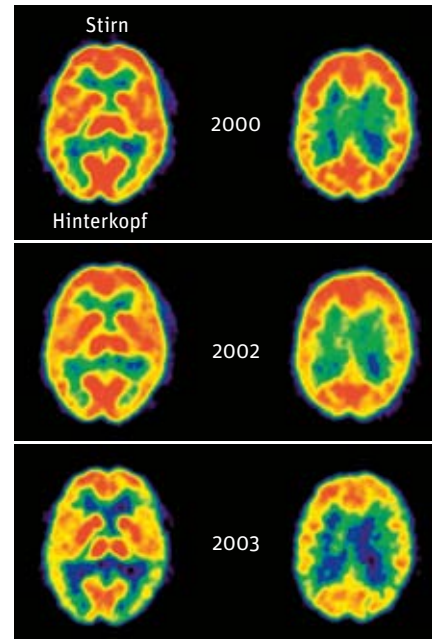
VERÄNDERTE HIRNAKTIVITÄT

Bei einem an Demenz erkrankten Mitglied der Großfamilie F. wurde eine Positronenemissionstomografie (PET) des Gehirns durchgeführt (oben). Dieser Patient besaß keine der bekannten Alzheimermutationen. Die Standardtests machten aber eine Demenz vom Alzheimer-Typ wahrscheinlich. Wie bei der Obduktion des Johann F. von Alois Alzheimer vor rund 100 Jahren dokumentiert, fand sich interessanterweise bei diesem Nachkommen ebenfalls eine ungewöhnlich starke Mitbeteiligung des Stirnhirns, erkennbar an der verringerten Hirnaktivität (rot steht für hohe, blau für niedrige Aktivität in den zwei Schnittebenen).

Anders das PET einer etwa gleich alten Alzheimerkranken mit einer Mutation im Presenilin-1-Gen: Es zeigt in frühen Stadien keine starken Einbußen in dieser Region. Durch das Absterben von Nervenzellen kommt es zum Hirnschwund, gewöhnlich zunächst besonders in den Schläfenlappen des Gehirns.



Demenzpatient der Großfamilie F.



Alzheimerpatientin mit Mutation im Presenilin-1-Gen: Ihre Hirnaktivität verschlechterte sich im Lauf von drei Jahren deutlich, zunächst besonders im Schläfenlappen.

JÖRG MARENHAGEN, NUKLEARMEDIZIN, UNIVERSITÄTSKLINIKUM REGENSBURG, MIT FRIEDRICH VON HANS KLÜBEMANN

doch ein feingeweblicher Befund – ausschließlich er erlaubt eine definitive Diagnose – liegt nur von Johann F. vor.

Inzwischen haben wir im Stammbaum der Großfamilie 24 miteinander verwandte Personen, denen sich zumindest eine mögliche Demenz zuordnen lässt. Das Erkrankungsalter der Betroffenen lag zwischen dem 36. und dem 80. Lebensjahr. Eine Genmutation ist bei dieser familiären Häufung zu vermuten, ihr Vorhandensein lässt die Krankheit aber wohl nicht zwingend ausbrechen. Die Humangenetiker sprechen in solchen Fällen von einer variablen Penetranz, wie sie auch bei manchen Mutationen im Alzheimergen für Presenilin-2 vorkommt.

Die Genanalysen bei dem inzwischen verstorbenen betroffenen Familienmitglied zeigten aber, dass bei ihm zumindest keines der bekannten Alzheimergene mutiert war. Gleiches gilt für zwei andere Gene, die mit weiteren Demenzarten assoziiert sind. Zudem war der Patient nicht reinerbig für die ApoE4-

DER VIERTE FALL

Ein Zufallsfund bei den Recherchen der Autoren war die Personalakte des 63-jährigen Leonhard S. mit Krankenberichten, aufbewahrt im Staatsarchiv Burg Trausnitz. Bei dem Patienten handelt es sich um den vierten der insgesamt fünf Demenzfälle, die Alois Alzheimer und seine Mitarbeiter in den Jahren von 1906 bis 1911 veröffentlichten. Auch Leonhard S. war ein »typischer Fall«, mit sowohl Plaques als auch Fibrillen im Gehirn. Die genealogische Spurensuche führte nach Schwaben, wo sich die Familie seit etwa 1600 nachweisen ließ.

Die Familie Johann F. lässt sich über Jahrhunderte in den Landkreisen Passau und Rottal-Inn nachweisen. Einen Teil der Region zeigt dieser Ausschnitt der ersten bayerischen Landkarte von 1568.



MIT FREUL. GEN. VON HANS H. KLÜNEMANN (KARTE DES PHILIPP APTRAN, INGOLSTADT 1568)

Hans-Hermann Klünemann (o. l.) ist Neurologe und Arbeitsgruppenleiter an der Universitätsklinik für Psychiatrie und Psychotherapie in Regensburg. Sein Forschungsschwerpunkt liegt auf der Alzheimerkrankheit und auf Störungen des Cholesterinstoffwechsels im Gehirn. **Wolfgang Fronhöfer** (o. r.) ist Amtsrat am Archiv des Bistums Passau und spezialisiert auf Genealogie und digitale Erschließung. **Erich Fuchs** (u. l.) ist Informatiker und Geschäftsführer eines Instituts der Universität Passau. **Herbert W. Wurster** (u. r.), Archivdirektor der Diözese Passau, hat seinen Forschungsschwerpunkt auf der Geschichte des Bistums Passau vom Mittelalter bis zur Gegenwart.

Alzheimer, A.: Über eigenartige Krankheitsfälle des späteren Alters. In: Zeitschrift für die gesamte Neurologie und Psychiatrie 4, S. 356 – 385, 1911.

Klünemann, H.-H. et al.: Characterization of the Kindred of Alois Alzheimer's Patient with Plaque-Only Dementia. In: Alzheimer Disease and Associated Disorders 20(4), Oktober–Dezember, S. 291 – 294, 2006.

Klünemann, H.-H. et al.: Alzheimer's Second Patient. In: Annals of Neurology 52, S. 520 – 523, 2002.

Maurer, K., Maurer, U.: Alzheimer: Das Leben eines Arztes und die Karriere einer Krankheit. Piper, München 1998.

Weblinks unter www.spektrum.de/artikel/992816.

Variante, sondern nur mischerbig. Johann F. war übrigens reinerbig für E3.

Die Erforschung der Familiengeschichten erbrachte noch einen weiteren bemerkenswerten historischen Befund: Die Ursprünge der Familien, bei denen vermutlich eine erbliche Belastung für die Alzheimerkrankheit besteht, liegen in der ehemaligen Enklave des Hochstifts Passau im Herzogtum Bayern am unteren Inn. Seit etwa dem Jahr 1000 bis zum Jahr 1803 war dieses Gebiet von den Nachbarregionen herrschaftlich getrennt: Geheiratet wurde nur selten über die »Staatsgrenzen« hinweg (es gab Heiratsverbote, wenn die Mitgift abzuwandern drohte), die Ehepartner stammten daher eher aus der Enklave selbst, so dass sie häufig mehr oder minder miteinander verwandt waren. Wie die genealogischen Nachforschungen ergaben, haben in den Linien derjenigen Großfamilien, in denen die Alzheimerkrankheit gehäuft auftritt, Heiraten innerhalb der Familie stattgefunden – in der Linie ohne Befund waren hingegen keine Verwandtenehen nachzuweisen. Auch die Eltern von Johann F. waren miteinander verwandt.

In solchermaßen isolierten Bevölkerungsgruppen können vergleichsweise harmlose genetische Defekte zu Verursachern von schweren erblichen Krankheiten werden. Angenommen, eine Person kommt mit einem genetischen Defekt zur Welt, der sich aber nur auswirken kann, wenn zugleich das entsprechende Gen auf dem anderen Chromosom geschädigt ist. Dann erbt durchschnittlich die Hälfte ihrer Kinder zwar eine defekte Genkopie, bleibt aber ebenfalls gesund. Zeugen jedoch spätere blutsverwandte Nachkommen miteinander Kinder, wird es wahrscheinlicher, dass ein Sprössling je ein defektes Gen von Vater und

Mutter vererbt bekommt. Durch Verwandtenehen tritt in solchen Großfamilien die Krankheit dann auffällig oft auf und kann einen dominanten Erbgang vortäuschen.

Was lässt sich aus den bisher gewonnenen Daten folgern? Unsere Hypothese ist, dass es in Niederbayern eine familiär gehäuft auftretende Form der Alzheimerkrankheit geben muss, die präsenil – vor dem 65. Lebensjahr – ausbricht und sich in der feingeweblichen Untersuchung des Gehirns als reine Plaqueform darstellt. Ihr liegt vermutlich eine noch unbekannt Mutation in einem Gen zu Grunde, das es noch ausfindig zu machen gilt.

Um die Zusammenhänge weiter aufzuklären, sucht unser Team nach Personen mit Verfahren aus der Diözese Passau, die vergleichsweise jung – das heißt vor dem 70. Lebensjahr – an Morbus Alzheimer erkrankt sind. Nach eingehender Aufklärung und schriftlicher Einwilligung soll dann geprüft werden, ob die Probanden zu den Verwandten des Johann F. gehören. Wenn dies der Fall ist, wird das Blut der Betroffenen und ihrer Familien einer genetischen Untersuchung unterzogen – in der Hoffnung, das verantwortliche Gen dingfest zu machen.

Um die in Frage kommende Personen-Gruppe zu erreichen, muss das Forschungsvorhaben bei Ärzten, Fachpersonal und in der Öffentlichkeit bekannt gemacht werden. Dies geschieht unter Mithilfe der regionalen Presse, durch Fachvorträge oder in Zusammenarbeit mit dem Bayerischen Fernsehen, das einen Dokumentarfilm erstellte. Auf diese Weise hoffen wir, betroffene Familien zu finden, die uns dabei helfen können, den »Fall Johann F.« und die mysteriöse »Plaque-only«-Alzheimervariante aufzuklären. <

Der Mann am GENSCHALTER

Der Molekularbiologe Rudolf Jaenisch vom Bostoner MIT erforscht seit bald 40 Jahren das Verhalten von Viren, Genen und Stammzellen.
Ein Gespräch

Von Hubertus Breuer

Acht Uhr morgens. Ich stehe am Empfang des Bostoner Whitehead Institute for Biomedical Research des Massachusetts Institute of Technology (MIT) und bin stolz, frühzeitig vor Ort zu sein. Eine Stunde vor einem Gespräch mit dem Molekularbiologen Rudolf Jaenisch will ich dessen Labor besichtigen. Aber dort herrscht trotz Morgenstunde längst Hochbetrieb. Und natürlich ist auch Jaenisch schon da, außerdem die Pressesprecherin des Whitehead Institute. Im Eilschritt überholt der Forscher uns beide auf dem Korridor, nickt kurz, eine

Schwingtür fliegt auf. Einen Atemzug später kommt der Forscher durch eine andere wieder heraus, dann hastet er weiter den Gang entlang.

Als der weltweit anerkannte Stammzellforscher und Epigenetik-Experte später fotografiert wird – über ein Mikroskop gebeugt, im Kühlraum, in seinem Büro –, will er das Geknipse bald hinter sich bringen. Auch als er über seine Arbeit zu erzählen beginnt, spricht er schnell, allerdings ohne ein rasches Ende zu suchen. Es ist eben eine langer Weg entlang den Stationen seines bisherigen Lebens: von der Kindheit in Schlesien über das Münchner Max-Planck-Institut für Biochemie bis hin zur Professur am Whitehead Institute am MIT, wo er seit einem Vierteljahrhundert sein geistiges Zuhause gefunden hat.

Es waren Mäuse, die Jaenisch Anfang der 1970er Jahre den Weg für seine Forschung wiesen. In das Genom von Mäuseembryos hatte er als junger Molekularbiologe DNA eines Tumovirus eingeführt. Doch statt Krebs zu entwickeln, passierte nichts; die Tiere erkrankten nicht. Auch wenn er das Geheimnis nicht sofort lüften konnte, war es doch klar, dass die Tumorgene deaktiviert sein mussten. So kam Rudolf Jaenisch dem so genannten Epigenom auf die Spur (siehe Infokasten rechts).

Im Jahr 2006 entdeckte Rudolf Jaenisch – zeitgleich mit zwei anderen Forschungsgruppen – auch einen Weg, Körperzellen einer Maus ohne den Umweg über eine Eizelle in so genannte induzierte pluripotente Stammzellen zu verwandeln. Erst im vergangenen März gelang es seiner Arbeitsgruppe, die Hautzellen von Parkinsonpatienten ins Stadium solcher vielseitigen Stammzellen zurückzuführen.



ZUR PERSON

Der 66-jährige Molekularbiologe **Rudolf Jaenisch** studierte an der Universität in München Medizin und promovierte dort ab 1967. Danach arbeitete er als Postdoc am Max-Planck-Institut für Biochemie in München und ging anschließend an die Princeton University. Hier blieb er bis 1972, danach zog es ihn als Assistenzprofessor ans Salk Institute nach La Jolla, Kalifornien. 1977 kehrte er nach Deutschland zurück und leitete bis 1984 die Abteilung für Tumorstudiologie des Heinrich-Pette-Instituts für Experimentelle Virologie und Immunologie an der Universität Hamburg. 1984 folgte er einem Ruf an das Whitehead Institute für biomedizinische Forschung des Massachusetts Institute of Technology.



ALLE FOTOS DES ARTIKELS: SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT / MARK OSTROW

Spektrum der Wissenschaft: Sie haben ein Foto einer Audienz bei Papst Johannes Paul II. an der Wand hängen ... etwas überraschend.

Professor Dr. Rudolf Jaenisch: Ach ja, da war 2003 eine Tagung über Klonieren und Stammzellen im Vatikan. Teil des Programms war eine Privataudienz bei dem damaligen Papst. Johannes Paul II. war bereits schwer an Parkinson erkrankt und wurde im Rollstuhl hereingefahren. Ich fand es schlimm, wie er den Besuchern vorgeführt wurde. Als er dem Papst die Hand schütteln durfte, hat der Molekularbiologe Irving Weissman von der Stanford University nicht gezögert zu sagen, dass wir Wissenschaftler ihm vielleicht helfen könnten, wenn die katholische Kirche die Stammzellforschung unterstützen würde.

Ich bin nicht sicher, ob der Papst das auch verstanden hat. Ich selbst habe bei dieser Tagung einen Vortrag über Stammzellforschung gehalten. Und für den Tagungsband habe ich einen Artikel verfasst. Da hieß es zuerst, das Thema sei zu heiß. Dann, nach vier Jahren, stimmten die Herausgeber der Publikation schließlich doch zu, aber da war das Material bereits veraltet. Das Foto hängt hier mehr zur Unterhaltung.

Spektrum: Aber das ist doch immerhin eine Auszeichnung, eine Privataudienz beim Papst – das hätten Sie sich als Kind doch nicht träumen lassen.

Jaenisch: Sicher, aber welcher Junge will schon wirklich eine Audienz beim Papst haben? Das ist ja nicht gerade der Traum, den man als Kind hegt.

Spektrum: Welche Träume hatten Sie denn?

Jaenisch: Lokführer, Baumeister, Seefahrer, Arzt ... je nach Alter.

Spektrum: Ihre ersten Jahre verbrachten Sie in Wölfelsgrund, einem Höhenluftkurort im damaligen Schlesien.

Jaenisch: Ja. Bereits mein Großvater war dort Arzt. Er hatte in Wölfelsgrund ein Sanatorium gegründet, am Rand des Riesengebirges nahe der Schneekoppe. Mein Vater hat es später übernommen. Wir waren erst im vergangenen Sommer wieder dort, der Ort heißt heute Międzygórze. Aus dem Sanatorium ist ein Hotel geworden, wenn auch leider nicht im besten Zustand. Es heißt aber immer noch Jaenisch-Villa.

Spektrum: Können Sie sich denn noch an den Ort erinnern?

Jaenisch: Rückblickend lässt sich natürlich

GENOM UND EPIGENOM

Als **Genom** wird die Gesamtheit der vererbaren Informationen einer Zelle bezeichnet. Unter **Epigenom** versteht man dagegen den Zustand der gesamten Erbsubstanz und daran gebundener Proteine, und zwar in einem definierten Entwicklungs- oder Aktivierungszustand.

BAKTERIOPHAGEN

Als Bakteriophagen oder in der Kurzform einfach **Phagen** bezeichnet man eine Gruppe von Viren, die auf Bakterien und Archaeen als Wirtszellen spezialisiert sind. Mit einer geschätzten Anzahl von 10^{30} Virenteilchen außerhalb von Zellen (den Virionen) im gesamten Meerwasser sind Phagen die häufigsten Lebewesen der Erde – sofern Viren als Lebewesen angesehen werden.

»In Princeton konnte ich einem Thema nachgehen, auf das ich gerade gestoßen war«



schwer unterscheiden, was übernommene Erzählung und was eigene Erinnerung ist. Ich weiß noch von dem großen Kletterbaum im Garten. Aber als ich 1979 das erste Mal wieder dorthin zurückkam, war der Garten viel kleiner als in meiner Erinnerung.

Spektrum: Ist Ihre Familie bei Kriegsende geflohen?

Jaenisch: Meine Eltern hatten beschlossen, nicht Hals über Kopf vor den Russen zu fliehen. Ärzte sind ja oft nicht so schlecht dran – sie werden ständig gebraucht. Zuerst quartierten sich russische Offiziere bei uns ein, das waren meist gebildete Juden. Es kam die polnische Besatzung, das war auch sehr zivil. Mit einigen der jüdischen Offiziere hat sich mein Vater sogar angefreundet. Die sind dann unter anderem nach Israel ausgewandert – und die Freundschaften konnten weiter bestehen. Im Frühjahr 1946 haben meine Eltern aber doch entschieden, nach Westdeutschland, genauer: nach Celle, zu gehen. Und so reisten wir gen Westen, mit Zügen, Viehwägen – als Kind fand ich das alles toll.

Spektrum: Sie haben später Medizin studiert. Hat Ihr Vater Sie früh dazu animiert, in seine Fußstapfen zu treten?

Jaenisch: Mein Vater hat nicht darauf bestanden, im Gegenteil. Er hat mir sogar eher abgeraten. Er meinte, vielleicht mache ich das nur, um ihm zu gefallen. Ich habe dann in Tübingen Medizin angefangen, in Hamburg das Physikum gemacht, danach ein halbes Jahr in Grenoble studiert und bin dann nach München gegangen.

Spektrum: In München wurde Ihnen aber klar, dass Sie mit der Medizin nicht warm wurden?

Jaenisch: Ja, die Hörsäle waren überfüllt, es war nicht sehr spannend.

Spektrum: Gab es damals schon einen Numerus clausus?

Jaenisch: Damals, glaube ich, noch nicht. Mein Abiturzeugnis war auch nicht herausragend. Aber Pathologie mochte ich recht gern, das geht natürlich schon in Richtung Forschung. Dann habe ich außerdem am Münchner Max-Planck-Institut für Biochemie – das später nach Martinsried umgezogen ist – bei dem Experten für Bakteriophagen (Kasten oben) angeklopft. Das war Peter Hans Hofschneider. Der war sich erst gar nicht so sicher, ob er mich in sein Labor lassen sollte, weshalb er mich erst an einem Kurs teilnehmen ließ.

Spektrum: Was ist an dieser Forschung so spannend?

Jaenisch: Na, ähnlich so, wie man früher mit Lego gespielt hat, konzipiert und entwickelt man etwas und kann es dann selbst testen. Das hat immer unheimlich Spaß gemacht –

bis heute. Und bei Hofschneider habe ich meine Doktorarbeit über DNA-Struktur und die Replikation von Bakteriophagen geschrieben.

Spektrum: Phagenforschung – war das Zufall?

Jaenisch: In der Molekularbiologie, die ja eigentlich erst in den 1960er Jahren geboren wurde, war viel in Bewegung. In Deutschland gab es nur eine Hand voll guter Labore, etwa in Köln das Genetikinstitut, in München das Max-Planck-Institut für Biochemie mit Hofschneider und Wolfram Zilligs Gruppe. Aber eine strategische Entscheidung war das gewiss nicht. Man ging einfach herum und fragte: Was passiert zurzeit Spannendes? Ich denke ohnehin, dass bei jeder Karriere viel Unvorhersehbares und Zufall dabei ist. Aber der Zufall kann durchaus die Richtung vorgeben. Ich habe dann mehrfach mit Hofschneider publiziert.

Spektrum: Was denn?

Jaenisch: Über *E. coli* angreifende Bakteriophagen, auf die Hofschneider spezialisiert war. Da ging es um DNA-Isolierung, Boten-RNA ...

Spektrum: In der Zeit wurde aber nicht nur geforscht: Die 68er-Revolution fand statt. Haben Sie da mitgemacht?

Jaenisch: Nein. Ich habe das selbst kaum mitbekommen. Ich war einfach in meine wissenschaftliche Arbeit vertieft. Außerdem hat die Unzufriedenheit mit dem Universitätsbetrieb die Max-Planck-Institute nicht so erreicht.

Spektrum: Obwohl Sie sich nicht für Medizin begeistern konnten, haben Sie noch Ihre Approbation als Arzt bekommen?

Jaenisch: Ja. Dafür musste ich ein Jahr Assistenzzeit im Krankenhaus ableisten, obwohl ich gar nicht praktizieren wollte.

Spektrum: Und die Forschung?

Jaenisch: Ehrlich gesagt wollte ich die Approbation nur, um das Medizinstudium zu einem ordentlichen Abschluss zu bringen. Mein eigentliches Ziel war allein die Forschung. Mit der Hilfe von Hofschneider haben wir das dann so arrangiert, dass ich pro forma im Krankenhaus auftauchte, in der Inneren Abteilung und in der Chirurgie ein paar Spritzen setzte – so bekam ich die Bestätigung, dass ich assistiert hatte. Gleichzeitig musste ich ihm aber hoch und heilig schwören, nie zu praktizieren. Habe ich auch nie gemacht. Die schwierigste Phase war aber in der Gynäkologie. Da musste ich im OP ran – die setzten mich ein, die Narkose zu geben. Ich hatte noch nie einen Schlauch über Mund oder Nase eingeführt. Ich habe Blut und Wasser geschwitzt. Ging aber alles gut (*lacht*).

Spektrum: Warum sind Sie als Postdoc nach Amerika gegangen?

Jaenisch: Das machte man damals so – gerade in der Molekularbiologie, die ja mit Watson und anderen Forschern in den Staaten begonnen hatte. Ich wusste nur nicht, wohin. Ein Freund empfahl mir das Labor von Arnold Levine an der Princeton University, einem Experten für Tumoviren, vor allem das Simian-Virus 40 (SV40). Also habe ich ihm geschrieben, und er hat mir postwendend geantwortet und mir einen Stipendiums Antrag für die National Institutes of Health (NIH) mitgeschickt, der auch genehmigt wurde.

Spektrum: Und was war Ihr erster Eindruck von Princeton?

Jaenisch: Ein Kulturschock. In München hatten wir ziemlich gut ausgestattete Labore, ordentlich, sauber. Und in Princeton kam ich da in das alte Moffett-Labor; es war in desolatem Zustand. Die Pilze kamen aus den Wänden, die Maschinen waren vergammelt, wir mussten die Reagenzröhrchen selbst mit der Hand abspülen. Ich war überrascht.

Aber dennoch hat mir Princeton die Augen geöffnet. Es gab im Labor kaum Hierarchien. Arnold Levine war von Beginn an offen, an echter Zusammenarbeit interessiert und förderte mich. Wir ergänzten uns auch gut – er war ein brillanter Theoretiker, ich mehr der Experimentalist. Zuerst habe ich die Virusreplikation gemessen, was ich recht gut konnte, da ich bereits mit Phagen-DNA Erfahrung hatte. Aber nach sechs Wochen kam Arnold zu mir und sagte, er ginge für ein halbes Jahr nach Europa und ich solle mich in der Zeit um das Labor kümmern.

Spektrum: Eine tolle Herausforderung ...

Jaenisch: Ja, klar – aber doch sehr, sehr ungewöhnlich. Und ich konnte auf diese Weise einem Thema nachgehen, auf das ich gerade gestoßen war, eine eigentlich schon ältere Arbeit aus dem Jahr 1967 der Embryologin Beatrice Mintz in Philadelphia. Dieses Paper hat mich, ehrlich gesagt, damals umgehauen. Mintz hatte grundlegende embryologische Experimente mit Hilfe von Maus-Chimären durchgeführt, die durch die Zellaggregation von frühen Embryos hergestellt wurden. Der generelle Hintergedanke bei den Chimären war, die Embryogenese zu erforschen. Ihre Ergebnisse waren hochinteressant, aber auch schwer verständlich, was sie wiederum intellektuell spannend machte. Man musste die Arbeit sehr genau lesen. Dieses Paper diskutiere ich immer wieder gerne mit meinen Studenten, erst gestern Abend wieder.

Spektrum: Aber die Arbeit liegt doch lange zurück?

Jaenisch: Sicher, aber es geht um Mintz' Art, naturwissenschaftlich zu denken. Ihre Arbeit ist ein wenig dogmatisch, fast wie ein Roman

geschrieben. In der Tat, eine wissenschaftliche Arbeit würde man heute so nicht mehr schreiben. Die gleichen Fragen, die Mintz vor 40 Jahren zu lösen versucht hat, beschäftigen die Embryologen heute noch – nämlich wie aus einer befruchteten Eizelle die differenzierten Zellen eines Organismus entstehen, obwohl sie doch alle über das gleiche Genom verfügen. Ihre damaligen Schlussfolgerungen basierten auf wenigen konkreten Ergebnissen, und ich konnte ihre Schlüsse nur schwer nachvollziehen. Als ich nun plötzlich mein eigenes Labor hatte, habe ich daher versucht, die gleichen Probleme mit neuen Technologien zu lösen. Zu meiner Überraschung bin ich zu der gleichen Interpretation wie Mintz gekommen.

Spektrum: Aber auf welche Idee brachte Sie Mintz' Arbeit denn genau?

Jaenisch: Ich fragte mich gleich, ob man virale DNA – genauer die schon erwähnte SV40-DNA – in ein frühes Embryo einführen kann, so dass sie letztlich in allen Zellen des Tiers vorkommt. Und ob die Tiere dann nicht nur, wie bisher, Sarkome im Stützgewebe entwickeln würden, sondern auch Tumoren in Leber oder im Gehirn. Mit dieser Idee kontaktierte ich Mintz – ich habe sie einfach angerufen, nicht einmal vorweg einen Brief geschrieben. Und sie hat mich prompt eingeladen. Als ich dort eintraf, schlug ich Mintz also das Experiment vor, und obwohl sie zu Beginn höchst skeptisch war – ein deutscher Professor hätte mich wahrscheinlich hochkant rausgeworfen –, stimmte sie schließlich zu. Auch Arnold Levine gab, als er aus Europa zurückkam, sein Einverständnis dazu. Ich produzierte also in Princeton die SV40-DNA, fuhr dann nach Philadelphia und injizierte sie in Mintz' Labor in Mäuseembryos. Und so machten wir die ersten transgenen Tiere.

Spektrum: Der Anfang einer neuen Forschungsrichtung ...

Jaenisch: Es war zweifellos die wichtigste Erfahrung für meine weitere Karriere. Als wir die DNA in die Embryos injizierten und die ersten transgenen Mäuse geboren wurden, hat mich das auch sofort vom Sockel gehauen – aber keineswegs vor Freude. Denn der Phänotyp der Tiere war völlig normal! Ich konnte kaum glauben, dass sie alle die von mir injizierte Virus-DNA in ihre Zellen integriert hatten. Also musste ich erst einen Weg finden, um nachzuweisen, dass diese DNA tatsächlich in das gesamte Genom integriert worden war. Doch damals gab es noch nicht die Southern-Blot-Methode oder Polymerasekettenreaktion, die wir heutzutage kennen, um Gensequenzen nachzuweisen.

Spektrum: Wie haben Sie das Problem dann gelöst?



»Ein deutscher Professor hätte mich vermutlich hochkant rausgeworfen«

EPIGENETIK

Jaenischs Forschung gilt der Epigenetik. Sie befasst sich mit Zelleigenschaften (dem Phänotyp), die auf Tochterzellen vererbt werden und nicht in der DNA-Sequenz (dem Genotyp) festgelegt sind.



»In Boston fühlte ich einen wahn-sinnigen Druck, zu publizieren«

Jaenisch: Nach meiner Princeton-Zeit bekam ich das Angebot, als Assistenzprofessor an das Salk Institute in Kalifornien zu gehen. Und dort nutzte ich Methoden wie Nick-Translation, mit deren Hilfe die DNA radioaktiv markiert wird, und so genannte Cot-Kurven. Dafür wird die DNA »geschmolzen« und dann wieder in doppelsträngige DNA überführt. Damit konnte ich nachweisen, dass alle Mausproben in der Tat virale DNA hatten. Ich war begeistert.

Spektrum: Haben Sie den Begriff »transgenisch« damals bereits gebraucht?

Jaenisch: Nein, den prägten erst die Molekularbiologen Jon Gordon und Frank Ruddle 1981 in einer »Science«-Publikation. Mich interessierte auch mehr die Frage, warum die Virus-DNA in den Mäusen inhibiert, also unterdrückt wurde. Das musste allerdings erst einmal offen bleiben. Aber am Salk Institute traf ich Kollegen, die Erfahrung mit RNA-Leukämieviren hatten. Diese Retroviren waren nun deshalb sehr interessant, weil ihre DNA über starke Promotoren verfügt. Das heißt, sie wird in Körperzellen hoch exprimiert. Und da machte ich die interessante Beobachtung: Wenn ich Embryozellen in einem frühen Stadium mit Retroviren infizierte, waren die Viren inaktiv; wenn ich die Viren aber in einem späteren, bereits nach Zelltypen differenzierten Stadium einfügte, wurden sie exprimiert und induzierten Blutkrebs. Ein Rätsel.

Spektrum: War das Potenzial der transgenen Methode für die Genabschaltung damals schon erkannt?

Jaenisch: Dass die Viren-DNA in alle Zellen integriert wurde und diese Gene offenbar abgeschaltet werden konnten, war natürlich spannend. Aber viel mehr wussten wir noch nicht – und außer mir hat das damals nicht viele Forscher interessiert. Zu dem Zeitpunkt kam dann ein Angebot, nach Hamburg ans Heinrich-Pette-Institut für Experimentelle Virologie zu kommen.

Spektrum: Wollten Sie denn nach Deutschland zurück?

Jaenisch: Das war eine dieser Entscheidungen, die nicht wirklich durchdacht war. Zwar konnte ich in Hamburg ein eigenes Labor aufbauen, auch waren die Studenten gut, und wir konnten spannende Experimente durchführen. Aber dennoch: Im Vergleich zu Boston oder dem Salk Institute war das wissenschaftliche Umfeld für meine Interessen dann doch weniger anregend.

Spektrum: Was waren das für Versuche?

Jaenisch: Wir züchteten homozygote, also reinerbige Mäuse, die wir mit Retroviren infiziert hatten. Alle Embryos starben. Da war klar: Das Virus hatte ein für die Embryo-

genese wichtiges Gen gestört. Und so überlegten wir – ich und unter anderem eine hervorragende Assistentin, die später am Klon-schaf Dolly mitarbeitete und inzwischen Professorin an der Münchener Universität ist –, welches der 20 000 Gene es sein könnte. Da halfen uns Intuition und Kombination. Wir vermuteten, dass es das Kollagen-Gen sein könnte. Und in der Tat, wir stellten fest, dass in diesen Embryos das Kollagen-Gen, das 70 Prozent des Proteins im Körper herstellt, abgeschaltet war.

Spektrum: Das erklärt doch nicht, wie die Gene abgeschaltet werden ...

Jaenisch: Richtig, doch das habe ich erst erkannt, als ich 1984 ans MIT kam.

Spektrum: Wie kamen Sie denn dorthin?

Jaenisch: Ich erhielt eine Einladung, am MIT einen Vortrag zu halten. Und da hat der Nobelpreisträger Salvador Luria mich 15 Minuten vor dem Vortrag gleich gefragt, ob ich denn Interesse hätte, ans MIT zu kommen. Der Vortrag lief dann nicht so gut, wie ich es mir gewünscht hatte. Ich war durcheinander – und etwas eingeschüchtert. Am MIT waren all diese Nobelpreisträger, nicht nur Luria, auch David Baltimore, Phil Sharp und andere. Zu der Zeit wurde gerade das Whitehead Institute gegründet, das akademisch voll ins MIT eingebunden ist. David Baltimore war der Gründungsdirektor und bot mir eine Stelle an, und da bin ich dann ans Whitehead Institute gegangen. Einmal angekommen, fühlte ich einen wahn-sinnigen Druck, zu publizieren.

Spektrum: Sie lösten das Rätsel, warum die virale DNA, im frühen Embryostadium eingeführt, nicht exprimiert wird.

Jaenisch: Ein brillanter Student, En Li, hatte mit Hilfe der neuen Knock-out-Technologie festgestellt, dass die Gene der Viren-DNA im frühen Embryonalstadium methyliert werden – das heißt: Methylgruppen lagern sich direkt an die Viren-DNA an. Wenn ein Gen nicht methyliert wird (in adulten Zellen etwa), bleibt es aktiv. DNA-Methylierung ist also absolut essenziell für die Entwicklung und die Gesundheit des Organismus – ohne sie sterben Embryos noch als Föten. Danach entdeckten wir viele andere Dinge über Epigenetik. Wir fanden nicht nur, dass Methylierung essenziell für Leben ist. Wir sahen auch, dass sie ebenfalls eine kausale Rolle für Krebsentwicklung und für die genomische Prägung spielt, bei der die Gene des Vaters oder der Mutter aktiv oder inaktiv vererbt werden. Wir hatten also einen ersten wichtigen Baustein des Epigenoms entdeckt, einen wichtigen Kontrollmechanismus unseres Genoms.

Spektrum: Und das ging dann so weiter?

Jaenisch: Wir machten lauter spannende Versuche. Wir hatten immer rund 15 Mitarbeiter im Labor. Die haben schwer geschafft. Wir hatten die Genetik aber schon gut im Griff. Unsere Postdocs haben die ersten Muskelgene ausgeknockt, andere Gene für Krebs oder Neurotrophine, die wichtig für das Überleben von Nervenzellen sind.

Spektrum: Haben Sie Ihre Neuigkeiten immer gleich mit Kollegen ausgetauscht?

Jaenisch: Wenn damals ein neues Experiment gelang, hat man das sofort den Kollegen erzählt, einfach weil es so spannend war. Heute macht das auf Konferenzen niemand mehr, jeder hütet jetzt seine Geheimnisse.

Spektrum: Gab es damals schon Patente?

Jaenisch: Sicher, aber das war uns egal. Was uns interessierte, war die Epigenetik.

Spektrum: Und dann ...

Jaenisch: ... dann kam Dolly. Einige haben Wilmuts Behauptungen erst angezweifelt, aber ich habe das sofort geglaubt. Denn Angela Schnieke, meine frühere Mitarbeiterin, die mit mir die Rolle des Kollagen-Gens entdeckt hatte, war auf der Veröffentlichung Zweitautor. Da wusste ich, dass das korrekt sein musste. Ein Jahr später, 1998, stellte Ryuzo Yanagimachi von der University of Hawaii den ersten Mausklon her. Mir war sofort klar, dass die Technologie, mit der diese Klone geschaffen wurden, auch ein ideales Instrument wäre, um die Epigenetik zu studieren.

Spektrum: Warum das?

Jaenisch: Denken Sie doch nach ... Sie haben den Kern einer differenzierten Zelle – im Fall von Dolly war es eine Euterzelle. Diese wird in die entkernte Hülle einer Eizelle eingesetzt und so umprogrammiert. Während zuerst nur Gene aktiv waren, die zur Produktion von Milch zuständig waren, wird der Kern wieder in eine Stammzelle verwandelt, die sich erneut in alle Zellen eines Organismus ausdifferenzieren kann. Was sich also ändert, ist nicht das Genom, sondern nur seine Programmierung – Epigenetik eben. Ich bin deshalb nach dem Bericht über den ersten Mausklon sofort nach Hawaii geflogen, um mit der Arbeitsgruppe um Yanagimachi zusammenzuarbeiten. Unser Ziel war, die epigenetischen Mechanismen zu studieren, mit denen eine Eizellenhülle es schafft, die Uhr für einen Zellkern auf Start zurückzudrehen.

Spektrum: Und wie schafft die Eizelle das nun?

Jaenisch: Das hat mich viele Jahre beschäftigt. Ein Student von mir, Konrad Hochedlinger, hat 2002 die Frage gelöst, wie man terminal differenzierte Zellen, also Zellen, die das Ende ihrer Spezialisierung erreicht haben, reprogrammieren kann. Nimmt man beispielsweise weiße Blutkörperchen einer Maus, dann

erhält man Zellen, deren Gene als Teil ihrer Differenzierung bereits irreversibel rearrangiert werden – sie sind sozusagen markiert. Als wir aus dieser Zelle erfolgreich eine ganze Maus klonen, konnten wir zweifelsfrei zeigen, dass die Maus in all ihren Zellen auch diese genetische Markierung aufwies. Und im Gegensatz zu Dolly, bei der einige Forscher anzweifelten, ob sie tatsächlich aus einer voll differenzierten Körperzelle geschaffen worden war, gab es hier keinerlei Zweifel mehr.

Spektrum: Ende der 1990er Jahre bis Anfang des Jahrtausends begann auch die ethische Debatte um das Klonen. Sie haben sich da schon bald eingemischt.

Jaenisch: Ja. Zum Beispiel gab es 2001 im amerikanischen Kongress eine Anhörung zur Frage des Klonens von Menschen – ein richtiges Affentheater! Da trat der Führer der kanadischen Sekte der Raelianer in einem Raumanzug auf und erklärte vor dem Kongressausschuss, er wolle unsterblich werden, indem er sein Gehirn auf einen Computer herunterlädt und dann auf seinen Klon überträgt. Aha! Da waren alle ganz baff.

Auch Panayiotis Zavos war anwesend, ein Arzt aus Kentucky. Der hat unglaublich dummes Zeug geredet, ebenso wie die Chemikerin Brigitte Boisselier, auch eine Raelianerin. Zum Glück spricht man von diesen Leuten heute nicht mehr.

Spektrum: Rückblickend ist das eine Farce, aber damals stand einiges auf dem Spiel.

Jaenisch: Ja, das stimmt. Man musste den Leuten verdeutlichen, was fundierte Wissenschaft und was Quacksalberei ist.

Spektrum: Sie haben sich deutlich gegen das reproduktive Klonen ausgesprochen.

Jaenisch: Normale Klone, das zeigt die Forschung, sind die Ausnahme. Die Genexpressionsmuster sind gestört und führen meist dazu, dass in fortgeschrittenem Alter schwere Defekte auftreten. Reproduktives Klonen ist also keine gute Idee, es führt unweigerlich zu Problemen. Aber die Frage des therapeutischen Klonens ist damit ja nicht geklärt – wie man also Stammzellen bekommt, die aus einem Embryo gewonnen werden, der durch den Kerntransfer in eine Eizellenhülle entstand.

Um dieses ethische Problem zu lösen, haben wir 2005 ein Experiment konzipiert, zu dem uns ein Ethiker von der Stanford University, William Hurlbut, angeregt hatte. Hurlbut meinte, ein Embryo, aus dem kein Fötus entstehen kann, aber von dem immer noch Stammzellen gewonnen werden können, sei ethisch vertretbar. Und gemeinsam mit meinem Studenten Alexander Meissner haben wir innerhalb von nur vier Monaten solche Embryos geschaffen, die sich auf Grund eines



ROSLIN INSTITUTE, UNIVERSITY OF EDINBURGH

KLONSCHAF DOLLY

Als »Dolly« kam, erkannte Rudolf Jaenisch sogleich ihre Bedeutung für die Genforschung. Bei Dolly handelte es sich um ein walisisches Bergschaf, dem ersten aus einer ausdifferenzierten Körperzelle geklonten Säugetier. Für die Erzeugung von Dolly durch den britischen Embryologen **Ian Wilmut vom Roslin-Institut** nahe Edinburgh wurden 277 Eizellen mit Zellkernen aus den Euterzellen eines Spendertiers geimpft. Daraus entstanden 29 Embryos, von denen eines, Dolly, überlebte. Leihmutter war auch ein Scottish-Blackface-Schaf. Dolly bekam mehrere Lämmer und erreichte ein normales Schafsalter von über sechs Jahren.

»Embryonale Stammzellen benötigen wir weiterhin als Maßstab«



Hubertus Breuer (links) arbeitet als Wissenschaftsjournalist in Brooklyn/New York. Er erhielt gerade den GlaxoSmithKline-Publizistik-Preis 2009.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/995464.

ausgeschalteten Gens nicht mehr in die Gebärmutter einnisten konnten – Problem gelöst. Wissenschaftlich war das zwar nicht so interessant, aber es war ein Beitrag zu einer ethischen Debatte. Nach Yamanakas Veröffentlichung 2006 war das freilich hinfällig.

Spektrum: Der japanische Mediziner schuf die so genannten pluripotenten Stammzellen direkt – ohne Umweg über eine Eizelle.

Jaenisch: Richtig. Yamanaka demonstrierte, wie man aus einer erwachsenen Körperzelle eine so genannte induzierte pluripotente Zelle direkt kreieren konnte. Er benutzte zwei bestimmte Gene, die wir auch verwendeten, um den Reprogrammierungsprozess in Gang zu setzen, aber er fügte zwei Krebsgene hinzu. Das war brillant und eine wichtige Entdeckung. Es machte den Prozess so viel effizienter. Yamanakas Zellen waren jedoch noch keine richtigen Stammzellen – pluripotent zwar nach seinen Kriterien; aber Tatsache war, es ließen sich daraus keine Klone erzeugen. Später zeigten wir gleichzeitig mit Yamanaka und Hochedlinger, dass sich Mäuse aus reprogrammierten Stammzellen erzeugen ließen. Mehr noch – diese Zellen waren in der Tat ununterscheidbar von embryonalen Stammzellen. Das begeisterte die Fachszene – denn es demonstrierte, dass diese Zellen wirklich pluripotent waren. Und weil es drei Arbeitsgruppen gleichzeitig bewiesen, konnte auch niemand daran zweifeln.

Spektrum: Erledigte sich damit die ethische Debatte um embryonale Stammzellen?

Jaenisch: Ja, jetzt muss zumindest nicht mehr mit harten Bandagen gekämpft werden. Ich glaube zwar nicht, dass wir embryonale Stammzellen für die Therapie brauchen – aber sehr wohl noch als Maßstab, mit dem pluripotente Stammzellen verglichen werden.

Spektrum: Wohin geht die Forschung in den nächsten fünf Jahren?

Jaenisch: Wir arbeiten daran, aus pluripotenten Zellen ausdifferenzierte patientenspezifische Zellen herzustellen und zu analysieren. In-Vitro-Reprogrammierung erlaubt uns zum Beispiel, Hautzellen von einem Patienten mit Parkinson zu nehmen und in pluripotente Zellen zu verwandeln. Diese könnten dann zu den Neuronen differenziert werden, die den Patienten so große Probleme bereiten. Genau das haben wir kürzlich hinbekommen. Jetzt können wir diese komplexe, weit verbreitete Demenzkrankheit in einer Petrischale untersuchen. Amyotrophe Lateralsklerose, eine Erkrankung des motorischen Nervensystems, ist ebenfalls ein Kandidat für diesen Ansatz. Unsere Methode hat enormes Potenzial.

Spektrum: Und wie sieht es mit Therapien aus, etwa von Parkinson?

Jaenisch: Ich glaube, bis dahin ist es noch ein langer Weg. Ich glaube, Knochenmarkserkrankungen könnten mit pluripotenten Stammzellen womöglich behandelt werden, weil die Zellen sich relativ leicht zu ihrem Bestimmungsort bringen lassen. Könnten sie auch für so komplexe Krankheiten wie Parkinson benutzt werden? Was den Transport der Therapiezellen angeht, liegt da die Latte natürlich viel höher. Vor allem beherrschen wir aber auch die Methode noch nicht perfekt, diese pluripotenten Zellen zu spezifischen Körperzellen auszudifferenzieren. Also, die Zelltherapie steht zwar nicht vor der Tür, aber ich bin sicher, dass sie eines Tages realisiert wird.

Spektrum: Zum Thema Forschungsstandort Deutschland: Warum fällt es Deutschland in Ihren Augen schwer, ein kompetitives Umfeld wie beispielsweise hier in Boston zu schaffen?

Jaenisch: Die 68er-Revolution hat die Wissenschaft in Deutschland meines Erachtens zurückgeworfen. Wissenschaft ist nun einmal nicht demokratisch, sondern elitär. Studenten können nicht sagen, wo die Wissenschaft hingehen soll.

Max-Planck-Institute wollen das ja teilweise verwirklichen. Das ursprüngliche Modell war, einen Genius in ein Institut auf der grünen Wiese zu setzen, und der soll dann alle befruchten. Manchmal klappt das, manchmal nicht. Und es hat auch zur Folge, dass die Universitäten oft säuerlich auf die Max-Planck-Institute reagieren, denn sie haben die ganze Arbeit, die Studenten zu unterrichten.

Und dann ist generell auch die Rolle der Verwaltung wichtig. Die Administration des MIT hat ihren Job, weil Professoren Forschungsgelder bekommen und das Gehalt der Verwaltungsleute vom »Overhead« bezahlt wird – den indirekten Kosten. Die Verwaltungsleute hängen also vom Erfolg der Forscher ab, Gelder einzuwerben. In Deutschland sitzen da hingegen Beamte auf Lebenszeit, und für die sind Anträge und eingeworbene Forschungsgelder nur lästig, denn das bedeutet für sie Mehrarbeit. Das ist der Interessenkonflikt. Hier in den USA haben Verwaltung und Wissenschaftler das gleiche Interesse, nämlich Forschungsgelder einzuwerben. Aber das will man an einigen Orten in Deutschland inzwischen auch einführen.

Spektrum: Und vermissen Sie die deutsche Kultur gar nicht?

Jaenisch: Meine deutsche Frau, eine Internistin, sagt immer, es wäre am besten, wenn man morgens in Amerika zur Arbeit und abends in Deutschland nach Hause gehen könnte. Seitdem Barack Obama Präsident ist, kann man sich in den USA auch wieder mehr zu Hause fühlen. <

Der feine UNTERSCHIED

Genetisch weichen wir kaum vom Schimpansen ab. Die Fahndung nach den raren Stückchen DNA, die uns auszeichnen, läuft auf vollen Touren – bereits mit einigen bemerkenswerten Erfolgen.

GETTY IMAGES JAMES BALOG

In Kürze

- ▶ Schimpansen sind die **engsten lebenden Verwandten** des Menschen. Sie haben fast 99 Prozent ihrer DNA mit uns gemein.
- ▶ Ein Trick half, **DNA-Sequenzen** einzukreisen, die **uns zum Menschen machten**. Gesucht wurde nach Abschnitten im menschlichen Genom, die sich am stärksten verändert haben, seit die Abstammungslinien von Menschen und Schimpansen sich trennten.
- ▶ Die Befunde geben zugleich entscheidende Hinweise, wie Menschen und Schimpansen sich trotz **fast identischer DNA-Vorlage** so grundlegend unterscheiden können.

Von Katherine S. Pollard

Wen interessiert nicht der Ursprung des Menschen? Mich jedenfalls schon lange. Daher griff ich sofort zu, als sich vor sechs Jahren die Gelegenheit zum Einstieg bei dem internationalen Forscherteam bot, das dabei war, das Genom des Schimpansen komplett zu entziffern. Ich bin Biostatistikerin und war erpicht darauf, die DNA-Basensequenzen des Menschen und unserer engsten lebenden Verwandten passend untereinanderzulegen, um eine Bestandsaufnahme zu machen. Nicht unerwartet ergab sich dabei eine ernüchternde fast 99-prozentige Übereinstimmung zwischen unserer Spezies und dem Gemeinen Schimpansen (*Pan troglodytes*): Unter den drei Milliarden »Buchstaben« unseres genetischen Grundtextes wurden also grob geschätzt nur 15 Millionen ausgetauscht (eine Hälfte der Differenz), seit sich die Abstammungslinien von Menschen und Schimpansen vor ungefähr sechs Millionen Jahren trennten.

Aus evolutionstheoretischen Überlegungen wird sich der Löwenanteil dieser Veränderun-

gen kaum oder gar nicht auf die biologischen Eigenschaften auswirken; sie verhalten sich neutral. Aber irgendwo unter diesen ungefähr 15 Millionen Basen mussten die Unterschiede liegen, die uns zu Menschen machten. Ich war entschlossen, sie zu finden. Seither haben Wissenschaftler, darunter auch ich, faszinierende Fortschritte erzielt: Wir konnten eine Reihe von DNA-Sequenzen identifizieren, die den Menschen vom Schimpansen abheben. (Der Vergleich bezieht sich hier stets auf die genannte Schimpansenart, nicht auf den Zwergschimpansen, den Bonobo.)

Auch wenn einige Millionen Basen nur einen winzigen Bruchteil des menschlichen Genoms ausmachen, so ist das doch ein weites zu durchsuchendes Feld. Um das Ganze zu erleichtern, schrieb ich ein Computerprogramm, mit dem wir das komplette Genom des Menschen nach DNA-Stücken durchsuchen konnten, die sich seit der Zeit des letzten gemeinsamen Vorfahren von Menschen und Schimpansen am stärksten verändert haben. Da die meisten zufällig auftretenden Mutationen für den Organismus weder günstig noch schädlich sind, sammeln sie sich mit un-



Nur ein Prozent Differenz zwischen Schimpanse und Mensch – das erbrachte der reine Buchstabenvergleich der entzifferten Genome. Wo in der Sequenz verbergen sich nun die Teile, die uns als Spezies einzigartig machen?

gefähr konstanter Geschwindigkeit an. Ihre Anzahl in zwei heutigen Arten spiegelt so den Zeitraum wider, der seit der Aufspaltung der beiden Entwicklungslinien vergangen ist (die Veränderungsgeschwindigkeit wird oft als »Ticken der molekularen Uhr« bezeichnet). Beschleunigt sich dagegen der Wandel – das Ticken – in einem Genomabschnitt, so ist das ein Anzeichen für eine positive Selektion. Denn Mutationen, mit denen ein Organismus besser überleben und sich fortpflanzen kann, werden mit höherer Wahrscheinlichkeit an Folgegenerationen weitergegeben. Mit anderen Worten: Die Teile der genetischen Information, die sich seit Abspaltung unserer Stammlinie am stärksten gewandelt haben, sind am ehesten für die menschliche Entwicklung prägend gewesen.

Teile mit Turboevolution

Im November 2004, nachdem ich mein Programm monatelang von Fehlern befreit und optimiert hatte, konnte ich es an der University of California in Santa Cruz auf einem großen Computernetzwerk laufen lassen. Am Ende hatte ich eine Datei mit einer nach

Rangfolge geordneten Liste solcher schnell evolvierenden Sequenzen. Mein Chef, David Haussler, blickte mir über die Schulter, als ich mir den besten Treffer genauer anschaute: einen Abschnitt aus 118 Basen, der dann bekannt wurde als *human accelerated region 1*, HAR1 (menschliche beschleunigte Region 1). Ich setzte den Genombrowser der Universität ein, ein Computertool, das der visuellen Darstellung des menschlichen Genoms dient und ihm Informationen aus öffentlichen Datenbanken zuordnet. Er zeigte uns zur HAR1-Sequenz die ihr entsprechende von Schimpanse, Maus, Ratte und Huhn – mehr Genome von Wirbeltieren zum Vergleich waren damals nicht entziffert. Wie er ferner fand, hatte man bei früheren Großdurchmusterungsexperimenten schon in zwei Proben menschlicher Gehirnzellen festgestellt, dass die Sequenz dort abgelesen wurde. Bisher hatte aber noch niemand ihr einen Namen gegeben oder sie genauer untersucht. »Wahnsinn!«, riefen wir wie aus einem Mund, als wir begriffen, dass HAR1 zu einem der Wissenschaft unbekanntem Gen gehören dürfte, das im Gehirn aktiv ist.

ZAHLENSPIEL

Ein genetischer Grundtext aus mehr als drei Milliarden DNA-Basen entspricht rund 570 000 lückenlos geschriebenen »Spektrum«-Seiten, ohne die Randspalten.

Mensch und Schimpanse unterscheiden sich bekanntlich in Größe, Organisation, Komplexität und anderen Eigenschaften ihres Gehirns beträchtlich. Aber welche Mechanismen in der Embryonalentwicklung wie der Evolution dem zu Grunde liegen, ist bisher kaum geklärt. HAR1 bot die Aussicht, diesen höchst rätselhaften Aspekt unserer Biologie zu erhellen. Das folgende Jahr verbrachten wir damit, möglichst viel über die Evolution des

Genomabschnitts herauszubekommen, und zwar durch Vergleich bei verschiedenen Arten, darunter zwölf weiteren Wirbeltieren, die damals sequenziert wurden. Ergebnis: Seine Evolution war äußerst langsam verlaufen, bevor Menschen aufkamen. Zwischen Hühnern und Schimpansen, deren Abstammungslinien sich bereits vor rund 300 Millionen Jahren trennten, unterscheidet sich das fragliche Element nur in zwei der 118 Basen, zwischen Menschen und Schimpansen dagegen in immerhin 18, trotz der erst sehr viel späteren Trennung ihrer Linien (siehe Kasten links).

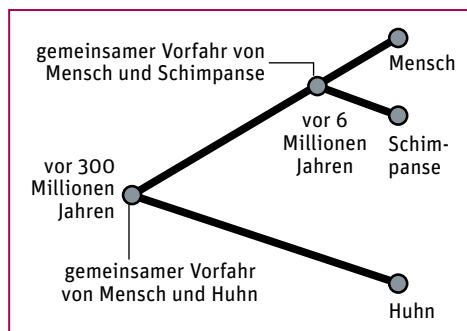
Dass das HAR1-Element über Hunderte von Jahrmillionen hinweg fast unverändert bewahrt wurde, spricht für eine sehr wichtige ihm obliegende Funktion. Seine plötzliche Umarbeitung in unserer Abstammungslinie legt hingegen nahe, dass die Funktion sich beträchtlich veränderte. Welche aber hat HAR1 im Gehirn?

Ein wichtiger Anhaltspunkt ergab sich 2005. Damals erhielt mein Kollege Pierre Vanderhagen von der Freien Universität in Brüssel von uns Kopien von HAR1. Mit Hilfe dieser DNA-Sequenzen konstruierte er eine molekulare Sonde, die mit einer Fluoreszenzmarkierung signalisierte, wann HAR1 in lebenden Zellen aktiv ist – wann also der DNA-Bereich im Zellkern abgelesen und in eine mobile RNA umgeschrieben wird. HAR1 war in Neuronen eines bestimmten Typs aktiv, die während der Embryonalentwicklung eine Schlüsselrolle für die Strukturierung und Gestaltung der Großhirnrinde mit den Furchen spielen. Läuft bei diesen Nervenzellen etwas schief, kann eine schwere, oft tödliche angeborene Störung resultieren. Bezeichnet wird sie als Lissenzephalie – »glattes Gehirn«. Die Hirnrinde der Betroffenen besitzt nicht die charakteristischen Furchen und damit auch eine deutlich verringerte Oberfläche. Fehlfunktionen der gleichen Neurone werden außerdem mit dem Ausbruch einer Schizophrenie bei Erwachsenen in Verbindung gebracht.

HAR1 wäre somit normalerweise zur rechten Zeit und am rechten Ort aktiv, um für die Bildung einer gesunden Hirnrinde entscheidend sein zu können. (Anderen Befunden nach besitzt es möglicherweise zudem eine Funktion bei der Produktion der Samenzellen.) Wie sich aber dieses Stückchen genetischer Information im Einzelnen auf die Entwicklung der Hirnrinde auswirkt, ist noch ein Rätsel, das meine Kollegen und ich unbedingt lösen wollen. Denn der regelrechte Schub an ausgetauschten Basen in HAR1 könnte unser Gehirn während der Evolution beträchtlich verändert haben.

COMPUTERRECHERCHE IM GENOM

Um herauszufinden, welche Teile des Genoms uns zu Menschen gemacht haben, schrieb die Autorin ein Computerprogramm. Es sucht nach den DNA-Sequenzen, die sich seit der Trennung von Menschen- und Schimpansenlinie am stärksten verändert haben. Ganz oben auf der Fundliste rangiert ein 118 Basen langes Stückchen der genetischen Information, das die Bezeichnung *human accelerated region 1* (HAR1) erhielt. Dieser Genomabschnitt erfuhr während eines Großteils der Wirbeltierevolution kaum Veränderungen: Seine Sequenz – die vier Buchstaben stehen für die vier DNA-Basen – unterscheidet sich zwischen Hühnern und Schimpansen nur an zwei, zwischen Schimpansen und Menschen aber an 18 Stellen; der beschleunigte Wandel lässt vermuten, dass HAR1 in unserer Linie eine wichtige neue Funktion erlangte.



T	G	A	A	A	C	G	G	A	G	G	A	G	A	C	G	T	T	A	C
A	G	C	A	A	C	G	T	G	T	C	A	G	C	T	G	A	A	A	T
G	A	T	G	G	G	C	G	T	A	G	A	C	G	C	A	C	G	T	C
A	G	C	G	G	C	G	G	A	A	A	T	G	G	T	T	T	C	T	A
T	C	A	A	A	A	T	G	A	A	A	G	T	G	T	T	T	A	G	A
G	A	T	T	T	T	C	C	T	C	A	A	G	T	T	T	C	A		

Änderungen in der Humansequenz relativ zu der des Schimpansen

T	G	A	A	A	T	G	G	A	G	G	A	G	A	A	A	T	T	A	C
A	G	C	A	A	T	T	T	A	T	C	A	A	C	T	G	A	A	A	T
T	A	T	A	G	G	T	G	T	A	G	A	C	A	C	A	T	G	T	C
A	G	C	A	G	T	G	G	A	A	A	T	A	G	T	T	T	C	T	A
T	C	A	A	A	A	T	T	A	A	A	G	T	A	T	T	T	A	G	A
G	A	T	T	T	T	C	C	T	C	A	A	A	T	T	T	C	A		

Veränderungen in der Schimpansensequenz relativ zu der des Huhns

T	G	A	A	A	T	G	G	A	G	G	A	G	A	A	A	T	T	A	C
A	G	C	A	A	T	T	T	A	T	C	A	A	C	T	G	A	A	A	T
T	A	T	A	G	G	T	G	T	A	G	A	C	A	C	A	T	G	T	C
A	G	C	A	G	T	A	G	A	A	A	C	A	G	T	T	T	C	T	A
T	C	A	A	A	A	T	T	A	A	A	G	T	A	T	T	T	A	G	A
G	A	T	T	T	T	C	C	T	C	A	A	A	T	T	T	C	A		



MENSCH: GETTY IMAGES; SCHIMPANSE: DOBLING; KINDESEXY; HUHNER: GETTY IMAGES; GG UND VIKRI; HAR1

HAR1 ist auch wegen etwas anderem als seiner Evolutionsgeschichte bemerkenswert: Es kodiert für kein Protein. Jahrzehntlang hatte sich die molekularbiologische Forschung fast ausschließlich auf Gene konzentriert, die den Bauplan für Proteine, die Grundelemente der Zellen, tragen. Dank des Humangenomprojekts wissen wir heute, dass proteinkodierende Abschnitte gerade einmal 1,5 Prozent unserer DNA ausmachen. Die restlichen 98,5 Prozent, früher oft als DNA-Schrott abgetan, enthalten teils regulatorische Sequenzen, die anderen Genen den Befehl zum Ein- und Ausschalten geben, teils »RNA-Gene«: DNA-Abschnitte mit der Information für RNA-Moleküle, die nicht in Protein übersetzt werden. (Wenn ein Gen für ein Protein kodiert, stellt die Zelle zunächst eine so genannte Boten-RNA her, die dann als Vorlage zur Synthese des entsprechenden Proteins dient.) Daneben existiert viel »DNA-Schrott«, dessen Zwecke noch kaum bekannt sind.

Wenn das Wo mehr zählt als das Wie

Auf Grund des Basenmusters von HAR1 sagten wir voraus, dass diese Sequenz für eine RNA kodiert, die sich stabil faltert; bestätigen konnten das 2006 Sofie Salama, Haller Igel und Manuel Ares in Santa Cruz durch Laborexperimente. Es stellte sich heraus, dass HAR1 beim Menschen zu zwei überlappenden RNA-Genen gehört. Die gemeinsame HAR1-Sequenz lässt als Produkt eine ganz neuartige RNA-Struktur entstehen und erweitert die bereits bekannten sechs Kategorien von RNA-Genen. Diese sechs Hauptgruppen umfassen mehr als 1000 verschiedene Familien von RNA-Genen, die sich jeweils durch die Struktur der von ihnen kodierten RNA und deren Funktion in der Zelle unterscheiden. Außerdem ist HAR1 der erste belegte Fall einer für RNA kodierenden Sequenz, die offenbar eine positive Selektion durchgemacht hat.

Dass zuvor noch niemand diesem 118-Basen-Element im Genom des Menschen größere Aufmerksamkeit geschenkt hatte, mag überraschen. Aber ohne Verfahren zum leichten Vergleich ganzer Genome konnten Wissenschaftler nicht ahnen, dass HAR1 mehr war als nur irgendein Stück DNA-Schrott.

Aufschlussreich für die Frage, warum Menschen und Schimpansen trotz ihrer großen genetischen Ähnlichkeit so unterschiedlich sind, war auch der Vergleich ganzer Genome weiterer Spezies. In den letzten Jahren wurde das Erbgut Tausender von Arten, meist Mikroorganismen, sequenziert. Der Ort, an dem sich ein Basenaustausch ereignet hat, erwies sich dabei als teils bedeutsamer als die Ge-



samtzahl der Veränderungen. Anders gesagt: In einem Genom muss sich nicht sehr viel ändern, damit eine neue Spezies entsteht. Aus einem gemeinsamen Vorfahren mit Schimpansen entwickelte sich der Mensch nicht dadurch, dass die molekulare Uhr als Ganzes schneller tickte. Das Geheimnis liegt vielmehr im raschen Wandel von Stellen, wo so etwas große Auswirkungen auf die Funktionen eines Organismus hat.

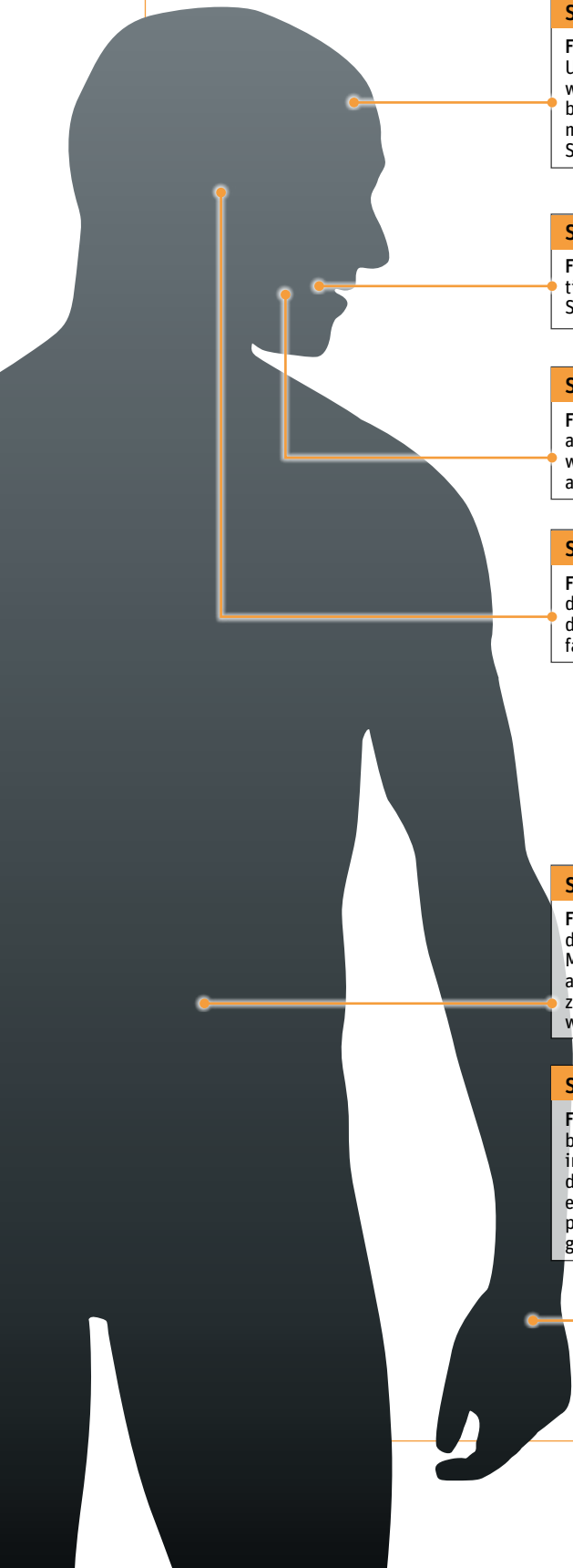
HAR1 ist sicherlich eine solche Stelle, das Gen *FOXP2* eine weitere (siehe Kasten S. 60). Es enthält ebenfalls eine der von mir identifizierten, beschleunigt gewandelten Sequenzen und hat mit der Sprechfähigkeit zu tun. Seine Funktion wurde von Wissenschaftlern der britischen University of Oxford entdeckt: Wie sie 2001 berichteten, sind Menschen mit Mutationen in diesem Gen nicht mehr zu bestimmten subtilen, aber schnellen Bewegungen der Gesichtsmuskulatur fähig, die man zum normalen Artikulieren braucht; die kognitiven Fähigkeiten zur Verarbeitung von Sprache bleiben jedoch erhalten. Die normale DNA-Sequenz weist gegenüber dem Schimpansenpendant mehrere Unterschiede auf: Durch zwei ausgetauschte Basen verändert sich das Proteinprodukt, und viele weitere Austausche dürften beeinflussen, wie, wann und wo es im menschlichen Organismus genutzt wird.

Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für evolutionäre Anthropologie in Leipzig sequenzierten 2007 das *FOXP2*-Gen aus Knochen eines Neandertalers; es hatte dort die gleiche Form wie bei uns heute, so dass dieser vielleicht so sprechfähig war wie wir. Nach neueren Schätzungen über den Zeitpunkt, zu dem sich die Abstammungslinien von Neandertalern und modernen Menschen trennten, muss die neue Form von *FOXP2* somit schon vor mindestens einer halben Million Jahre entstanden sein. Was die menschliche Sprache von der stimmlichen Kommunikation anderer Arten abhebt, hängt jedoch großen-

In einem Genom muss sich nicht sehr viel ändern, damit eine neue Spezies entsteht

DNA DER EIGENEN ART

Die Bemühungen zur Identifizierung speziell menschlicher DNA-Abschnitte förderten eine Reihe von Sequenzen zu Tage, in denen sich unsere Spezies vom Schimpansen abhebt. Eine Auswahl dieser Abschnitte und einige ihrer Funktionen sind hier aufgeführt.



SEQUENZ: HAR1

Funktionen: im Gehirn aktiv; unter Umständen erforderlich für die Entwicklung der Großhirnrinde, die beim Menschen besonders groß ist; möglicherweise auch an der Samenzellproduktion beteiligt

SEQUENZ: GEN FOXP2

Funktion: erleichtert die Artikulation und ermöglicht damit das Sprechen in seiner heutigen Form

SEQUENZ: GEN AMY1

Funktion: fördert den Stärkeabbau und half unseren Vorfahren wohl, neue Nahrungsquellen auszunutzen

SEQUENZ: GEN ASPM

Funktion: steuert die Gehirngröße, die sich während der Evolution des Menschen mehr als verdreifacht hat

SEQUENZ: GEN LCT

Funktion: ermöglicht einem Teil der Menschen die Verdauung von Milchzucker auch im Erwachsenenalter, so dass Milch von Haustieren zu einem Grundnahrungsmittel werden konnte

SEQUENZ: HAR2

Funktion: fördert während der Embryonalentwicklung Genaktivitäten in Daumen und Handgelenk; kann die Geschicklichkeit der Hände erhöht haben – wichtig, um komplexe Werkzeuge zu fertigen und zu gebrauchen

teils nicht von körperlichen, sondern von kognitiven Eigenschaften ab – und die sind oft mit der Gehirngröße korreliert. Im Verhältnis zur Körpergröße haben Primaten allgemein »mehr Hirn«. Sein Volumen hat sich beim Menschen allerdings seit dem letzten gemeinsamen Vorfahren mit Schimpansen mehr als verdreifacht – ein Wachstumsschub, mit dessen Analyse die genetische Forschung erste Fortschritte macht.

Eines der bestuntersuchten Gene, die beim Menschen und anderen Tieren im Zusammenhang mit der Gehirngröße stehen, trägt die Bezeichnung *ASPM*. Bei einer angeborenen Fehlbildung namens Mikroenzephalie ist das Hirnvolumen um bis zu 70 Prozent vermindert. Genetische Untersuchungen an Betroffenen hatten die Rolle dieses und dreier weiterer Gene bei der Steuerung der Gehirngröße offenbart. In jüngerer Zeit konnten Wissenschaftler der University of Chicago und der University of Michigan in Ann Arbor nachweisen, dass *ASPM* während der Evolution der Primaten mehrere Veränderungsschübe durchgemacht hat, was ein charakteristisches Anzeichen für positive Selektion darstellt. Mindestens einer dieser Schübe spielte sich in der Abstammungslinie der Menschen ab – nach ihrer Trennung von der Linie der Schimpansen; somit war er möglicherweise entscheidend für die Evolution unseres massigen Gehirns.

Die Milch macht's

Andere Genomabschnitte dürften diese Entwicklung eher indirekt beeinflusst haben. Unsere Computerliste, auf der HAR1 an oberster Stelle rangierte, führte 201 weitere HARs auf, also beschleunigt veränderte Bereiche. (Eine ähnliche Studie des Wellcome Trust Sanger Institute im britischen Cambridge hatte übrigens viele derselben HARs erbracht.) Die meisten davon kodieren weder für ein Protein noch für eine RNA. Vielmehr scheint es sich bei ihnen um regulatorische Bereiche zu handeln, die das Ein- oder Ausschalten von Genen in ihrer Nähe befehlen. Erstaunlicherweise ist mehr als die Hälfte dieser Nachbarn von HARs an Entwicklung und Funktionieren des Gehirns beteiligt. Und wie bei *FOXP2* regulieren auch ihre Produkte in vielen Fällen weitere Gene. Kurzum: Obwohl die HARs nur einen winzigen Bruchteil des Genoms darstellen, könnten ihre Veränderungen das Gehirn tief greifend gewandelt haben, weil sie sich auf die Aktivität ganzer Gen-Netzwerke auswirken.

Davon abgesehen tragen Forscher aber auch Mosaiksteinchen dazu zusammen, wie andere einzigartige Aspekte des menschlichen Körpers entstanden sind. Ein gutes Beispiel ist die

MELISSA THOMAS

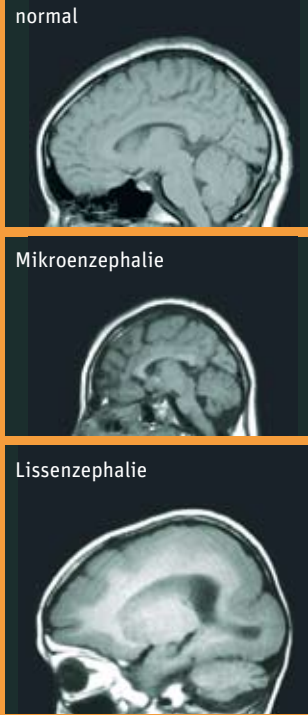
Genregulationsregion HAR2 – die zweite Position auf meiner Liste der Genomabschnitte mit beschleunigter Evolution. Wie Wissenschaftler des Lawrence Berkeley National Laboratory 2008 nachwiesen, enthält diese DNA-Sequenz (die auch als HACNS1 bezeichnet wird) beim Menschen spezifische Basenabweichungen, durch die sie während der Embryonalentwicklung die Genaktivität in Handgelenk und Daumen anzuregen vermag; die ältere Version bei anderen Primaten hat diese Wirkung nicht. Das ist ein besonders spannender Befund, weil darauf morphologische Veränderungen unserer Hände beruhen könnten, die uns die Geschicklichkeit zur Herstellung und Benutzung komplizierter Werkzeuge verliehen.

Neben dem Körperbau wandelten sich bei unseren Vorfahren aber auch Verhaltensweisen und physiologische Abläufe, was ihnen half, sich an wechselnde Verhältnisse anzupassen und in andere Regionen zu wandern. Ein Beispiel: Durch die Zähmung des Feuers vor über einer Million Jahren und die landwirtschaftliche Revolution vor 10 000 Jahren wurde stärkereiche Nahrung leichter zugänglich. Kultureller Wandel allein reichte aber nicht, um diese Kalorienspender gut verwerten zu können. Unsere Vorfahren mussten sich auch genetisch darauf einstellen.

Eine bekannte Anpassung in diesem Bereich sind Veränderungen im Gen *AMY1*. Es kodiert für die Speichelamylase, ein Enzym, das an der Verdauung von Stärke mitwirkt. Das Gen liegt im Erbgut von Säugetieren in mehreren Kopien vor; die genaue Zahl ist von Art zu Art und selbst von Mensch zu Mensch verschieden. Insgesamt jedoch besitzt unsere Spezies im Vergleich zu anderen Primaten besonders viele Exemplare. Wie Wissenschaftler der Arizona State University in Tempe 2007 zeigten, enthält der Speichel von Personen mit ungewöhnlich vielen *AMY1*-Kopien mehr Amylase, so dass sie leichter Stärke verdauen können. Die Evolution des Gens betraf also offenbar auch die Anzahl seiner Kopien – zusätzlich zu spezifischen Veränderungen seiner DNA-Sequenz.

Ein anderes bekanntes Beispiel für eine Anpassung an die Ernährung betrifft das Gen *LCT*. Es kodiert für das Enzym Laktase, mit dessen Hilfe Säugetiere das Kohlenhydrat Laktose (Milchzucker) abbauen. Bei den meisten Arten kann der Nachwuchs nur bis zum Entwöhnen Laktose verwerten. Vor rund 9000 Jahren jedoch – nach evolutionären Maßstäben also vor sehr kurzer Zeit – entstanden im Genom des Menschen Versionen von *LCT*, durch die auch Erwachsene das noch können. Solche Varianten entwickelten sich unabhängig voneinander in europäischen und afrika-

FEHLERHAFTER FORM



Veränderungen bestimmter DNA-Sequenzen können sich im Gehirn dramatisch auswirken. Zum Beispiel führt eine Mutation im Gen *ASPM* zu einem deutlich kleineren Organ (Mitte) als sonst, was auf eine Schlüsselrolle dieses Gens bei der Evolution des voluminösen menschlichen Gehirns hinweist. Fehlfunktionen in den Neuronen, in denen der DNA-Abschnitt HAR1 während der Embryonalentwicklung aktiv ist, können zu einer schwer wiegenden Behinderung infolge einer nicht ordnungsgemäß gefalteten Großhirnoberfläche führen (unten) – ein Hinweis, dass HAR1 für die Ausformung einer gesunden Hirnrinde bedeutsam ist.

nischen Bevölkerungsgruppen – sie helfen, die Milch von Haustieren zu verdauen. Unter Nachfahren dieser prähistorischen Viehzüchter ist die so genannte Laktosetoleranz im Erwachsenenalter viel weiter verbreitet als unter Menschen aus anderen Regionen der Erde, insbesondere aus Lateinamerika und Asien; dort tragen viele die ursprüngliche Primatenversion des Gens.

Einst gut – jetzt schlecht?

Im Rahmen des Schimpansen genomprojekts wurden 15 weitere menschliche Gene identifiziert, die sich von einer Form wegentwickelt haben, die zwar bei unseren Menschenaffen-vorfahren völlig normal war und auch bei anderen Säugetieren gut funktioniert, doch in dieser urtümlichen Version bei heutigen Menschen mit Erkrankungen assoziiert ist, darunter Alzheimer und Krebs. Einige dieser Krankheiten kommen ausschließlich oder zumindest häufiger bei unserer Spezies als bei anderen Primatenarten vor.

Derzeit werden die Funktionen der beteiligten Gene untersucht, und man versucht herauszufinden, warum die ursprünglichen Versionen bei uns zur Fehlanpassung geworden sind. Aufbauend auf solchen Erkenntnissen ließen sich eines Tages jene Patienten identifizieren, die ein höheres Risiko für eine dieser lebensbedrohlichen Krankheiten tragen, um ihnen dann – so jedenfalls die Hoffnung – bei der Vorbeugung zu helfen. Außerdem könn-

Wieso kann die urtümliche Version eines Gens bei uns mit einer Krankheit assoziiert sein?

OBERE UND MITTE: MIT FRODIL GEN VON GANESHARAN H. MOCHIDA, C. GEFREY WOODS UND CHRISTOPHER A. WALSH;
 UNTERE: MIT FRODIL GEN VON GAVIN UOUSTUEN, UNIVERSITY OF CINCINNATI



Katherine S. Pollard ist Biostatistikerin an der University of California in San Francisco. 2003, nach ihrer Promotion und Postdoc-Zeit an der University of California in Berkeley, erhielt sie an der University of California in Santa Cruz ein Stipendium für vergleichende Genomforschung, in dessen Rahmen sie beim Schimpansen genomprojekt mitarbeitete. Durch vergleichende Analysen identifizierte Pollard dann im menschlichen Erbgut die Abschnitte, deren Evolution am schnellsten verlief. Inzwischen untersucht sie computergestützt die Evolution von Mikroorganismen, die in unserem Körper leben.

Dawkins, R.: Geschichten vom Ursprung des Lebens – Eine Zeitreise auf Darwins Spuren. Ullstein, Berlin 2008.

Olson, S.: Herkunft und Geschichte des Menschen – Was die Gene über unsere Vergangenheit verraten. Berliner Taschenbuch-Verlag, Berlin 2004.

The Chimpanzee Sequencing and Analysis Consortium: Initial Sequence of the Chimpanzee Genome and Comparison with the Human Genome. In: Nature 437, S. 69–87, 1. September 2005.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/995465.

ten damit neue Therapiemöglichkeiten erkannt und entwickelt werden.

Krankheiten zu bekämpfen und damit die eigenen Gene effizienter an zukünftige Generationen weiterzugeben, war in der Evolution des Menschen wie aller anderen Arten ein immer wiederkehrendes Thema. Nirgendwo zeigt sich dieser Kampf so eindringlich wie beim Immunsystem. Wer im Genom des Menschen nach Indizien für positive Selektion sucht, findet herausragende Beispiele oft unter Genen, die mit der Immunität zu tun haben. Dass die Evolution mit den fraglichen Erbfaktoren so viel experimentiert, ist nicht verwunderlich: Als es noch keine Antibiotika und Impfstoffe gab, waren lebensbedrohliche Infektionen bis zum Ende des fortpflanzungsfähigen Alters das wahrscheinlich wichtigste Hindernis für die Weitergabe der eigenen Gene. Weiter beschleunigt wurde und wird die Evolution des Immunsystems noch dadurch, dass sich die Krankheitserreger ihrerseits wieder an unsere Abwehrmechanismen anpassen. Die Folge: ein fortwährender entwicklungsgeschichtlicher Rüstungswettlauf zwischen Mikroorganismen und ihren Opfern.

Diese Kämpfe hinterließen ihre Spuren in unserer DNA. Das gilt insbesondere für Retroviren, die überleben und sich fortpflanzen, indem sie ihr aus RNA bestehendes genetisches Material in eine DNA umschreiben und in unser Genom einbauen (HIV etwa gehört in diese Familie). Kopien solcher retroviralen Sequenzen finden sich überall verstreut in der DNA des Menschen. Viele von ihnen stammen von Viren, die vor Jahrtausenden Krankheiten erzeugten und heute vermutlich nicht mehr im Umlauf sind. Wie in anderen Sequenzen, so sammelten sich auch in ihnen im Lauf der Zeit zufällige Mutationen an, so dass die einzelnen Kopien sich zwar ähneln, aber nicht völlig gleichen. Das Ausmaß der Abweichungen zwischen ihnen erlaubt, mit Hilfe der molekularen Uhr den Zeitpunkt des ursprünglichen Retrovirusbefalls zu rekonstruieren. Die »Kampfspuren« dieser uralten Infektionen sind zudem in den Genen des Immunsystems zu erkennen, weil Retroviren, die sich ständig weiterentwickeln, fortwährend Anpassungen verlangen.

Eines der Reliktiren trägt die Bezeichnung PtERV1. Bei heutigen Menschen verhindert ein Protein namens TRIM5 α , dass PtERV1 und verwandte Retroviren sich vermehren. Genetische Befunde lassen darauf schließen, dass vor rund vier Millionen Jahren urtümliche Schimpansen, Gorillas und Menschen in Afrika unter einer PtERV1-Epidemie zu leiden hatten. Im Jahr 2007 rekonstruierten Wissenschaftler am Fred Hutchinson Cancer

Center in Seattle anhand der vielen zufällig mutierten Kopien von PtERV1 im Schimpansen genom die ursprüngliche Sequenz und bauten das vorzeitliche Retrovirus nach. Dann prüften sie experimentell, wie gut die Versionen des TRIM5 α -Gens von Menschen und Menschenaffen dem wieder auferstandenen Virus entgegenwirken konnten. Das Resultat: Höchstwahrscheinlich hat eine einzige Veränderung im menschlichen Gen unsere Vorfahren in die Lage versetzt, eine PtERV1-Infektion wirksamer zu bekämpfen, als unsere tierischen Vettern dies vermochten. (Weitere Abwandlungen des menschlichen Gens waren möglicherweise eine Reaktion auf ein verwandtes Retrovirus.) Andere Primaten zeigen in ihrem entsprechenden Gen ein jeweils eigenes Sortiment von Veränderungen, vermutlich Zeugnis von Kämpfen, die ihre Vorfahren gegen Retroviren gewonnen hatten.

Ein Schritt vor – zwei zurück

Der Sieg über ein Sorte Retrovirus garantiert allerdings nicht zugleich Abwehrerfolge gegen andere. Veränderungen im TRIM5 α -Gen mögen unseren Vorfahren zwar zum Überleben der PtERV1-Epidemie verholfen haben, erschweren uns aber heute erheblich die Bekämpfung von HIV. Auf Grund dieser Erkenntnis versteht man inzwischen besser, warum eine HIV-Infektion bei Menschen zu Aids führt, bei anderen Primaten aber nicht. Offensichtlich kann die Evolution einen Schritt vorwärts und dabei zwei Schritte zurück machen. Ebenso ergeht es manchmal der wissenschaftlichen Forschung. Wir haben in der DNA viele faszinierende Sequenzen identifiziert, die in Frage kommen, um die genetischen Grundlagen typisch menschlicher Merkmale zu erklären. Über die Funktion dieser Kandidaten haben wir aber meistens erst rudimentäre Kenntnisse. Besonders groß sind unsere Wissenslücken bei solchen Regionen wie HAR1 und HAR2, die für keine Proteine kodieren.

Diese uns eigenen, rasch evolvierenden Sequenzen weisen aber auch den weiteren Weg für die Suche danach, was uns zum Menschen macht. Sie wird sich wahrscheinlich nicht auf Veränderungen in den Proteinen konzentrieren, sondern darauf, wie die Evolution das Grundmaterial auf neue Weise nutzte – also veränderte, wann und wo verschiedene Gene im Organismus ein- und ausgeschaltet werden. Derzeit laufen an Tausenden von Instituten auf der ganzen Welt experimentelle Untersuchungen und Computeranalysen, die zu klären versprechen, was in den 98,5 Prozent unseres Genoms geschieht, die nicht für Proteine kodieren. Nach »Schrott« sieht dieser Anteil jedenfalls von Tag zu Tag weniger aus. <



Rubik-Spiele mit einfachen Gruppen

Drei neue Puzzles nach Art des Rubikwürfels bieten die Gelegenheit, sich in die Höhen der abstrakten Algebra aufzuschwingen und mit einigen ihrer vertracktesten Objekte vertraut zu machen: den so genannten sporadischen einfachen Gruppen.

Von Igor Kriz und Paul W. Siegel

Anfang der 1980er Jahre hat der Rubikwürfel Millionen von Menschen weltweit fasziniert – und zur Verzweiflung gebracht. Falls Sie dieses Puzzle – oder die 1980er Jahre – verpasst haben: Es handelt sich um ein Objekt, das aus $3 \times 3 \times 3 = 27$ Teilwürfeln, von Kennern Kubies genannt, zusammengesetzt scheint, es aber nicht wirklich ist. Jede der sechs quadratischen Seitenflächen hat eine andere, prominente Farbe, üblicherweise Rot, Blau, Grün, Orange, Gelb und Weiß. Ein raffinierter Mechanismus, den 1974 ein ungarischer Lehrer

namens Ernő Rubik erfand (und zwei Jahre später unabhängig von ihm der japanische Ingenieur Terutoshi Ishige), ermöglicht es, die sechs Seiten einzeln um ihre jeweilige Mittelachse zu drehen. Wenn Sie das ein paar Mal wahllos machen, sind die Kubies so durcheinandergemischt, dass nur Eingeweihte den Ausgangszustand wiederherstellen können. Genau darin besteht die Knobelaufgabe: aus einem willkürlich verdrehten Würfel einen zu machen, bei dem jede Seite wieder ihre ursprüngliche, einheitliche Farbe hat.

Rubik's Cube und analoge Polyeder, die in seinem Kielwasser segelten, sind allesamt Puzzles auf der Basis von Operationen, welche die Komponenten – beim Würfel also die Kubies – umordnen oder, wie Mathematiker sagen, permutieren. Stets geht es darum, eine zufällige Anordnung in eine vorgegebene Konfiguration, meist den Ausgangszustand, zu überführen. Dabei bildet die Menge aller Abfolgen von erlaubten Einzeloperationen eine so genannte Permutationsgruppe.

Eine Gruppe lässt sich mathematisch als Verallgemeinerung der gewöhnlichen Arithmetik auffassen. Paradebeispiel ist die Menge der ganzen Zahlen mit der Addition als Verknüpfung. Gruppen können aber auch aus vielen anderen Dingen bestehen – so den Drehungen und Spiegelungen von Gegenständen, den möglichen Vertauschungen einer Menge von Buchstaben oder sonstigen Objekten, den Anordnungen von Zahlen in quadratischen Matrizen und so weiter. Dabei muss eine Operation existieren, die jedes Element der Gruppe in eines überführt, das ebenfalls zur Gruppe gehört. (Außerdem muss das Assoziativgesetz gelten, zu jedem Element



ein inverses existieren und ein neutrales Element vorhanden sein.)

Die Gruppentheorie ist nicht nur für Mathematiker von Interesse, sondern hat auch bedeutende Anwendungen auf anderen Gebieten wie der Kristallografie, der Teilchenphysik und der Kosmologie. Selbst in der Telekommunikation spielt sie eine wichtige Rolle. Deshalb kann es sich für Studenten wie auch gestandene Wissenschaftler lohnen, sich spielerisch mit ihr vertraut zu machen. Die spielerische Beschäftigung mit dem Rubikwürfel hat sich zum Beispiel als fantastische Möglichkeit erwiesen, ein Gefühl dafür zu bekommen, was bei der Kombination von Elementen bestimmter Arten von Permutationsgruppen passiert.

Herausforderung für Knobelfans

Wer eine Lösungsstrategie für den Rubikwürfel gefunden hat, kann sie allerdings leicht auch auf alle Ableger dieses Puzzles übertragen. Die verlieren dadurch ihren Reiz. Zumindest haben wir selbst das so empfunden. Zugleich erkannten wir den mathematischen Grund für unsere Enttäuschung: Die Puzzles vom Rubiktyp sind alle nach demselben Schema zu knacken, weil ähnliche Gruppen dahinterstecken. Diese bilden jedoch nur einen kleinen Ausschnitt aus der Fülle mathematischer Konstrukte, die das Gruppenkonzept ermöglicht.

Als Knobelfans war uns einerseits an Puzzles gelegen, deren Lösungsstrategien sich wesentlich von derjenigen für den Rubikwürfel unterscheiden. Andererseits wollten wir interessierten Laien einen intuitiven Zugang zu völlig anderen Gruppen eröffnen. Es lag also nahe, beide Ziele zusammenzuführen. Tat-

sächlich konnten wir drei neue Puzzles kreieren, die auf so genannten sporadischen einfachen Gruppen beruhen – Konstrukten mit bemerkenswerten Eigenschaften, die nur Spezialisten bekannt sind.

Zu unserer Freude ergaben Versuche mit Kollegen, dass jeder, der eine Lösung für den Rubikwürfel austüfteln kann, auch fähig ist, durch Beschäftigung mit unseren Puzzles ein ähnlich tiefes Verständnis der zugehörigen sporadischen einfachen Gruppen zu erlangen. Außerdem stellen diese Knobelaufgaben eine wirklich neuartige Herausforderung dar, weil die Methoden zum Knacken des Rubikwürfels hier versagen. Zugleich bieten sie, wie wir meinen, eine Menge Spaß. Wer sofort loslegen will, findet die Spiele unter folgendem Link: www.spektrum.de/gruppen.

Beim Lösen der neuen Puzzles helfen Kenntnisse darüber, was die zu Grunde liegenden einfachen sporadischen Gruppen sind und wie sie sich von derjenigen unterscheiden, die hinter dem Rubikwürfel steckt. Gruppen können sowohl endlich als auch unendlich sein. Die erwähnte additive Gruppe der ganzen Zahlen hat aus offensichtlichen Gründen unendlich viele Mitglieder. Die Rubikwürfelgruppe enthält dagegen nur eine begrenzte Zahl von Elementen, auch wenn die Menge der zulässigen Zugfolgen unbegrenzt ist. Das liegt daran, dass all die verschiedenen Kombinationen von Zügen, die dasselbe bewirken, indem sie vom gleichen Ausgangs- zum identischen Zielzustand führen – und das sind beliebig viele –, als äquivalent gelten. Die Zahl unterschiedlicher Konfigurationen von Kubies ist astronomisch, nämlich $43\,252\,003\,274\,489\,856\,000$ oder rund 4×10^{19} . Entsprechend gibt es zwar

Animierte Zahlen vollführen einen imaginären Tanz, indem sie gemäß dem Zug »merge« (»mische«) in dem neuen Puzzle M_{12} ihre Plätze tauschen.

In Kürze

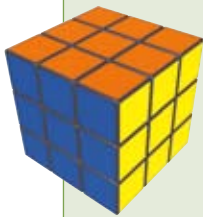
- ▶ Zum Lösen der Rubikwürfels muss man kurze Zugfolgen für **einfache Teilschritte** entdecken.
- ▶ Die Nachfolger dieses Puzzles boten keine prinzipiell **neue Herausforderung**, weil sie mit sehr ähnlichen Zugfolgen zu knacken sind.
- ▶ Die Autoren des Artikels machten sich deshalb auf die Suche nach Knobelspielen, die genauso anspruchsvoll sind, aber **andere Lösungsstrategien** erfordern.
- ▶ Auf der Basis der Gruppentheorie, die schon beim Rubikwürfel gute Dienste leistete, entwarfen sie **drei neue Puzzles**, die mit der Komplexität »sporadischer einfacher Gruppen« für Knobelvergnügen sorgen.

EINE NOTATION FÜR DEN RUBIKWÜRFEL

Beim Lösen der von den Autoren vorgestellten drei neuen Puzzles helfen Methoden aus der Gruppentheorie. Dazu gehört das Aufstellen eines einfachen, eindeutigen Systems zur Bezeichnung der Elemente einer Gruppe und ihrer Kombinationen.

Die Elemente der Rubikwürfelgruppe sind Drehungen der Seiten. Die Verknüpfung könnte man »und dann« nennen: »Drehe die rote Seite und dann die grüne.« Der Einblick in die innere Mechanik des Rubikwürfels (rechts) macht deutlich, dass die Würfelchen (Kubies) in den Seitenmitten immer an ihrem Platz bleiben, wie sehr man die anderen auch durcheinanderbringt. Deshalb kann man jeden

Zug eindeutig beschreiben, indem man die Farbe des zentralen Würfelchens – Blau, Grün, Orange, Rot, Zitronengelb oder Weiß – in Form ihres Anfangsbuchstabens sowie den Drehwinkel angibt



Z



B



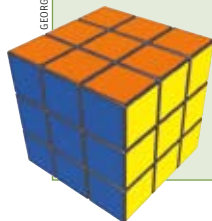
B²



Z⁻¹

(Mitte). Der Buchstabe allein bedeutet dabei eine Drehung um 90 Grad im Uhrzeigersinn, wenn man von vorn auf die entsprechende Seite blickt. Eine Hochzahl bezeichnet andere Drehwinkel. B² beschreibt so zum Beispiel eine Drehung der blauen Seite um 180 Grad und G⁻¹ eine Drehung der grünen Seite um 90 Grad gegen den Uhrzeigersinn. Die Orientierung des Würfels lässt sich spezifizieren, indem man die Farben der drei sichtbaren Seiten, beginnend mit der oberen, im Uhrzeigersinn aneinanderreih; auf allen Zeichnungen in diesem Kasten ist die Orientierung also RZB. Man beachte, dass die Auswirkung der Drehungen von ihrer Reihenfolge abhängt. So ergeben

ZB und BZ, angewandt auf die Ausgangskonfiguration, unterschiedliche Muster (unten).



ZB



BZ

DREI PUZZLES, SO VIELE ZÜGE!

- Beim M₁₂-Puzzle, das auf der Mathieu-Gruppe M₁₂ beruht, existieren 95 040 Permutationen.
- Beim M₂₄-Puzzle, hinter dem die Mathieu-Gruppe M₂₄ steckt, gibt es 244 823 040 verschiedene Permutationen.
- Bei Dotto, das die Conway-Gruppe Co₀ repräsentiert, existieren 8315 553 613 086 720 000 Permutationen.

Unmengen elementarer Zugfolgen, die sie ineinander umwandeln, aber es sind eben nicht unendlich viele.

Trotz der ungeheuren Zahl von Zugkombinationen ist es nicht allzu schwer, eine Lösungsstrategie für den Rubikwürfel zu entwickeln. Ein paar kleine Tipps dürften genügen. Sie brauchen Papier und Bleistift sowie natürlich einen Würfel – möglichst im unverdrehten Ausgangszustand. Zunächst sollten Sie sich eine einfache Notation für Ihre Züge überlegen (siehe Kasten oben). Dann suchen Sie nach kurzen Zugfolgen für bestimmte Aufgaben wie den Austausch zweier Eck- oder Kantenkubies und schreiben sie auf. Durch systematisches Kombinieren dieser Zugfolgen sollte es Ihnen schließlich gelingen, den Würfel zu lösen.

Ausgehend vom einfachen Probieren gelangen Sie mit dieser Vorgehensweise, wie sich zeigt, fast zwangsläufig zum Ziel. Das hat einen

einfachen Grund. Grob gesprochen, handelt es sich bei den elementaren algebraischen Komponenten der Rubik-Gruppe um die so genannten symmetrischen Gruppen, die alle denkbaren Permutationen einer bestimmten Zahl von Objekten enthalten, sowie um die eng damit verwandten alternierenden Gruppen, die jeweils genau halb so viele Mitglieder wie die zugehörige symmetrische Gruppe haben. Zum Beispiel enthält die symmetrische Gruppe S₃ alle 3! = 1 × 2 × 3 = 6 möglichen Anordnungen von drei Objekten. Die entsprechende alternierende Gruppe A₃ hat dagegen nur 3 Elemente. Zu den symmetrischen Gruppen, die mit der Rubik-Gruppe verwandt sind, gehören S₈ und S₁₂. Sie beschreiben die 8! = 40 320 möglichen Anordnungen der acht Eck- beziehungsweise die 12! = 479 001 600 denkbaren Konfigurationen der zwölf Kantenkubies.

Auch unsere Puzzles drehen sich um Permutationen, beruhen aber jeweils auf einer so genannten sporadischen einfachen Gruppe. Um zu erklären, was das ist, müssen wir zunächst das Konzept der Untergruppe einführen. Stellen Sie sich vor, Sie dürfen beim Rubikwürfel nur die blaue und die gelbe Seite verdrehen. Dann werden Sie nie das Kantenkubie mit den Farben Grün und Weiß bewegen können. Dadurch ist die Anzahl der erlaubten grundlegenden Zugfolgen geringer als in der vollständigen Rubik-Gruppe.

Sofern sämtliche Kombinationen einer Teilmenge der Elemente einer Gruppe auch zu dieser Teilmenge gehören, spricht man von einer Untergruppe. Eine einfache Gruppe zeichnet sich dadurch aus, dass sie keine »echten, normalen« Untergruppen enthält; was das genau bedeutet, können Sie im Kasten auf S. 68 nachlesen.

Das Attribut »einfach«, bezogen auf Gruppen, ist wohl eine der krassesten Fehlbezeichnungen in der Geschichte der Mathematik. Wie sich herausstellte, gehören manche einfachen Gruppen zu den komplexesten Gebilden, die man kennt. Dennoch sind sie »einfach« in dem Sinn, dass sie die Bausteine oder »Atome« der Gruppentheorie bilden. In gewisser Weise ähneln sie auch den Primzahlen (die nur durch 1 oder sich selbst teilbar sind). Jede endliche Gruppe lässt sich genauso eindeutig in einfache Gruppen zerlegen wie jede ganze Zahl in ein Produkt von Primzahlen.

Mittlerweile sind alle einfachen Gruppen gefunden und klassifiziert (Spektrum der Wissenschaft 2/1986, S. 98). Entdeckt wurden sie zwischen 1860 und 1980. Ihre Klassifikation fiel in den Zeitraum zwischen Ende der 1940er und Anfang der 1980er Jahre (mit ein paar Korrekturen in jüngerer Zeit). Hunderte von Mathematikern waren an dieser Mammut-



aufgabe beteiligt. Die Berichte über die Entdeckung einfacher Gruppen und der Beweis, dass die endgültige Liste vollständig ist, füllen mehr als 10000 Seiten, verteilt auf rund 500 Artikel, in mathematischen Fachzeitschriften.

Unentwegt arbeiten bis heute an einer einfacheren Version des Vollständigkeitsbeweises und hoffen, dadurch ein noch tieferes Verständnis der einfachen Gruppen zu erlangen. Dessen ungeachtet steht jetzt schon fest, dass sie aus 18 Familien, jede davon eine unendliche Sammlung einer speziellen Sorte von Gruppen, und 26 »sporadischen« Vertretern bestehen – Exzentrikern, die einmalig sind und keine Verwandten haben.

Hinter unseren Puzzles stecken drei sporadische einfache Gruppen namens M_{12} , M_{24} und Co_1 . Auch sie beinhalten Permutationen. Diese sind jedoch sehr viel stärker eingeschränkt als bei den symmetrischen Rubik-Gruppen. Dadurch lassen sich in unseren Puzzles zahlreiche Zahlenkombinationen auch mit beliebig vielen Zügen nicht erreichen. Das ist im Übrigen der Grund, warum hier nicht dieselben Methoden wie beim Rubikwürfel zum Erfolg führen. Es gibt jedoch andere Lösungsstrategien, die sich aus wenigen Informationen über die Eigenschaften der Gruppen ableiten lassen.

Los geht's!

Das leichteste unserer drei Puzzles ist M_{12} . Es beruht auf der gleichnamigen Mathieu-Gruppe, einer der fünf am längsten bekannten sporadischen Gruppen. Sie sind nach dem französischen Mathematiker Émile Mathieu benannt, der sie in den 1860er Jahren entdeckte. Bei dem Puzzle M_{12} muss man eine nebeneinander aufgereichte, auf besondere Weise durcheinandergewürfelte Folge der Zahlen 1 bis 12 wieder in die richtige Reihenfolge bringen (1, 2, 3, ..., 12). Dazu stehen nur zwei Operationen oder Zugarten zur Verfügung, die man beliebig oft hintereinander ausführen darf.

Wir geben Lesern, die sich an der Aufgabe versuchen wollen, nur einen kleinen Hinweis. In dem Puzzle kann man ebenso wie in der zugehörigen Gruppe jede Kombination von fünf Zahlen an jede der zwölf Positionen innerhalb der Reihe bringen. Würden auf diese Weise zum Beispiel die Zahlen 1 bis 5 auf die richtigen Plätze manövriert, ist das Puzzle gelöst. Das liegt daran, dass die Gruppe M_{12} insgesamt $12 \times 11 \times 10 \times 9 \times 8 = 95\,040$ Permutationen enthält. Zufällig entspricht das genau der Anzahl der Möglichkeiten, fünf Ziffern auf zwölf Plätze zu verteilen: Die erste Ziffer kann jeden der zwölf Plätze einnehmen, die zweite jeden der elf verbliebenen und so wei-

ter. Weil die gesamte Permutation durch die Position von fünf Zahlen festgelegt ist, hat es also keinen Zweck, nach einer Zugfolge zu suchen, die nur wenige Zahlen bewegt. Außer dem Null-Zug, der nichts verändert, lässt jeder andere Zug weniger als fünf Ziffern an ihrem Platz. Andersherum gesagt, werden stets mindestens acht Ziffern verschoben.

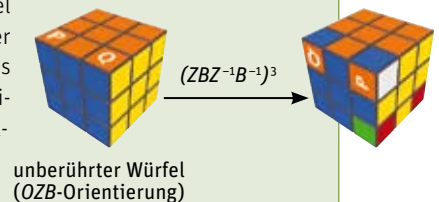
Beim zweiten Puzzle, M_{24} , sind 23 Zahlen wie auf einem Zifferblatt im Kreis angeordnet. Die 24. Zahl steht außerhalb des Kreises über der 12-Uhr-Position. Analog zu M_{12} gibt es nur zwei elementare Züge (siehe Kästen auf S. 69). Im Prinzip wäre es möglich, dieses Puzzle auch als mechanische Konstruktion zu realisieren: Der Kreis aus 23 Zahlen

LÖSUNGSSTRATEGIE FÜR DEN RUBIKWÜFEL

Klassische Permutationspuzzles wie der Rubikwürfel, bei dem die Teile in eine bestimmte Anordnung gebracht werden müssen, lassen sich gewöhnlich mit einer Zweischritt-Methode lösen.

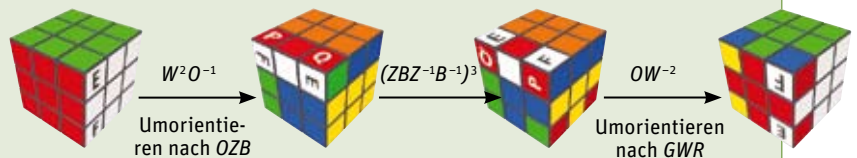
SCHRITT 1

Probieren Sie kurze Kombinationen aus zwei Zügen, gefolgt von ihrer Umkehrung – also beim Rubikwürfel etwa $ZBZ^{-1}B^{-1}$ – und wiederholen Sie diese mehrmals. Oft gelangen Sie dabei zu einer Anordnung, in der sich nur wenige Teile bewegt haben. Damit verfügen Sie über ein wertvolles Hilfsmittel, um begrenzte Ziele zu erreichen. Beim Rubikwürfel vertauscht $ZBZ^{-1}B^{-1}$, dreimal hintereinander ausgeführt, zwei Paare von Kantenkubies. Eines davon, das an die blaue und orangefarbene Seite grenzt, wurde in der Illustration rechts willkürlich mit P und Q bezeichnet.



SCHRITT 2

Modifizieren und erweitern Sie die gefundene nützliche Zugfolge. Wollen Sie zum Beispiel das Paar von Eckkubies vertauschen, das an die rote und weiße Seite grenzt, müssen Sie nach einer vorbereitenden Sequenz suchen, welche dieses Paar in die passende Ausgangskonfiguration bringt. In der Illustration unten sind die betreffenden Kubies mit E und F bezeichnet, und der Würfel hat



der Klarheit halber zunächst die Orientierung GWR. Mit der kurzen Sequenz $W^2 O^{-1}$ können Sie E und F in die Positionen P und Q befördern. Damit das besser zu erkennen ist, wurde in der Illustration die Orientierung des Würfels von GWR nach OZB geändert. Dann führen Sie Ihre nützliche Zugfolge aus und machen die vorbereitende Sequenz mit $O W^{-2}$ rückgängig. Im Endeffekt haben Sie damit die Kubies E und F vertauscht.

Mit analogen vorbereitenden Sequenzen lässt sich jedes Paar von Eckkubies so orientieren, dass es durch die nützliche Zugfolge vertauscht wird. Indem Sie auf dieselbe Art mit anderen einfachen Zugkombinationen verfahren, gelangen Sie zu einem Satz von Hilfsmitteln, mit dem Sie den Rubikwürfel und andere klassische Permutationspuzzles lösen können.

GEORGE RETSECK



WAS IST EINE SPORADISCHE EINFACHE GRUPPE?

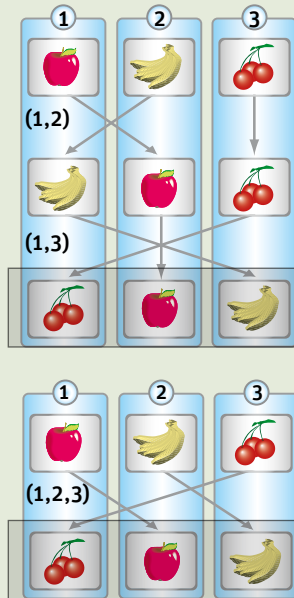
Die drei neuen Puzzles repräsentieren allesamt sporadische einfache Gruppen. Etwas Grundwissen über diese Objekte kann deshalb nicht schaden.

SYMMETRISCHE GRUPPEN

Die symmetrische Gruppe S_n enthält alle denkbaren Permutationen, also Positionsänderungen, von n in einer Reihe angeordneten Objekten. So umfasst S_3 die sechs unterschiedlichen Permutationen, welche die sechs möglichen Anordnungen von drei verschiedenen Objekten erzeugen. Zu jeder Permutationsgruppe gehört auch eine Null-Operation, neutrales Element genannt, die nichts tut.

Die Permutation (1,2) vertauscht die Objekte in Position 1 und 2 (rechts). Die Permutation (1,3) vertauscht entsprechend die Objekte in Position 1 und 3.

Die Anwendung von (1,3) auf das Ergebnis von (1,2), geschrieben $(1,2) \circ (1,3)$, ergibt dieselbe Anordnung wie die Permutation (1,2,3). Dabei handelt es sich um eine zyklische Vertauschung, bei der jedes Objekt auf die nächste und das letzte auf die erste Position rückt.



MULTIPLIKATIONSTABELLEN

Die Multiplikationstabelle für die sechs Permutationen von drei Objekten zeigt die Ergebnisse aller 36 Kombinationen von zwei Elementen aus der Gruppe S_3 . Das neutrale Element (1) wirkt wie die 1 bei der gewöhnlichen Multiplikation. Beachten Sie, dass jedes »Produkt« zweier Permutationen wieder eine Permu-

		Führe als Zweites diese Permutation aus					
° (»und«)		(1)	(1,2,3)	(1,3,2)	(1,2)	(1,3)	(2,3)
Führe zuerst diese Permutation aus	(1)	(1)	(1,2,3)	(1,3,2)	(1,2)	(1,3)	(2,3)
	(1,2,3)	(1,2,3)	(1,3,2)	(1)	(2,3)	(1,2)	(1,3)
	(1,3,2)	(1,3,2)	(1)	(1,2,3)	(1,3)	(2,3)	(1,2)
	(1,2)	(1,2)	(1,3)	(2,3)	(1)	(1,2,3)	(1,3,2)
	(1,3)	(1,3)	(2,3)	(1,2)	(1,3,2)	(1)	(1,2,3)
	(2,3)	(2,3)	(1,2)	(1,3)	(1,2,3)	(1,3,2)	(1)

tation ist, die auch als »Faktor« vorkommt. Diese Eigenschaft, die alle Gruppen haben, heißt Abgeschlossenheit.

Mitglieder einer Untergruppe bleiben unter sich

Jedes Produkt aus den drei Permutationen in der orangefarbenen Region der Multiplikationstabelle ist gleich einer dieser drei Permutationen. Derart abgeschlossen, bilden die drei Permutationen ebenfalls eine Gruppe, die als Untergruppe von S_3 bezeichnet wird.

Es gibt immer ein Zurück

Für jede Permutation in der linken Spalte der Multiplikationstabelle existiert ein Produkt, das gleich (1) ist. Der zugehörige Faktor in der obersten Reihe heißt inverses Element dieser Permutation. Zu jeder Permutation g gibt es also ein inverses Element g^{-1} , das sie rückgängig macht. So ist das inverse Element von (1,2,3), geschrieben $(1,2,3)^{-1}$, gleich (1,3,2), weil $(1,2,3) \circ (1,3,2)$ gleich (1) ist. (1,2) ist zu sich selbst invers; denn $(1,2) \circ (1,2)$ ergibt laut Tabelle (1).

AUSWEIS DER ECHTHEIT

Eine einfache Gruppe ist eine Gruppe ohne »echte, normale« Untergruppe. Jede Gruppe hat mindestens zwei Untergruppen: sich selbst und die leere Gruppe, die nur aus der Null-Operation (1) besteht. Jede weitere Untergruppe heißt »echt«.

Was ist normal?

Nehmen Sie eine beliebige Permutation aus der Multiplikationstabelle, beispielsweise (1,2), und bilden Sie das Produkt mit irgendeiner Permutation aus der orangefarbenen Untergruppe, etwa (1,2,3).

$$(1,2) \circ (1,2,3) = (1,3)$$

Multiplizieren Sie das Ergebnis mit dem Inversen der ersten Permutation, in diesem Fall (1,2):

$$(1,3) \circ (1,2)^{-1} = (1,3,2)$$

Kurz: $(1,2) \circ (1,2,3) \circ (1,2)^{-1} = (1,3,2)$

Wenn das Ergebnis jedes derartigen Dreierprodukts innerhalb der Untergruppe liegt, heißt diese »normal«. Das trifft hier zu.

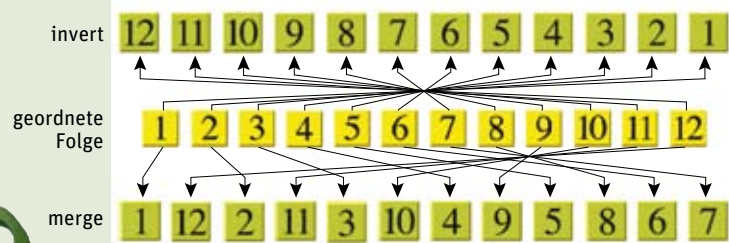
Gut, das ist einfach. Aber was ist sporadisch?

Die meisten einfachen Gruppen gehören zu Familien mit einer unendlichen Zahl von Mitgliedern. Aber 26 von ihnen sind Außenseiter, die sich keiner Familie zuordnen lassen und auch untereinander wenig gemeinsam haben. Um den Ausdruck »sonstige« zu vermeiden, nennen die Mathematiker sie sporadisch.

JOHNNY JOHNSON

WAS SIE ONLINE ERWARTET

Das Puzzle M_{12} beginnt mit einer durcheinandergewürfelten Anordnung der Zahlen 1 bis 12. Die Aufgabe besteht darin, mit Kombinationen von nur zwei Zügen, die sich auf Knopfdruck ausführen lassen, die Zahlen in die richtige Reihenfolge zu bringen. Ganz oben ist gezeigt, wie das Puzzle nach dem Aufruf am Bildschirm erscheint. Das Diagramm rechts veranschaulicht die Wirkung der beiden Züge.



Beim Puzzle M_{24} sind im geordneten Zustand die Zahlen 1 bis 23 im Uhrzeigersinn auf einem Kreis aneinandergereiht; die 0 steht außerhalb des Kreises über der 12-Uhr-Position. Ziel ist wie bei M_{12} , aus einer durcheinandergewürfelten Konfiguration den geordneten Zustand wiederherzustellen. Dazu gibt es gleichfalls nur zwei Züge. Der eine lässt alle Zahlen im Kreis um einen Platz weiter-rücken, der andere vertauscht die Zahlen in gleichfarbigen Kreisfeldern.



ließe sich drehbar anbringen, und ein System von Zahnrädern könnte die den Zügen entsprechenden Vertauschungen von Zahlen bewirken.

Dieses Puzzle, hinter dem die Mathieu-Gruppe M_{24} steckt, ist wie M_{12} »fünf-transitiv«: Mit irgendeiner Kombination der beiden elementaren Züge lassen sich beliebige fünf der 24 Zahlen auf beliebige fünf der 24 Plätze manövrieren. Damit gilt auch der gleiche Tipp wie bei M_{12} : Suchen Sie nach Zügen, welche die Zahlen 1 bis 5 an ihre richtigen Positionen bringen, ohne die bereits korrekt angeordneten Zahlen wieder zu verschieben. Aber in diesem Fall sind Sie damit noch nicht am Ende. Die Gruppe M_{24} enthält $24 \times 23 \times 22 \times 21 \times 10 \times 48 = 244\,823\,040$ Elemente. Selbst wenn die Ziffern 1 bis 5 die richtigen Plätze einnehmen, können die anderen 19 Zahlen noch auf 48 verschiedene Arten über den Kreis verteilt sein.

Dotto, unser drittes Puzzle, beruht auf der Conway-Gruppe Co_0 , die der Mathematiker John H. Conway von der Princeton University (New Jersey) 1968 publiziert hat. Sie enthält die sporadische einfache Gruppe Co_1 und hat genau doppelt so viele Elemente. Conway war zu bescheiden, die Gruppe nach sich zu benennen, und gab ihr deshalb die verstümmelte Bezeichnung »0«, was sich auf Englisch »dotto« spricht (daher der Name des Puzzles).

Zu Details von Dotto müssen wir aus Platzgründen auf unsere Online-Seite verweisen (www.spektrum.de/gruppen). Wir können hier nur versichern, dass das Puzzle und die zu Grunde liegende Gruppe faszinierende mathematische Eigenschaften haben. Zum Beispiel ist Dotto eng mit dem Leech-Gitter verwandt, einer Menge von »Punkten« in einem 24-di-

mensionalen Raum, die aus geordneten Zahlenlisten bestehen. Dieses Gitter ist berühmt dafür, dass es die dichteste Kugelpackung in einem solchen Hyperraum liefert.

Nur vier sporadische einfache Gruppen sind noch größer als Co_1 : die Janko-Gruppe J_4 , die Fischer-Gruppe Fi_{24}' , das Babymonster B und das Monster M. Getreu seinem Namen schießt das Monster mit rund 8×10^{53} Elementen den Vogel ab. Konstruiert hat es im Jahr 1980 Robert L. Griess jr. von der University of Michigan in Ann Arbor als Gruppe der Transformationen einer gewissen, komplizierten mathematischen Struktur im 196 884-dimensionalen Raum.

Wir haben nicht versucht, Puzzles auf der Basis anderer sporadischer einfacher Gruppen zu entwerfen, obwohl das in einigen Fällen sicher möglich wäre. Das Monster in eine Knotelei umzusetzen, wäre nicht nur eine enorme Herausforderung, sondern käme auch der Mathematik zugute. Bisher ist nämlich nicht bekannt, ob diese Gruppe die Permutationen eines Objekts beschreibt, das klein genug ist, um sich anschaulich darstellen zu lassen. Bisher wird nur vermutet, dass das Monster die Permutationsgruppe eines gewissen 24-dimensionalen, gebogenen Raums darstellt. Das Austüfteln eines zugehörigen Puzzles könnte die Mathematiker also einem Beweis dieser spannenden Hypothese näher bringen. ◁

IM INTERNET

Alle drei Spiele, M_{12} , M_{24} und Dotto, finden Sie im Internet unter www.spektrum.de/gruppen. Die ersten beiden können Sie direkt online spielen. Dotto müssen Sie herunterladen und entpacken. Es funktioniert nur auf Windows-Rechnern.



Igor Kriz ist Mathematikprofessor an der University of Michigan in Ann Arbor. Er hat an der Universität Prag promoviert und forscht vor allem über algebraische Topologie. Sein Hobby ist Klavier- und Orgelspielen.

Paul W. Siegel hat die neuen Puzzles als Student an der University of Michigan erarbeitet. Derzeit schreibt er seine Doktorarbeit an der Pennsylvania State University.

Aschbacher, M.: Finite Group Theory. Second edition. Cambridge University Press, 2000.

Conway, J. H., Sloane, N. J. A.: Sphere Packings, Lattices and Groups. Springer, Heidelberg 1999.

Griess jr., R. L.: Twelve Sporadic Groups. Springer, Heidelberg 2002.

Hofstadter, D. R.: Vom Zauber des Zauberwürfels. In: Spektrum der Wissenschaft 5/1981, S. 16–29.

Weblinks finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/995466.

1959

Zukunft mit Zucker

»Trotz der ungeheuren Rohstoffreserven Erdöl und Kohle wird heute bereits ernsthaft die Frage nach neuen billigen Rohstoffquellen aufgeworfen. ... Jährlich werden heute etwa 40 Millionen t von reinem kristallisiertem Rohr- und Rü-

benzucker gewonnen ... Die Zuckerproduktion ist darüber hinaus ständig im Anwachsen und könnte nach Ansicht von Fachleuten leicht verdoppelt werden. ... Durch Vergärung von Zucker kann in altbekannter Weise Äthylalkohol ... gewonnen werden, aus dem durch Wasserabspaltung Äthylen entsteht ... Äthylen ist heute ein sehr wichtiger Rohstoff, z. B. für die Herstellung von Polyäthylen, das ständig an Bedeutung gewinnt.«

Die Umschau, 59. Jg., Nr.13, Juli 1959, S. 404

Strahlensichere Reifen

»In Zukunft werden mit Atomkraft betriebene Flugzeuge mit strahlensicheren Laufrädern ausgerüstet sein. Die von der Firma Goodrich herausgebrachten Reifen sind mit Strahlenschutzmitteln präpariert worden; Chemikalien, die man der Gummimasse vor der Vulkanisation beigibt, um die Widerstandskraft des Gummis gegen die Wirkungen der atomaren Bestrahlung zu erhöhen.« *Populäre Mechanik, 4. Jg., Bd. 9, Heft 1, Nr. 46, Juli 1959, S. 6*

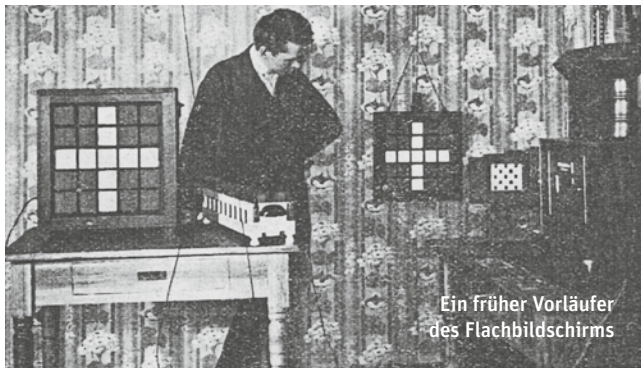
Erste Versuche der Organtransplantation

»Die Experimente des russischen Physiologen W. P. Demichow ... haben in der ganzen Welt Aufsehen erregt ... Bei seiner ersten Versuchsserie pflanzte er einem Hund den Kopf eines anderen, kleineren Hundes auf. Dann operierte er einem großen Hund Kopf und Vorderteil ... eines kleineren Hundes an, wobei er zuerst die eine der beiden das Hirn versorgenden Halsschlagadern des Spenderhundes bloßlegte und sie mit der Halsschlagader des Empfängerhundes verband. ... Nach der Herstellung dieser lebenswichtigen Verbindung trennte er dem Spenderhund den Rumpf hinter den vorderen Gliedmaßen ab und setzte ihn dem Empfängerhund ein. ... In beiden Fällen lebten die



Groteske Tierversuche sollten den Weg für Organtransplantationen am Menschen eröffnen.

doppelköpfigen Tiere bei normaler Reaktion bis zu 15 Tage.« *Hobby: das Magazin der Technik, 7. Jg., Nr. 7, Juli 1959, S. 42*



Ein früher Vorläufer des Flachbildschirms

Der elektrische Fernseher

»Jedes Bild läßt sich aus hellen und dunklen Bildelementen zusammensetzen. ... Diese Zerlegung eines Bildes in seine Bildelemente ist das Grundprinzip des von E. Ruhmer konstruierten Fernsehers. Das am 26. Juni ... vorgeführte erste Versuchsmodell des Apparates ... besteht aus $5 \times 5 = 25$ Bildelementen und stellt den 400. Teil des vollständigen Apparates dar. Der Apparat besteht aus dem Geber ..., dem Empfänger ..., einer Batterie von 12 Volt und der Fernleitung. Mittels eines Projektionsapparates wird das zu übertragende Bild stark vergrößert auf die Mattscheibe des Gebers projiziert. Dieser besteht aus einer den zu übertragenden Punktzahlen entsprechenden Anzahl von Selenzellen ..., welche den hellen und dunklen Bildelementen entsprechend beleuchtet werden oder im dunklen bleiben. ... Ein vollständig ausgeführter Apparat dürfte zirka 5 Millionen Mark kosten.« *Der Mechaniker, 17. Jg., Nr. 13, Juli 1909, S. 145*

Rausch mit Folgen

»Vor einiger Zeit war die Frage nach der Minderwertigkeit der im Rausche erzeugten Kinder von neuem aufgerollt worden ... In Frankreich hat man die meisten ... Totgeburten neun Monate nach Karneval oder Kirmes beobachtet und in Weinländern bei einem besonders schlechten Schuljahrgang sieben Jahre zurückrechnernd als Regel ein gutes Weinjahr gefunden. Präzisere Resultate haben statistische Untersu-



chungen in der Schweiz ergeben, wo die Zeugungskurven von 8196 schwachsinigen Kindern aus den Jahren 1880–90 mit Evidenz auf die Trinkmonate (Fastnacht, Weinlese, Maibowlenzeit) hinwiesen.« *Die Umschau, 13. Jg., Nr. 28, Juli 1909, S. 595*

Streit um den Wert der Margarine

»Die weitere Frage ist, ob die Voraussetzungen für den § 10 des Nahrungsmittelgesetzes in materiell-rechtlicher Beziehung vorliegen, d. h. mit anderen Worten, ob die Margarine schlechthin minderwertiger ist als Butter bez. Butterschmalz. Das oberste Landgericht bejaht diese Frage; ... Dazu ist folgendes zu bemerken: ... Schon heute steht die (Margarine-)Industrie auf einer solchen Höhe, daß ihre feinsten Erzeugnisse einen Vergleich mit guter Naturbutter nach jeder Richtung hin aushalten; die 'Bauernbutter' haben sie sogar – namentlich was die Sauberkeit der Herstellung anlangt – schon überflügelt.« *Chemiker-Zeitung, 33. Jg., Nr. 90, Juli 1909, S. 810*

SOFTWARE

Mathematica fürs Volk

Eigentlich ist es ein System für professionelle Anwender. Aber in den neueren Versionen können diese auch dem Laien ungeahnte Arbeits- und Spielmöglichkeiten eröffnen.

Von Christoph Pöppe

Das Softwarepaket »Mathematica«, konzipiert und auf den Markt gebracht seit 1988 von Stephen Wolfram und seiner Firma Wolfram Research in Champaign (Illinois), ist vieles zugleich: eine Programmiersprache, ein Programm zur »Symbolmanipulation«, das heißt typischerweise zur Umformung komplizierter algebraischer Ausdrücke, ein Werkzeug zur bequemen grafischen Darstellung mathematischer Objekte, ein Dokumentationsmittel und noch etliches mehr.

Ein solches Universalwerkzeug trägt üblicherweise den Spitznamen »Eier legende Wollmilchsau«, und das ist nicht nur freundlich gemeint. Wer alles kann, kann nichts davon so gut wie ein Spezialist und ist obendrein dick, schwerfällig und nur mühsam lenkbar.

»Dick« trifft zweifellos zu. Das komplette Programmpaket umfasst reichlich 1000 Megabyte und kostet einen kommerziellen Nutzer zurzeit 3185 Euro. Fürs Studium und die Nutzung zum Privatvergnügen wird der Kode zu weniger als einem Zehntel des Preises angeboten.

Das Attribut »schwerfällig« ist im Wesentlichen überholt. Teile des Codes sind neu und geschickter geschrieben worden; vor allem aber ist die Rechenleistung der neueren PCs so stark angestiegen, dass nur wirklich schwierige, mit viel Probieren verbundene Aufgaben noch merklich Zeit erfordern.

Die Lenkbarkeit allerdings haben die Schöpfer von »Mathematica« nicht wesentlich einfacher gemacht. Das konnten sie nicht, wenn sie nicht eine der entscheidenden Stärken des Produkts aufgeben wollten: die einheitliche Struktur. »Everything is an expression«: Alles, was man Mathematica zu tun aufgibt, und alles, was das Programm verarbeitet und schließlich an den Benutzer zurückgibt, folgt einem einheitlichen Schema,

mit dem angenehmen Effekt, dass jedes Zwischenprodukt der Arbeit von jedem der zahlreichen Untermodule ohne Weiteres verstanden und weiterverarbeitet werden kann. Diesem Schema muss auch der Anwender folgen – was gewöhnungsbedürftig ist. Dass die in Mathematica eingebauten Funktionen alle mit Großbuchstaben beginnen und die Argumente einer Funktion in eckigen Klammern stehen, ist dabei nur der Anfang.

Mangelnde Kompetenz auf Spezialgebieten ist dem Softwarepaket allerdings schwerlich vorzuwerfen. Mit jeder neuen Version haben die Programmierer aus Champaign neue Elemente hinzugefügt, von speziellen Funktionen mit Eigennamen wie Airy, Hermite, Chebyshev oder Gegenbauer, die nur einen engen Kreis von Spezialisten interessieren, bis hin zu sehr universellen Werkzeugen zur numerischen Lösung von Differenzialgleichungen (Spektrum der Wissenschaft 2/2000, S. 100, und Spezial 4/2003 »Omega«, S. 52).

»Manipulate«, das neue Zauberwerkzeug

Es bleibt ein erheblicher Aufwand, sich Mathematica samt den erforderlichen Fertigkeiten im Umgang damit zuzulegen – zu viel für den, der nur gelegentlich die Lösung eines speziellen Problems sucht. Um auch diesen Leuten Zugang zu den Segnungen des Programms zu gewähren, ohne dabei die Preise zu verderben, hat sich der Hersteller Wolfram Research Inc. allerlei einfallen lassen. So darf man, nach Vereinbarung mit Wolfram Research, auf einer Webseite Lösungen für eine Klasse von Problemen anbieten: Der Benutzer gibt die Daten ein, und Mathematica rechnet es aus (»webMathematica«); auch wir haben – bisher in einem Fall – von dieser Möglichkeit Gebrauch gemacht (www.spektrum.de/artikel/908146).



WOLFRAM RESEARCH COMPANY

Das Logo von Mathematica ist seit jeher ein zum Stern veredelltes Dodekaeder – Musterstück für die Grafikfähigkeiten der Software. Hier das Logo der aktuellen Version 7

Vorgefertigte Mathematica-Dateien, so genannte Notebooks, darf ohnehin jedermann mit dem kostenfrei erhältlichen »MathReader« abspielen. Wolfram Research selbst stellt dafür eine überaus ergiebige Quelle bereit. »Wolfram Demonstrations« ist eine handverlesene Sammlung von Notebooks der verschiedensten Autoren, die vor allem, aber nicht nur, klassische Themen der Schulmathematik in appetitlicher Form visualisieren.

Aber die bahnbrechende Neuentwicklung in Version 6, die aus dem passiven Konsum fremder Werke eine aktive Beteiligung des Nutzers macht, ist die Funktion »Manipulate«. Man wende sie auf eine komplizierte Berechnung oder vor allem eine Grafik an, und schon kann jeder, auch der Benutzer des MathReader, mit der Maus einen virtuellen Schieberegler betätigen und damit einen ganzen Parameterbereich durchfahren. Damit bekommt man ein ziemlich unmittelbares Gefühl dafür, wie eine Funktion, ein geometrisches Gebilde oder noch Komplizierteres von den Daten des Problems abhängt. Eine Variante erlaubt es, an Stelle des Schiebereglers ein Fadenkreuz in die Grafik selbst einzusetzen und damit das geometrische Gebilde im Wortsinn zu manipulieren.

Das Anwendungsbeispiel im Kasten auf der nächsten Doppelseite ist aus meinem Versuch hervorgegangen, Klarheit über das Verhalten von Eva Wohls »Korpuskeln« zu gewinnen, die

ich im Juniheft in dieser Rubrik beschrieben habe. Wie kommt es, dass in einer Korpuskelkette jedes dritte Element wieder dieselbe Gestalt annimmt?

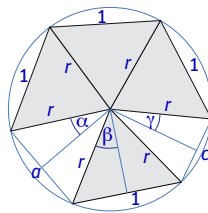
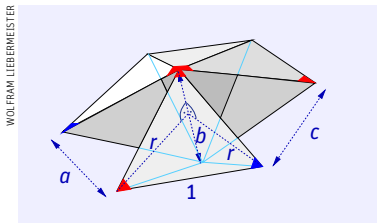
»Manipulate« ist die wesentliche Neuerung von Version 6 und hat ihre Entwickler reichlich Zeit gekostet. Obendrein sind die Grafiken glatter, ansprechlicher und farbenfroher geworden;

dreidimensionale Grafiken kann man jetzt ohne Weiteres mit der Maus um verschiedene Achsen rotieren; und durch die Farbgebung des Eingabetextes macht Mathematica bereits klar, wie es ihn interpretieren wird.

Es? Er? In Gesprächen mit mir selbst und anderen ist die Software Mathematica eine nicht weiter bestimmte (männ-

liche) Person: »er«; so ist auch das Anwendungsbeispiel im Kasten formuliert. Diese Personifizierung ist allgemein üblich – viele Leute beschimpfen ihren Computer – und in diesem Fall besonders naheliegend. Mathematica ist nicht nur sehr komplex, sondern hat auch noch persönliche Eigenheiten. In gewissen Dingen ist »er« äußerst raffiniert, in

MATHEMATICA IN AKTION: DIE GEOMETRIE DER KORPUSKELN



Die Bodenpunkte der Doppelpyramide, aus der ein Korpuskel entsteht, liegen alle auf einem Kreis, dessen Radius r über den Satz des Pythagoras von der Schnabelbreite b (der doppelten Pyramidenhöhe) abhängt: $r^2 + (b/2)^2 = 1$, wobei die Seitenlänge des Dreiecks auf 1 normiert ist. In der Projektion auf die Bodenebene (rechts) verbraucht ein Segment den Winkel 2β mit $\sin\beta = 1/(2r)$. Der erste Schnabel hat die (noch frei wählbare) Öffnung a mit dem Öffnungswinkel 2α , $\sin\alpha = a/(2r)$. Für den zweiten Schnabel bleibt so viel Öffnungswinkel (2γ), wie die vier Segmente und der erste Schnabel vom Vollkreis übriglassen. Dessen Öffnung ist $c = 2r\sin\gamma = 2r\sin(\alpha + 4\beta)$. Wie hängt c von a und b ab?

Der Anfang ist nicht schwer. Ich löse nach α (im Mathematica-Text: a1) und β (be) auf und setze ein:

In[1]:= a1 = ArcSin[a / (2 r)]

Out[1]:= ArcSin[$\frac{a}{2r}$]

In[2]:= be = ArcSin[1 / (2 r)]

Out[2]:= ArcSin[$\frac{1}{2r}$]

In[3]:= c = 2 r Sin[a1 + 4 be]

Out[3]:= 2 r Sin[4 ArcSin[$\frac{1}{2r}$] + ArcSin[$\frac{a}{2r}$]]

Damit ich mit dieser Darstellung etwas anfangen kann, will ich den Sinus und seine Umkehrfunktion Arcussinus herauswerfen. Dazu muss ich das Additionstheorem für die Sinusfunktion anwenden. Das könnte er bestimmt automatisch; da aber nicht einfach herauszufinden ist, wie man ihn dazu veranlasst, schreibe ich die Regel lieber explizit hin: Suche nach Termen der Form $\sin(x+y)$ und ersetze sie durch $\sin x \cos y + \cos x \sin y$.

In[4]:= c1 = c /. Sin[x_ + y_] -> Sin[x] Cos[y] + Cos[x] Sin[y]

Out[4]:= 2 r $\left(\frac{a \cos[4 \text{ArcSin}[\frac{1}{2r}]]}{2r} + \sqrt{1 - \frac{a^2}{4r^2}} \sin[4 \text{ArcSin}[\frac{1}{2r}]] \right)$

Schon besser. Er hat nicht nur die Regel $\arcsin(\sin x) = x$ angewandt, sondern auch $\arcsin(\cos x) = \sqrt{1-x^2}$; ein bisschen voreilig, es hätte ja auch das negative Vorzeichen vor der Wurzel sein können, aber in diesem Fall unproblematisch, denn alle beteiligten Winkel liegen zwischen 0 und $\pi/2$.

Jetzt müssen wir noch die Formeln für den Sinus des doppelten Winkels zweimal anwenden, was ich wieder explizit vorgebe:

In[5]:= c2 = c1 /. Sin[4 x_] -> 4 Sin[x] Cos[x] (1 - 2 Sin[x]^2)

Out[5]:= 2 r $\left(\frac{2 \left(1 - \frac{1}{2r^2}\right) \sqrt{1 - \frac{1}{4r^2}} \sqrt{1 - \frac{a^2}{4r^2}} + a \cos[4 \text{ArcSin}[\frac{1}{2r}]]}{r} + \frac{a \cos[4 \text{ArcSin}[\frac{1}{2r}]]}{2r} \right)$

In[6]:= c3 = c2 /. Cos[4 x_] -> 1 - 8 Sin[x]^2 (1 - Sin[x]^2)

Out[6]:= 2 $\left(\frac{2 \left(1 - \frac{1}{2r^2}\right) \sqrt{1 - \frac{1}{4r^2}} \sqrt{1 - \frac{a^2}{4r^2}} + a \left(1 - \frac{2 \left(1 - \frac{1}{4r^2}\right)}{r^2}\right)}{r} \right) r$

Das sieht man doch, dass durch Auflösen der Klammer der Ausdruck erheblich einfacher wird. Aber das tut er nicht von allein; man muss ihn ausdrücklich darum bitten.

In[7]:= c3 = c3 // Expand

Out[7]:= a + 4 $\sqrt{1 - \frac{1}{4r^2}} \sqrt{1 - \frac{a^2}{4r^2}} + \frac{a}{2r^4} - \frac{2a}{r^2} - \frac{2 \sqrt{1 - \frac{1}{4r^2}} \sqrt{1 - \frac{a^2}{4r^2}}}{r^2}$

Das allgegenwärtige r interessiert mich eigentlich nicht; ich will auf die Variable b hinaus. Höchste Zeit, überall r durch $\sqrt{1-(b/2)^2}$ zu ersetzen.

In[8]:= c4 = c3 /. r -> Sqrt[1 - (b / 2)^2]

Out[8]:= a + $\frac{a}{2 \left(1 - \frac{b^2}{4}\right)^2} - \frac{2a}{1 - \frac{b^2}{4}}$
 + 4 $\frac{\sqrt{1 - \frac{1}{4 \left(1 - \frac{b^2}{4}\right)}} \sqrt{1 - \frac{a^2}{4 \left(1 - \frac{b^2}{4}\right)}}}{1 - \frac{b^2}{4}} - \frac{2 \sqrt{1 - \frac{1}{4 \left(1 - \frac{b^2}{4}\right)}} \sqrt{1 - \frac{a^2}{4 \left(1 - \frac{b^2}{4}\right)}}}{1 - \frac{b^2}{4}}$

Das sieht nur so schlimm aus, weil er sich nicht traut, die Brüche auf den Hauptnenner zu bringen. Aber mit FullSimplify probiert er eine große Palette von Möglichkeiten.

anderen eher ungeschickt, und wer etwas von ihm will, tut gut daran, seine Wünsche geeignet auszudrücken.

Nach der langen Pause und dem großen Wurf von Version 6 im Frühjahr 2007 folgte bereits ein Jahr später Version 7. Neu ist diesmal, neben den üblichen kleinen Verbesserungen, vor allem der Zugriff auf große Datenbestände:

Wetter, DNA-Sequenzen, Börsenkurse, geografische Daten, englische Vokabeln und noch mehr. Wozu dieser mathematikfremde Ausflug in die reale Welt? Ein Blick in die aktuellen Nachrichten klärt das Rätsel: Das braucht Mathematica, um die neue allgemeine Beantwortungsmaschine »Wolfram|alpha« betreiben zu können.



Christoph Pöppe ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«. Seinen mathematischen Spieltrieb lebt er häufig mit Hilfe von Mathematica aus (siehe zum Beispiel www.wissenschaft-online.de/artikel/773614).

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/995471.

```
In[9]:= c5 = FullSimplify[c4]
```

$$\text{Out[9]} = \frac{a(-8 + b^4) + 4\sqrt{\frac{-3+b^2}{-4+b^2}}\sqrt{\frac{-4+a^2+b^2}{-4+b^2}}(8 - 6b^2 + b^4)}{(-4 + b^2)^2}$$

Das also ist die gesuchte Funktion $c(a, b)$. Viel schöner wird es nicht. Warum er die beiden gleichen Nenner nicht aus dem Produkt der Wurzeln zieht, bleibt sein Geheimnis. Vielleicht weil die Vorzeichen nicht klar sind; er kann nicht wissen, dass b stets zwischen 0 und 1,15 liegt. Aber viel bringen würde diese Umformung ohnehin nicht.

Wolfram Liebermeister hat durch seine numerischen Experimente einen Fixpunkt der Abbildung gefunden, genauer: die Zahl $a = 0,765367$ mit der Eigenschaft $a = c(a, a)$. Das ist der Zustand der Korpuskelkette, in dem alle Schnäbel gleich weit geöffnet sind. Schauen wir nach, ob die Software Mathematica diese Lösung auch findet.

```
In[10]:= faa = c5 /. b -> a
```

$$\text{Out[10]} = \frac{a(-8 + a^4) + 4\sqrt{\frac{-3+a^2}{-4+a^2}}\sqrt{\frac{-4+2a^2}{-4+a^2}}(8 - 6a^2 + a^4)}{(-4 + a^2)^2}$$

```
In[11]:= Solve[faa == a, a]
```

$$\text{Out[11]} = \left\{ \left\{ a \rightarrow -\sqrt{3} \right\}, \left\{ a \rightarrow \sqrt{3} \right\}, \left\{ a \rightarrow \sqrt{2 - \sqrt{2}} \right\}, \left\{ a \rightarrow -\sqrt{2 + \sqrt{2}} \right\} \right\}$$

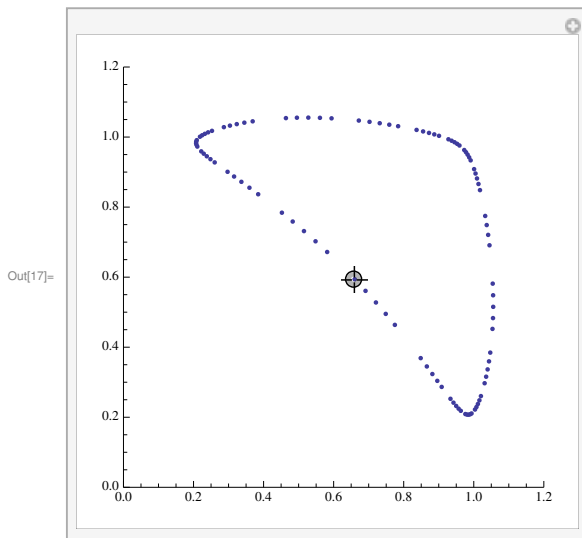
Überraschung! Eine ziemlich komplizierte Gleichung mit Wurzeltermen hat die relativ einfache Lösung $a = \sqrt{2 - \sqrt{2}}$. Alle anderen liegen außerhalb des zulässigen Bereichs. Eine kurze Nachprüfung ergibt, dass das tatsächlich Wolframs Lösung ist.

Der unerwartete Treffer veranlasst mich zu weiterem Nachbohren. Wolfram hatte aufeinanderfolgende Zustände der Korpuskel in einer Kette in einem (a, b) -Diagramm aufgetragen und beobachtet, dass sie stets auf einer geschlossenen Kurve liegen. Diese Kurven umlaufen sämtlich den Fixpunkt, sind in seiner Nähe ellipsenförmig und weiter draußen immer verdellterter.

Ich schaue mir diese Kurven mit der Funktion `Manipulate` an. Das Fadenkreuz kann ich mit der Maus bewegen; der zugehörige Punkt im (a, b) -Diagramm ist der Anfangswert einer Korpuskelkette mit 100 Gliedern. Und siehe da, mit der Maus kann ich die ganze Kurvenschar durchfahren (Bild rechts oben).

Haben diese Kurven eine explizite algebraische Darstellung? Das wäre ja schön; doch als ich sehe, wie stark die Kurven weit draußen ausfransen, komme ich von der Idee ab.

```
In[17]:= Manipulate[nm = 100; cit = RecurrenceTable[{ci[n] == cc[ci[n - 2], ci[n - 1]], ci[1] == p[[1]], ci[2] == p[[2]]}, ci, {n, nm}]; ListPlot[Table[{cit[[j]], cit[[j + 1]]}, {j, 1, nm - 1}], PlotRange -> {{0, 1.2}, {0, 1.2}}, AspectRatio -> Automatic, {p, {.7, .7}}, Locator]
```



Aber was ist nun mit der empirisch beobachteten Dreierperiode? Dazu lasse ich mir statt 100 nur drei Folgenglieder anzeigen. Hier zeigt die Funktion `Manipulate` ihre wahren Stärken. Ich versuche, mit der Maus den dritten Punkt im Fadenkreuz einzufangen. Das gelingt natürlich am Fixpunkt; aber überall sonst läuft er mir davon – bis ich in die rechte untere Ecke des Diagramms fahre und einen Treffer lande. Wieder Überraschung! Der Punkt $(0,993367, 0,993367)$ ist ein periodischer Punkt der Abbildung c mit Periode 3.

Wieder suche ich nach einer algebraischen Darstellung. Diesmal allerdings vergeblich: Ich biete ihm die Gleichung in den verschiedensten Formen an. Jedes Mal verfällt er in dumpfes Brüten, aus dem ich ihn Stunden später mit Gewalt herausreiße.

Das ist merkwürdig. Die paar Wurzeln lassen sich mit Schultmitteln wegschaffen: Multipliziere die Gleichung mit dem Hauptnenner, bringe alle Terme mit Wurzeln auf die linke Seite der Gleichung, quadriere, sortiere wieder nach Termen mit und ohne Wurzel und quadriere abermals. Das macht er auch ganz brav, als ich es ihm detailliert vorschreibe. Heraus kommt ein Polynom 14. Grades, das keine schöne Faktorisierung hat.

Das glaube ich ihm; ich weiß, dass er sich mit Polynomen auskennt. Unklar bleibt, warum er meine Nachhilfe benötigte, um auf die Polynomgleichung zu kommen.

Christoph Pöppe

Das Versteckspiel der

Bisher konnten Forscher keine speziellen Gene für Intelligenz aufspüren. Dennoch ist Begabung zweifellos erblich, zumindest teilweise. Das Phänomen bildet sich anscheinend auf viel komplexere Art heraus als bisher vermutet.

Von Carl Zimmer

In Kürze

- Heutige Untersuchungsverfahren erlauben es, nach dem Hintergrund von Intelligenz sowohl im Erbmaterial als auch im Gehirn selbst zu forschen. Doch je weiter **die Suche nach Intelligenzgenen** vorankommt, desto rätselhafter wird das Bild.
- Intelligenz scheint sich demnach anders zu strukturieren als bisher angenommen. Vor allem dürfte das **Wechselspiel zwischen Anlage und Umwelt** unerwartet komplex und vielschichtig aussehen.

Einen langen Atem braucht Robert Plomin für seine Forschung. Der amerikanische Psychologe und Verhaltensgenetiker, der am Institut für Psychiatrie des Londoner King's College arbeitet, möchte das Wesen der Intelligenz ergründen. Vor Jahren schon initiierte er eine Langzeitstudie, in der er seitdem die geistige Entwicklung von weit über 20000 Kindern verfolgt. Die Jungen und Mädchen müssen in regelmäßigen Abständen Fragen beantworten wie: »Was ist bei Wasser und Milch gleich?« oder: »In welcher Richtung geht die Sonne unter?« Früher geschah das im direkten Gespräch oder per Telefon. Inzwischen sind viele der jungen Teilnehmer Teenager, und sie bearbeiten die Tests per Internet.

Wenn man so will, erbrachte die Studie durchaus wichtige Zusammenhänge. Alle Kinder, die mitmachen, sind Zwillinge – anfangs 15000, heute noch 13000 Paare aus den britischen Jahrgängen 1994 bis 1996. Die Daten zeigen: Tendenziell haben eineiige Zwillinge durchgehend ähnlichere Messwerte

als zweieiige. Letztere wiederum gleichen einander in ihrer Intelligenz im statistischen Mittel mehr als nicht miteinander verwandte Kinder. Für die Wissenschaftler besagen diese Ergebnisse – wie auch weitere Studien –, dass Gene einen bedeutenden Anteil daran haben, wie Kinder in Intelligenztests abschneiden.

Intelligenzforscher Robert Plomin möchte aber mehr wissen: Er will jene Gene finden. Als er die Studie konzipierte, konnte er noch nicht ahnen, welche effektive Untersuchungsverfahren Genforschern bald zur Verfügung stehen würden. Heute durchmustert Plomins Team das Erbgut der Versuchsteilnehmer mit Hilfe spezieller Chips, so genannter Mikroarrays. Solche Chips können zugleich eine halbe Million verschiedene DNA-Schnipsel erkennen. Das leistungsstarke Verfahren erlaubt es nun, auf tausende Kinder angewendet, selbst solche Gene aufzuspüren, die sich nur in ganz geringem Grad auf die Leistungen in einem Intelligenztest auswirken.

Noch nie hatte jemand derart – vor allem in diesem Umfang – nach Erbanlagen für Intelligenz gefahndet. Umso kläglicher war das Ergebnis, das hier schon einmal vorwegge-



Intelligenz

nommen sei: Lediglich sechs so genannte genetische Marker (charakteristische Abschnitte im Erbgut, die auf dort liegende Gene hinweisen) tauchten auf, die überhaupt irgendwie in einem engeren Zusammenhang mit dem Intelligenzwert zu stehen schienen. Bei der statistischen Auswertung wurde die Enttäuschung noch größer. Danach blieb nur ein einziges Gen übrig, und dieses erklärte gerade einmal 0,4 Prozent der Leistungsunterschiede (siehe Kasten S. 81).

Intelligenzforscher sind solchen Frust gewohnt – ob sie nun nach Genen suchen, Hirnaufnahmen vergleichen oder sich sonstige Raffinessen ausdenken, um zumindest ein paar der Prozesse zu erkennen, die ablaufen, wenn Erbanlagen und Umwelteinflüsse wie in einer komplizierten Choreografie die Intelligenz formen. Zwar beginnt sich langsam abzuzeichnen, inwiefern sich Intelligenzunterschiede im Aufbau des Gehirns und in manchen seiner Funktionen widerspiegeln. Auch sind einige Forscher damit befasst, ein neues Bild von Intelligenz zu entwerfen. Sie glauben, dass es im Grunde darauf ankommt, wie Informationen durch das Gehirn strömen. Trotzdem bleibt

Zur Verblüffung der Forscher gelang es ihnen bisher nicht, spezielle Intelligenzgene dingfest zu machen.



CARY WOLINSKY



Seit Jahrzehnten arbeitet der Verhaltensgenetiker Robert Plomin mit Zwillingen. Er möchte so die genetische Basis der Intelligenz ergünden. Doch die Suche erweist sich als unerwartet verzwickelt.

das Phänomen Intelligenz für die Forschung ein großes Rätsel. »Es ist schon erstaunlich, wie wenig wir letztlich darüber wissen«, meint die Psychologin Wendy Johnson von der University of Minnesota in Minneapolis.

Andererseits erscheint Intelligenz auch wieder leicht zu fassen. »Jeder erkennt sie bei anderen«, betont der Verhaltensgenetiker Eric Turkheimer von der University of Virginia in Charlottesville. »Jeder weiß, dass manche Leute gescheiter sind als andere, was immer das letztlich heißt.« Doch so einfach lässt sich dieses Bauchgefühl nicht in Wissenschaft ummünzen. Im Jahr 1996 hieß es in einem Artikel der American Psychological Association lapidar: »Menschen sind verschieden gut darin, komplexe Gedanken zu verstehen, sich auf ihre Umwelt einzustellen, aus Erfahrung zu lernen, logisch zu denken und Probleme durch Nachdenken zu lösen.«

Im frühen 20. Jahrhundert erdachten Psychologen alle möglichen Tests, um verschiedene Denkformen zu erfassen – zum Beispiel für Mathematik, Raumvorstellung oder Sprache. Um die Messergebnisse miteinander vergleichen zu können, schufen einige Forscher dann Standardskalen für Intelligenz. Am bekanntesten wurde der so genannte Intelligenzquotient oder IQ, wobei die Durchschnittsintelligenz gleich 100 gesetzt wird.

Ein IQ ist nun allerdings nicht irgendetwas Beliebiges. Denn er erlaubt durchaus recht verlässliche Voraussagen für verschiedene Lebensaspekte. So zeigt der Messwert eines kleineren Kindes in etwa, wie gut es einmal in Schule oder Beruf zurecht kommen wird. Sogar wie alt jemand wird, hängt tendenziell vom IQ ab. Aber: »Sagt der IQ eines Menschen uns alles über seine geistigen Stärken und Schwächen? Oh nein!«, behauptet der In-

telligenzforscher Richard J. Haier von der University of California in Irvine. Und doch habe diese Zahl große Aussagekraft. »Vergleichen Sie das mit einem Arztbesuch. Als Erstes werden Blutdruck und Temperatur gemessen. Keiner behauptet, dass der Arzt jetzt alles über den Zustand seines Patienten weiß. Doch die beiden Zahlen liefern ihm wertvolle Anhaltspunkte.«

Nur – worüber gibt ein Intelligenztestwert Aufschluss? »Auf jeden Fall steckt irgendetwas dahinter«, meint der Kinderpsychiater Philip Shaw vom amerikanischen National Institute of Mental Health (NIMH) in Bethesda (Maryland), der die Gehirnentwicklung von Kindern vergleicht. Die einflussreichste Theorie zur Aussagekraft von solchen Messwerten ist über 100 Jahre alt. Sie stammt von dem britischen Psychologen Charles Spearman, der 1904 aufzeigte, dass Personen, die sich in einer Testart hervortun, in der Regel auch in anderen Verfahren gut abschneiden. Besonders groß war der Zusammenhang zwar nicht, doch befand Spearman ihn für deutlich genug, um eine Größe für generelle oder allgemeine Intelligenz zu deklarieren, die er G-Faktor (G-Wert) nannte.

Wie sich solch eine Allgemeinintelligenz in der Hirnentwicklung ausbilden könnte, war ihm aber nicht klar. Seit ein paar Jahrzehnten suchen Experten nun in Ergebnislisten von Intelligenztests, also für große Personengruppen, nach irgendwelchen erklärenden Mustern. Grob gesagt gibt es zwei Einflussbereiche: zum einen die Umwelt – also alles, was von außen kommt, vom Verhalten der Eltern bis hin zu Krankheiten; zum anderen die Gene oder besser das Erbgut, das dabei mitwirkt, wie das Gehirn heranreift.

Seit den 1960er Jahren gewinnen Wissenschaftler Erkenntnisse hierzu gern an Zwillingen. Die Idee dahinter: Falls Gene die Intelligenz überhaupt nicht beeinflussen, sollten die Testergebnisse eineiiger Zwillinge, die getrennt aufwachsen, einander im Durchschnitt nicht ähnlicher sein als die Werte von nicht miteinander verwandten Kindern. Gibt es aber genetische Einflüsse, müssten sich die Daten von eineiigen Zwillingen wegen ihrer im Prinzip identischen Genausstattung stärker ähneln.

Und tatsächlich: »Eineiige Zwillinge stimmen im Test ebenso gut überein wie ein und derselbe Mensch mit sich selbst, wenn man ihn ein Jahr später nochmals prüft«, weiß Plomin. »Sogar wenn sie getrennt aufwachsen, ähnelt sich ihre Intelligenz fast so stark, als würden sie zusammen groß werden.« Allerdings zeigt sich das erst mit den Jahren. Hierzu ergänzt der Psychologe: »Im Alter von 16 Jahren gleicht der IQ von Adoptivkindern



dem ihrer biologischen Eltern ähnlich stark wie der von bei den leiblichen Eltern aufgezogenen 16-Jährigen.« Deswegen ist er davon überzeugt, dass Gene über die Intelligenz mitentscheiden, wenn auch bestimmt nicht allein.

Als er sich Anfang der 1990er Jahre entschloss, nach solchen Genen zu fahnden, hielten ihn viele seiner Kollegen für leicht verrückt. Mitstreiter gab es zunächst kaum. Weil das menschliche Genom damals noch nicht kartiert war, konnte man es auch nicht, wie heute, einfach bei großen Personengruppen nach bezeichnenden Genen durchmustern. Allerdings hatten die Genetiker bereits etliche Erbanlagen identifiziert, von denen bestimmte Mutationen (Varianten) oft mit geistiger Behinderung einhergehen. Darum vermutete Plomin, andere Varianten der gleichen Gene könnten geringfügigere Intelligenzunterschiede bedingen. Folglich verglichen er und seine Mitarbeiter das Erbgut von Kindern, die in Intelligenztests entweder viel besser oder deutlich schlechter als der Durchschnitt waren. Zwar fanden sich so etwa 100 Gene, die in einer der beiden Gruppen auffallend häufig vorkamen, doch die Suche nach entscheidenden Varianten dieser Erbanlagen blieb ziemlich erfolglos.

Winziger Einfluss der Gene

Daraufhin weitete Plomin den Ansatz aus und prüfte nun Tausende von genetischen Markern, deren Ort auf den Chromosomen bekannt ist und die dabei helfen können, in ihrer Nähe liegende Gene aufzuspüren. Immerhin erschien es möglich, dass einzelne Marker bei einer von beiden Gruppen häufiger vorkamen als bei der anderen, und das wiederum konnte bedeuten, dass dort ein Gen lag, das die Intelligenz beeinflusste (Kasten S. 78/79). Um selbst noch schwache Effekte zu erkennen, wurde die Zahl der teilnehmenden Kinder erhöht. Doch als Plomin schließlich glaubte, zumindest eine verdächtige Erbanlage gefunden zu haben – es handelte sich um das Gen *IGF2R* für einen im Gehirn aktiven Wachstumsfaktorrezeptor –, ließ sich der Befund mit anderen Datensätzen nicht reproduzieren.

Nun war zu überlegen: Müsste man für ein klares Ergebnis mit mehr Markern arbeiten, das heißt engere Maschen, ein feineres Netz über das Genom legen? Denn je näher zwei DNA-Abschnitte einander sind, desto eher bleiben sie zusammen, wenn die elterlichen Chromosomen Stücke austauschen. Vielleicht gab es ja doch Intelligenzgene – nur eben in so großer Distanz zum nächsten der gewählten Marker, dass sie lediglich in einem Teil der Fälle mit ihm zusammen vererbt wurden und der Zusammenhang deswegen verwischte.

INTELLIGENZ MESSEN

Den ersten weithin angewandten Intelligenztest entwickelte im Jahr 1905 der französische Psychologe Alfred Binet. Dieser Test sollte die Schulleistungen von Kindern vorhersagen, vor allem auch zeigen, wer von ihnen eine Zusatzförderung nötig haben würde. Seitdem werden spezielle Tests eingesetzt, um zum Beispiel Defizite im mathematischen oder sprachlichen Verständnis oder im räumlichen Denken zu erfassen, aber auch, um die Bandbreite normaler Intelligenz zu erkennen. Die Ergebnisse der gebräuchlichsten Mehrfach-Kognitionstests korrelieren mit der schulischen Leistung. Dennoch erklären sie davon nur 25 Prozent. Da allerdings das Abschneiden in den verschiedenen Bereichen solcher Tests oft korreliert, scheinen diese Verfahren dennoch in etwa die allgemeinen geistigen Fähigkeiten zu erfassen.

Es gibt keinen spezifischen Test, der speziell die allgemeine Intelligenz – »G« genannt – bestimmt. Sie wird vielmehr statistisch aus anderen Ergebnissen erschlossen.

Mittlerweile waren die eingangs erwähnten Mikroarrays verfügbar, die 500 000 Marker zugleich erfassen. Plomins Team nahm diesmal von 7000 Kindern Abstriche der Mundschleimhaut, aus denen es die DNA isolierte und mit den genetischen Chips prüfte. Plomins Kommentar zu dem vorn angedeuteten kargen Befund von ganz wenigen überhaupt verdächtigen Erbanlagen, deren Einfluss auf die Intelligenz außerdem verschwindend gering war (Kasten S. 81): »Das wir Intelligenzgene gefunden haben, behaupte ich lieber nicht. Es gab zu viele falsch positive Ergebnisse. Die Effekte sind allenfalls so winzig, dass man schon sehr viele solche Studien bräuhete, um sich sicher sein zu dürfen.«

Aufschlussreich ist solch ein Befund nach Ansicht des Forschers dennoch. Seine Zwillingsstudien bestärken ihn nach wie vor in der Überzeugung, dass es Gene gibt, die sich auf die Intelligenz auswirken. »Letztlich sind tatsächlich DNA-Unterschiede dafür verantwortlich. Nur wirkt sich jede bisher entdeckte Variante lediglich ein ganz klein wenig aus. Wer hätte gedacht, dass selbst die größten Effekte nicht einmal ein Prozent ausmachen?« Hunderte, vielleicht sogar tausende Gene dürften somit am erblichen Anteil von Intelligenz mitwirken. An Erbanlagen, die spezifisch sprachliche Fähigkeiten oder das räumliche Vorstellungsvermögen unterstützen, glaubt Plomin nicht. Denn seiner Zwillingsforschung zufolge erzielt ein Mensch in Tests auf verschiedene Begabungen oft überall ähnlich hohe Leistungen.

Zudem erkennt der Forscher in seinen Befunden auch einiges dazu, wie sich das Verhalten der betreffenden Erbanlagen im Gehirn widerspiegelt: »Wegen der Vielzahl von Genen mit jeweils kleinem Gesamteinfluss ist es höchst unwahrscheinlich, dass sie alle in ein-



CARY WOLINSKY

DIE SCHWIERIGE FRAGE NACH ANLAGE UND UMWELT

Zwillingsstudien sind seit Langem beliebt, um den Beitrag des Erbguts beziehungsweise der Umwelt zu individuellen Merkmalen zu erkennen. Wie stark verwoben beides miteinander ist, auch dass es Wechselwirkungen in beide Richtungen gibt, erkennen die Forscher zunehmend. Kürzlich lief auch beim **Mannheimer Zentralinstitut für Seelische Gesundheit** eine Studie an, in der an Zwillingen untersucht werden soll, inwiefern genetische Anlagen unsere individuellen Denkmuster und Hirnleistungen beeinflussen.



und demselben Hirnareal agieren.« Eher dürften diese intelligenzgekoppelten Faktoren ein großes Netzwerk beeinflussen, das verschiedene Hirnregionen umfasst. Womöglich, sinniert Plomin, hat jeder von ihnen je nach Gebiet eine Anzahl ganz unterschiedlicher Wirkungen. Dies genauer zu ergründen, dürfte aber wohl noch einige Zeit brauchen. Vor allem steht ja immer noch eine Liste von Erbanlagen aus, die unstrittig die individuelle Arbeitsweise des Gehirns mitbestimmen und die mit Intelligenztestwerten korrelieren.

Interessiert verfolgt der Psychologe derweil neuere Studien, in denen Forscher an Hirnaufnahmen untersuchen, ob man dem Denkorgan seine Intelligenz ansieht.

Philip Shaw und seine Kollegen am NIMH analysierten Hirnscans von Schulkindern, die im jährlichen Abstand aufgenommen worden waren. Sie verglichen dabei die Entwicklung der Hirnrinde, des Kortex – somit einer entscheidenden Struktur der Informationsverarbeitung, die sich bis über das 20. Lebensjahr hinaus verändert. Tatsächlich spiegelten sich die Intelligenztestwerte in den Hirnentwicklungsmustern.

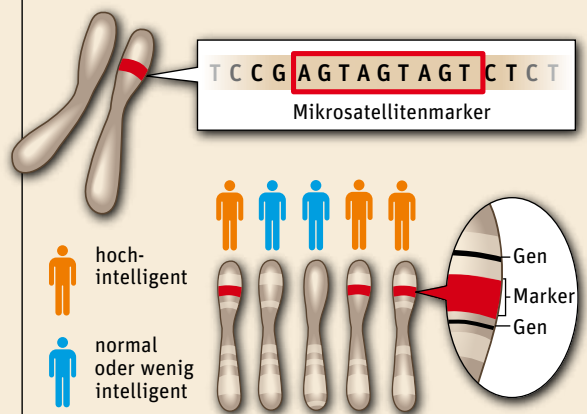
Generell nimmt die Rindendicke bei allen Kindern zuerst zu – durch neue Neurone und neue Verzweigungen der Nervenzellen. Später, wenn viele der zunächst angelegten Zellausläufer zurückgestutzt werden, wird der Kortex wieder dünner. Shaw entdeckte aber, dass diese Entwicklung in einigen Rindengebieten individuell etwas unterschiedlich abläuft – abhängig vom Intelligenzgrad. »Hochintelligente Kinder haben anfangs eine vergleichsweise sehr dünne Rinde. Am Ende ist sie dann aber insgesamt dicker als bei den meisten Kindern. Außerdem schrumpft sie bei den schlauen Teenagern besonders rasch.«

Andere Forscher stellten fest, dass bestimmte Hirnregionen bei Erwachsenen mit hohen Testwerten oft überdurchschnittlich groß ausgebildet sind. Dies hält Shaw zwar zumindest teilweise für einen Effekt von Außeneinflüssen. Allerdings seien jene Regionen auch bei Zwillingen tendenziell gleich groß. Demnach scheinen Gene hierbei zumindest mitzumischen. Kürzlich analysierte Richard Haier zusammen mit Rex Eugene Young von der University of New Mexico in Albuquerque die Daten von 37 Studien, in denen es

SUCHE NACH INTELLIGENZGENEN

Mit modernen genetischen Methoden

möchten Forscher herausfinden, inwiefern spezielle Gene die Intelligenz eines Menschen mitbestimmen. Dazu vergleichen sie die Genome vieler Personen mit unterschiedlich hohen Intelligenztestwerten hinsichtlich spezifischer Kennzeichen (in der Regel charakteristischer Sequenzen – so genannter Marker – der DNA), die sich etwa bei hoher Intelligenz häufen oder im Idealfall sogar nur dann auftreten. In dieser Hinsicht auffallende DNA-Abschnitte könnten auf benachbarte Intelligenzgene hinweisen – nur ließ sich bisher kein einziges solches Gen schlüssig nachweisen.



MARKERSEQUENZEN ALS SUCHHILFE

Als Marker kann eine kurze Sequenz auf der DNA dienen, bei der sich eine Bausteinfole mehrfach wiederholt (ein so genannter Mikrosatellitenmarker). Falls ein bestimmter Marker vor allem bei hochintelligenten Menschen auftaucht, kann man dort in der Nähe nach Intelligenzgenen suchen.



CARY WOLINSKY

um die Größe oder die Aktivität einzelner Hirnregionen ging. Wie Plomin vorhergesagt hätte, entdeckten sie kein einzelnes Intelligenzzentrum. Stattdessen machten sie an verschiedenen Stellen, sozusagen über die Hirnrinde verteilt, eine ganze Reihe einschlägiger Regionen ausfindig. Nach anderen Arbeiten könnten diese Gebiete jeweils auf eine bestimmte Kognitionsform bezogen sein. Haiers Kommentar dazu: »Wie es aussieht, begründet sich Intelligenz auf solch grundlegenden kognitiven Prozessen wie Aufmerksamkeit, Gedächtnis oder Sprachtalent.«

Die Studien befassten sich außer mit der Hirnrinde, auch graue Substanz genannt, mit den Verbindungssträngen zwischen Hirngebieten, der so genannten weißen Substanz. Wie sich zeigte, wirken diese Verbindungen bei hochintelligenten Menschen oft stärker geordnet als bei anderen. »Die weiße Substanz stellt praktisch die Verdrahtung dar«, sagt Haier. »Man könnte sich überlegen, dass Intelligenz zum einen mit Verarbeitungskapazität zusammenhängt, zum anderen mit Leitungsgeschwindigkeit. Die graue Substanz sorgt für die Verarbeitungskapazität, die weiße für die präzise abgestimmte Leitungsgeschwindigkeit« (siehe auch SdW 10/2008, S. 40).

Genau bei diesen beiden Funktionen des »Intelligenznetzwerks« vermutet Haier individuelle Unterschiede. Mag sein, dass bei hoher Intelligenz beide Bereiche gut ausgeprägt sind. »Vielleicht ragt aber auch nur eine Eigenschaft hervor. Ganz verschiedene Kombinationen könnten nach außen ein gleiches Bild abgeben. Somit mögen das zwei gleich intelligente

Menschen auf ganz anderem Weg erreichen.« Allerdings sei dies noch weit gehend spekulativ. Doch immerhin würden die Forscher den Hirnaufnahmen schon ein viel genaueres Verständnis des Phänomens Intelligenz verdanken: »Kennt man die Menge von grauer Substanz an wenigen bestimmten Stellen, vermag man den gesamten IQ vorherzusagen.« Möglicherweise müssten sich Schüler bald nicht mehr stundenlangen Eignungstests unterziehen, sondern sich nur für zehn Minuten in einen Hirnscanner legen.

Im Gehirn nichts Greifbares

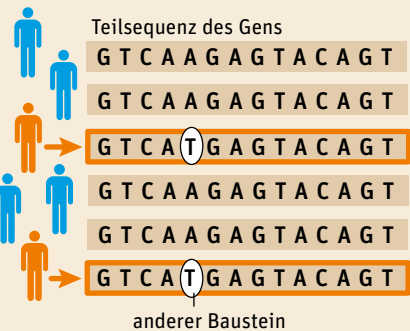
Solche Schlüsse halten andere Psychologen für verfrüht. Nach ihrer Ansicht sollte man weder dem IQ noch dem G-Wert eine so große Bedeutung beimessen. Im geistigen Bereich spiele sich sehr viel mehr ab, als dass räumliche Körper in der Vorstellung gedreht oder Muster ergänzt werden. »Ich halte die menschliche Intelligenz für eine sehr komplexe Sache mit vielen Fassetten«, erklärt der Verhaltensgenetiker Eric Turkheimer. Leider hätten die Forscher jene anderen Seiten bisher vernachlässigt. »So nützlich ein G-Faktor in vielem ist – ich glaube deswegen doch nicht, dass die menschliche Intelligenz etwas Einheitliches darstellt. Im Gehirn gibt es nichts Greifbares, das sozusagen dem G-Wert entspricht« – so, wie wir uns beim Reisen der Längen- und Breitengrade bedienen, obwohl sie nicht in die Erde eingekerbt sind.

Dagegen verteidigt Wendy Johnson den G-Faktor – weil er zumindest etwas Wesentliches aufzeige. Doch auch sie glaubt nicht, dass es für Intelligenz eine allgemeine, einheitliche

Statt stundenlange Eignungstests zu absolvieren, könnten sich Schüler bald kurz in einen **Hirnscanner** legen

VERDACHTSGENE IN DER PRÜFUNG

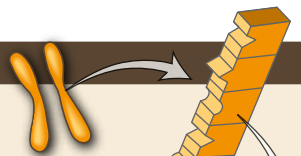
Gene in der engeren Auswahl – darunter auch solche, von denen schon vorher eine Wirkung auf eine Hirnleistung bekannt war – können auf Mutationen überprüft werden, etwa den Austausch eines einzigen Bausteins. Falls eine Variante eher bei hoher Intelligenz vorkommt, könnte es sich um ein die Intelligenz beeinflussendes Gen handeln.



gerasterte Prüfpalette (Mikroarray)

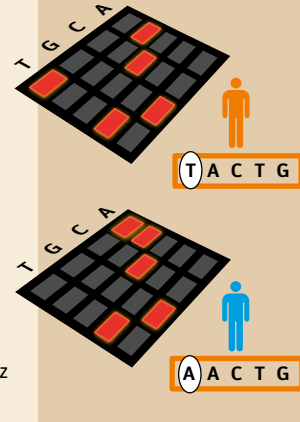


Zelle der Prüfpalette mit vielen DNA-Sonden (hier Säulen)



DNA-Sequenz vom getesteten Genom
 Fluoreszenzmarkierung
 A T
 DNA-Sonde
 getestete Sequenz passt zur Sonde: Signal tritt auf

Nachweis von Sequenzunterschieden



JEN CHRISTENSEN

GENOM IM TESTRASTER

Mit Testrastern (Mikroarrays), die eine große Anzahl Kurzsequenzen erkennen, wird die DNA vieler Personen auf Unterschiede von Genen und regulatorischen Sequenzen hin untersucht. Passt ein DNA-Abschnitt auf eine vorgegebene Sequenz im Testraster, erscheint dort ein Fluoreszenzsignal. So möchte man Gene beziehungsweise bestimmte Varianten finden, welche die Intelligenz beeinflussen (rechts).



CARY WOLINSKY

Messlatte gibt. »Intelligenz hat schon auch allgemeine Seiten. Trotzdem führt bei mir etwas anderes dazu als bei Ihnen. Das Gehirn ist so plastisch, dass jeder seine ganz eigene, verschiedenartige allgemeine Intelligenz herausbildet.«

Die Rolle von Genen hierbei festzumachen, dürfte auf jeden Fall sehr schwierig werden. Außerdem könnte sich so manche zunächst verdächtige Erbanlage bei näherer Betrachtung als Gen entpuppen, das die Intelligenz nur indirekt, über andere Wege, mitbestimmt – das im Gehirn selbst gar keine entsprechende Funktion besitzt. Turkheimer erklärt das an einem konstruierten Beispiel: Ein bestimmtes Gen beeinflusst die Weite des Geburtskanals. Frauen mit einer Variante für ein enges Becken hätten dann schwerere Geburten. Für ihre Kinder stiege dadurch das Risiko, Sauerstoffmangel zu erleiden. Im Durchschnitt erreichen die Kinder betroffener Frauen somit etwas niedrigere IQ-Werte als Kinder, deren Mütter die Genvariante für ein weites Becken tragen. Und da ein Teil die mütterliche Genvariante geerbt hat, könnte man verleitet sein, diese Erbanlage zum Intelligenzfaktor zu erklären.

Turkheimers eigene Befunde komplizieren die Sachlage noch zusätzlich. Der Forscher erkannte, dass das gleiche Gen je nach Außenbedingungen anders agieren kann. Er hatte bemerkt, dass an den Zwillingsstudien auffallend wenig arme Kinder teilnahmen. »Sehr arme Menschen haben weder Zeit noch Mit-

tel noch überhaupt Interesse an dergleichen.« Er fand dann aber andere Datensätze mit vergleichsweise mehr armen Kindern. So vermochte er die Intelligenztestdaten von einigen hundert Zwillingen mit ihren sozioökonomischen Lebensverhältnissen abzugleichen, wobei neben dem Familieneinkommen unter anderem auch die Bildung der Eltern berücksichtigt wurde. Für Kinder aus gut gestellten Familien galt: Varianten der IQ-Werte gingen zu rund 60 Prozent auf Erbanlagen zurück. Doch erstaunlicherweise fand sich bei den schlecht gestellten Kindern so gut wie kein solcher – genetischer – Einfluss.

Armut unterdrückt Geneinfluss

Dieses Ergebnis erschien im Jahr 2003, und im Mai 2007 konnten die Forscher das Gleiche an einem weiteren Datensatz aufzeigen. Diesmal hatten sie 839 Zwillingspaare verglichen, die 1962 an einem Stipendientest teilgenommen hatten. Wie bei der ersten Studie auch bestimmten Gene die Leistungsunterschiede von armen Kindern nur wenig mit. Sehr viel stärker taten sie das bei Kindern aus besseren Verhältnissen. Hieraus folgert Turkheimer: Armut bringt so mächtige Umwelteinflüsse mit sich, dass diese die Intelligenz lebenslang prägen, was schon im Mutterleib beginnt, während der ganzen Schulzeit geschieht und auch später noch fortdauert. Anscheinend können sich die genetischen Anlagen überhaupt erst in einer ökonomisch erträglichen und finanziell stabilen Umwelt bemerkbar machen.

Überdies vermögen umgekehrt aber auch Gene Umweltwirkungen auf die Intelligenz zu verändern. Britische Wissenschaftler entdeckten kürzlich, dass Stillen den IQ verbessern kann – allerdings galt das nur, wenn die Kinder eine bestimmte Variante eines bestimmten Gens besaßen. Brustkinder mit einer anderen Variante unterschieden sich nicht von Flaschenkinder.

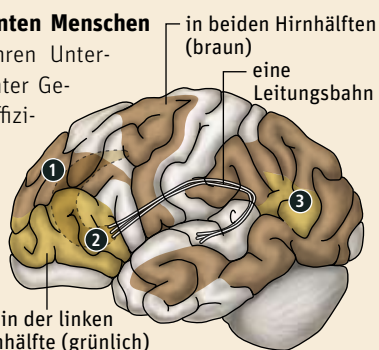
Weiterhin könnten sich Gene auch über das Verhalten eines Kindes auf die Intelligenzentwicklung auswirken. »Jeder schafft sich seine eigene Umwelt«, sagt dazu Wendy Johnson. »Einem Kind, das sich für Rechnen oder Kunst interessiert, wird man sicherlich eher ein Mathebuch oder Farbstifte geben. Nun übt es damit und wird sich bald von anderen Kindern abheben. Eltern reagieren eben auf

AUFSCHLUSSREICHE HIRNAUFNAHMEN

Zwischen hoch- und weniger intelligenten Menschen

zeigen die neuen bildgebenden Verfahren Unterschiede in Größe und Aktivität bestimmter Gehirnregionen. Wichtig scheint auch die Effizienz des Informationsaustauschs zu sein.

Nach diesen Daten nehmen Gebiete für logisches Denken (1), Sprache (2) oder die Integration von Sinnesreizen (3) unter anderem Einfluss. Zudem scheint es auch auf die Organisation der großen Leitungsbahnen anzukommen.



Dicke der Hirnrinde

 dünner Durchschnitt dicker

Die Entwicklung der Kortexdicke verläuft individuell unterschiedlich. Bestimmte Bereiche sind bei Kindern mit einem hohem IQ zuerst auffallend dünn, doch am Ende der Schulzeit sind diese Gebiete dicker als im Durchschnitt. Noch kennt man den Zusammenhang mit der Informationsverarbeitung nicht.



HIRN-ILLUSTRATION OBEN: JEN CHRISTIANSEN, NACH: REX EUGENE JUNG, UNM, UND RICHARD J. HAJER, UCI; REIHE UNTEN: PHILIP SHAW, NIMH CHILD PSYCHIATRY BRANCH

RIESENSTUDIE MIT WINZIGEM ERGEBNIS

Die bis dahin größte Studie zu möglichen Intelligenzgenen lieferte lediglich sechs Kandidaten (beziehungsweise auffällige Sequenzen). Sie umfasste 7000 Teilnehmer und eine halbe Million genetische Marker. Jeder der ermittelten Erbschnitte hat an der Intelligenz nur einen winzigen Anteil. Drei davon liegen zwischen Genen, die übrigen gehören zu Genabschnitten, die nicht für ein Protein kodieren.

Alle diese Sequenzen könnten bei der Genregulation mitwirken. Allerdings erscheint es wegen der Funktion der drei ermittelten Gene durchaus möglich, dass die gefundenen Erbschnitte weniger unmittelbar das kognitive Vermögen beeinflussen als die Hirnentwicklung und Arbeitsweise von Zellen geringfügig modifizieren.

SEQUENZ	LAGE IM GENOM	FUNKTION DER UMGEBENDEN DNA	BEITRAG ZUR INTELLIGENZ
1	zwischen Genen	unbekannt	0,2 Prozent
2	zwischen Genen	unbekannt	0,2 Prozent
3	zwischen Genen	unbekannt	0,1 Prozent
4	im Gen <i>DNAJC13</i>	kodiert für ein so genanntes Chaperon (Helferprotein), das viele Zellfunktionen unterstützt	0,4 Prozent
5	im Gen <i>TBC1D7</i>	kodiert für ein Protein, das ein Enzym aktiviert, welches bei der Proteinherstellung, Zellinstandhaltung und Verarbeitung von Sinnesinformationen mitwirkt	0,1 Prozent
6	im Gen <i>FADS3</i>	kodiert für ein Protein, das bei der Synthese von Fettsäuren mitwirkt und ihre Konzentration in Zellmembranen reguliert	0,2 Prozent

das, was ihre Kinder tun. Das messen unsere Modelle allerdings kaum.«

Ein ähnlicher Zusammenhang könnte auch einen höchst eigenartigen Befund bei Zwillingen erklären: Der genetische Einfluss auf die Intelligenz verstärkt sich mit zunehmendem Alter. Anscheinend wirkt sich mit der Zeit aus, wie Menschen ihr intellektuelles Umfeld gestalten. Wer neue Erlebnisse sucht, Bücher liest und Gespräche liebt, verändert dadurch letztlich auch sein Gehirn – ein Effekt, der wächst, wenn man sein Leben zunehmend selbst in die Hand nimmt. »Intelligenz ist sozusagen eine emergente Eigenschaft des Gehirns, etwas, was daraus hervortritt«, sagt Shaw. »Fast mit Sicherheit ist es nicht so, dass jemand – sagen wir – 15 Gene mitbekommt, die dann vorgeben, wie sich das Gehirn ausbildet und wie intelligent jemand schließlich sein wird.«

Zwar gelang es den Wissenschaftlern bisher kaum, dem hochkomplexen Phänomen Intelligenz auf die Schliche zu kommen. Dennoch sehen viele von ihnen in solchen Forschungen zumindest einigen praktischen Wert, und das treibt sie zum Weitermachen an.

So erhofft sich Richard Haier von den Hirnstudien Anregungen für einen möglichst optimalen Schulunterricht. Auf eine bestmögliche Ausbildung komme es jetzt, zu Beginn

des 21. Jahrhunderts, unbedingt an. Plomin wiederum hält die Kenntnis des genetischen Profils von Kindern für hilfreich, um sie gut fördern zu können. Und er malt sich aus: Sollten in den Erbgutanalysen irgendwann doch noch Intelligenzgene auftauchen, würde es sich anbieten, Kinder auf ihre individuellen Varianten hin zu untersuchen. Er stellt sich einen Index vor, der das genetische Risiko für bestimmte Lernschwächen anzeigt. So müsste man nicht mehr abwarten, welche Kinder zum Beispiel schwer lesen lernen, sondern man könnte den gefährdeten Schülern schon vorher spezielle Hilfen anbieten.

Manchen seiner Kollegen genügt es zu wissen, dass sie es mit einem besonders faszinierenden Phänomen der menschlichen Natur zu tun haben. »In vieler Hinsicht machen wir im Zusammenhang mit Intelligenz und Intelligenzmessungen so gute Voraussagen wie sonst in der gesamten Psychologie nicht«, bemerkt Eric Turkheimer. »Solche Testwerte, etwa von einem Schuleingangstest, sind zwar nicht vollkommen, aber über das spätere Abschneiden in praktisch allen Bereichen sagen sie wesentlich mehr aus als ein Persönlichkeitsprofil. Intelligenz ist eine psychologische Größe, die Vorhersagen erlaubt. Man darf sie nur nicht auf Zahlen reduzieren wollen.«



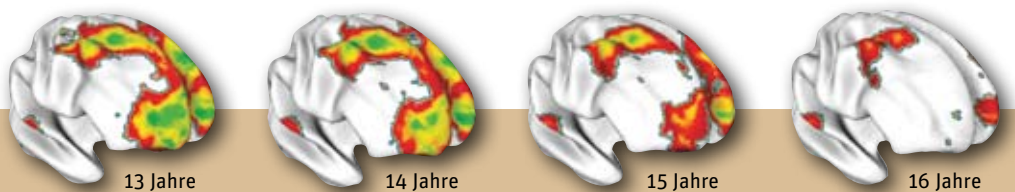
Carl Zimmer ist Wissenschaftsjournalist in den Vereinigten Staaten und Autor von über einem halben Dutzend Büchern zu biologischen und medizinischen Themen.

Butcher, L. M. et al.: Genomewide Quantitative Trait Locus Association Scan of General Cognitive Ability Using Pooled DNA and 500K Single Nucleotide Polymorphism Microarrays. In: *Genes, Brain and Behavior* 7(4), S. 435–446, 22. Januar 2008.

Jung, R. E., Haier, R. J.: The Parieto-Frontal Integration Theory (P-FIT) of Intelligence: Converging Neuroimaging Evidence. In: *Behavioral and Brain Science* 30, S. 135–154, April 2007.

Shaw, P. et al.: Intellectual Ability and Cortical Development in Children and Adolescents. In: *Nature* 440, S. 676–679, 30. März 2006.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/995467.



Großzügige Menschen sind erfolgreicher

Mathematische Modelle enthüllen, wie sich bestimmte Verhaltensmuster – etwa Vertrauen, Nachsicht oder unsere soziale Intelligenz – evolutionär entwickelt haben könnten.

Nachsichtig zu sein heißt, eine Kooperation trotz Problemen weiterzuführen

Von Martin A. Nowak

Als ich noch an der University of Oxford tätig war, gab mir mein Kollege, der Biologe Robert May, einen guten Rat: »Man verliert nie, weil man zu großzügig war.« Das beeindruckte mich, weil ich wusste, dass Robert ein Siegertyp ist. Ein Spiel zu gewinnen ist für ihn das Wichtigste. Er hat intensiver über Gewinnen und Verlieren nachgedacht als irgendjemand sonst, den ich kenne. Seine Frau sagte einmal: »Wenn er mit dem Hund spielt, dann spielt er, um zu gewinnen.« Zu der Zeit war Robert nicht nur mein persönlicher Ratgeber, sondern auch Berater der britischen Regierung. Einige Jahre später wurde er Präsident der Royal Society, erhielt den Titel des Lord May of Oxford und andere Auszeichnungen.

Ein mathematisches Modell, das menschliches Verhalten analysiert, bestätigt Mays These von der Großzügigkeit. In Spielen, die auf menschlicher Interaktion beruhen, ist sie prägendes Merkmal von Gewinnstrategien. Diese Strategien decken sich mit vielen Entscheidungen, die Leute im täglichen Leben treffen – und werfen ein Licht darauf, wie unsere außergewöhnlich kooperative Lebensweise evolutionär entstanden sein könnte.

In der Evolution unterscheiden Biologen zwei Wirkkräfte: Mutation und Selektion. Ich möchte hier noch eine dritte Qualität hinzufügen: Kooperation mit anderen. Sie entsteht, wenn eine Person einen Preis bezahlt, damit ein anderer einen Vorteil erringt. Preis und Vorteil werden am reproduktiven Erfolg gemessen. Reproduktion kann dabei genetisch oder kulturell verstanden werden; im letzteren Fall geht es dann um die Verbreitung von Wissen und Ideen.

Nur unter bestimmten Bedingungen kann natürliche Selektion Individuen einen Vorteil

bringen, die ihre eigene »Fitness« reduzieren, um diejenige ihrer Rivalen zu erhöhen. Eine davon ist die unmittelbare Gegenseitigkeit, fachlich »direkte Reziprozität« genannt: »Meine Strategie hängt davon ab, wie du mit mir umgegangen bist.« Eine andere ist die indirekte Reziprozität: »Meine Strategie hängt davon ab, wie du mit mir und anderen umgegangen bist.«

In beiden Fällen konnten Mathematiker mit spieltheoretischen Modellen nachweisen, dass Gewinnstrategien von drei Faktoren geprägt sind: Großzügigkeit, hoffnungsvoller Erwartung und Nachsicht:

- Großzügig zu sein bedeutet, nicht damit zu rechnen, mehr zu erhalten als der andere.
- Hoffnungsvolle Erwartung ist dadurch gekennzeichnet, dass man auf den anderen kooperativ zugeht – auch bei fehlender Information.
- Nachsichtig zu sein heißt, eine Kooperation trotz Problemen weiterzuführen.

Diese drei Teilstrategien sind natürlich miteinander verwandt: Wer selbst großzügig ist, dem fällt es auch leichter, anderen zu vergeben, optimistisch zu sein oder es zu riskieren, mit neuen Partnern zu kooperieren. Beim jährlichen Tennisturnier von Wimbledon muss man, um in die nächste Runde zu gelangen, einfach seinen jeweiligen Gegenspieler besiegen. Aber der Alltag ist kein Tennisturnier. Vielmehr bewegen sich unsere allermeisten Interaktionen innerhalb einer Spielerpopulation; die Rendite akkumuliert sich also über Begegnungen mit vielen unterschiedlichen Spielern. Da nun der Gesamterfolg proportional zu diesem Gesamtgewinn ist, wird bei jeder Begegnung die andere Person eher zum Partner als zum Gegner. Wenn ich bereit bin, anderen einen etwas größeren Anteil vom Kuchen zu überlassen, dann lassen sich diese eher darauf ein, ihren Kuchen mit

nature

Das englische Original dieses Artikels erschien in Nature 456, S. 579–580.

mir zu teilen. Fazit: Großzügigkeit gebiert auch erfolgreiche Verhandlungen.

Zahlreiche Experimente haben bestätigt, dass Großzügigkeit ein erfolgreiches Handlungsrezept ist. Wie testet man das? Ein Versuch involviert typischerweise Studenten, die vor Bildschirmen sitzen. Der Computer wählt dann nach Zufallsprinzip Spielerpaare aus: Jedes Paar besteht aus einem Geber und einem Empfänger. Der Geber wird nun gefragt, ob er dem Empfänger etwas Geld geben will. Er wird vorab darüber informiert, wie sich dieser Empfänger in vorangegangenen Spielrunden gegenüber anderen Partnern verhalten hat. Das Experiment belegt, dass Leute ihre Entscheidungen danach fällen, wie sich der Empfänger zuvor verhalten hat; sie reagieren auf die Reputation des Gegenübers. Großzügige Leute erhalten mit höherer Wahrscheinlichkeit Spenden.

Ähnliche reputationsbasierte Systeme gibt es im Internethandel. Wenn man über das Internet eine Kamera kauft, spielt nicht nur der Preis eine Rolle, sondern auch der Ruf des Anbieters. Gilt ein Anbieter als verlässlich, sind Kunden auch bereit, ihm einen höheren Preis zu zahlen. Erfolgreiche Webseiten sind häufig diejenigen, die über eine gute Reputation verfügen.

Wenn das so klar ist: Warum sind Menschen dann nicht immer großzügig, hoffnungsvoll und vergebend? Dies rührt zum Teil daher, dass Kooperation nie ein stabiler Zustand ist. Mathematische Modelle zeigen, dass jede Zusammenarbeit ständig Komplikationen unterliegt. In einer fiktiven Gemeinschaft von Egoisten, in der niemand hilfsbereit ist, kann plötzlich ein Gruppe kooperierender Individuen auftreten, wenn – rein zufällig – einige Leute anfangen, eine direkt reziproke Strategie namens »tit for tat« (Wie du mir, so ich dir) zu verfolgen: Ich mache mit dir genau das, was du mit mir gemacht hast. Tit for tat kann nicht lange bestehen, weil Rachegeleüste selbstzerstörerisch sind. Es wird schnell durch »großzügiges tit for tat« ersetzt.

Dabei gilt: Ich kooperiere, wann immer du mit mir kooperiert hast – und manchmal sogar, wenn du nicht mit mir kooperiert hast. Ich bin also nicht nachtragend. Eine Zeit lang entsteht so ein kooperatives Klima. Doch in großzügigen Tit-for-tat-Gruppen lädt das gehäufte Auftreten »bedingungsloser« Kooperationspartner schließlich zum Missbrauch durch »Saboteure« ein. Auf diese Weise entstehen Zyklen von Kooperation und Nichtkooperation. Dies könnte zumindest teilweise für die fortwährende Vermischung von Kooperationspartnern



und Nichtkooperationspartnern in menschlichen Gesellschaften verantwortlich sein.

Mathematische Modelle erlauben quantitative Untersuchungen der fundamentalen Grundlagen menschlichen Verhaltens. Die hier beschriebenen Spielmuster treten in jeder Gesellschaft auf. Unsere Altvordern haben die meiste Zeit in kleinen Gruppen verbracht, in denen sich Interaktionen wiederholten. Das Gleiche gilt für die meisten Beziehungen im modernen Leben: Begegnungen wiederholen sich immer wieder – und die Reputation steht ebenso oft auf dem Spiel.

Die Evolution sozialen Verhaltens kann nicht verstanden werden, wenn man die Rahmenbedingungen von direkter und indirekter Reziprozität außer Acht lässt. Ich glaube sogar, dass indirekt reziproke Interaktionen den entscheidenden selektiven Druck für die Herausbildung von sozialer Intelligenz sowie von Sprache lieferten.

Bei solchen Interaktionsspielen ist soziale Intelligenz erforderlich, um die Handlungen der anderen zu registrieren und laufend zu interpretieren. Permanent verfolgen wir sehr genau, wie andere mit uns und den übrigen Mitgliedern der Gruppe umgehen. Wenn wir uns dann zu einer Handlung entschließen, berücksichtigen wir – oft unbewusst – die möglichen Auswirkungen auf die eigene Reputation. Außerdem ist das, was wir selbst beobachten, oft nicht ausreichend; wir haben nur selten den völligen Überblick. Also sind wir häufig daran interessiert, aus den Erfahrungen von anderen zu lernen. Solche »Gerüchte« bezüglich indirekter Reziprozität lassen sich nur mittels Sprache verbreiten. Mein Harvard-Kollege, der Evolutionsbiologe David Haig, sagte einmal: »Für direkte Reziprozität benötigt man ein Gesicht, für indirekte Reziprozität braucht man einen Namen.« ◀



Martin A. Nowak ist Mathematik- und Biologieprofessor an der Harvard University und dort Leiter der Forschungsgruppe für evolutionäre Dynamik. Nowak ist Autor des Buchs »Evolutionary Dynamics: Exploring the Equations of Life« (Harvard University Press, 2006).

© Nature Publishing Group
www.nature.com/nature

Ramge, T.: Nach der Ego-Gesellschaft: Wer gibt, gewinnt – die neue Kultur der Großzügigkeit. Pendo, München 2006.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/995468.

Ein Sonnenschirm für den Blauen Planeten

Für den Fall, dass es mittelfristig nicht gelingt, die globale Erwärmung in den Griff zu bekommen, erörtern Klimaexperten einen Plan B: Eine Abschirmung der Sonneneinstrahlung würde Zeit verschaffen.

Von Robert Kunzig

In Kürze

- ▶ Als **Geoengineering** bezeichnete Konzepte, die globale Erwärmung unabhängig von einer Reduktion der Emissionen an Treibhausgasen zu bremsen, stoßen in der Wissenschaft auf mehr und mehr Interesse.
- ▶ Geoengineering versteht sich nicht als Alternative zur **Abkehr von den fossilen Brennstoffen**, sondern soll lediglich Zeit verschaffen, die Energiewende herbeizuführen.
- ▶ Die derzeit vielversprechendste Methode wäre, Schwefeldioxid in die Stratosphäre zu bringen, um **Sonnenlicht über Aerosole ins All zurückzustreuen**. Alle Vorschläge aber haben Nachteile und Nebenwirkungen, die noch nicht vorhergesagt werden können.

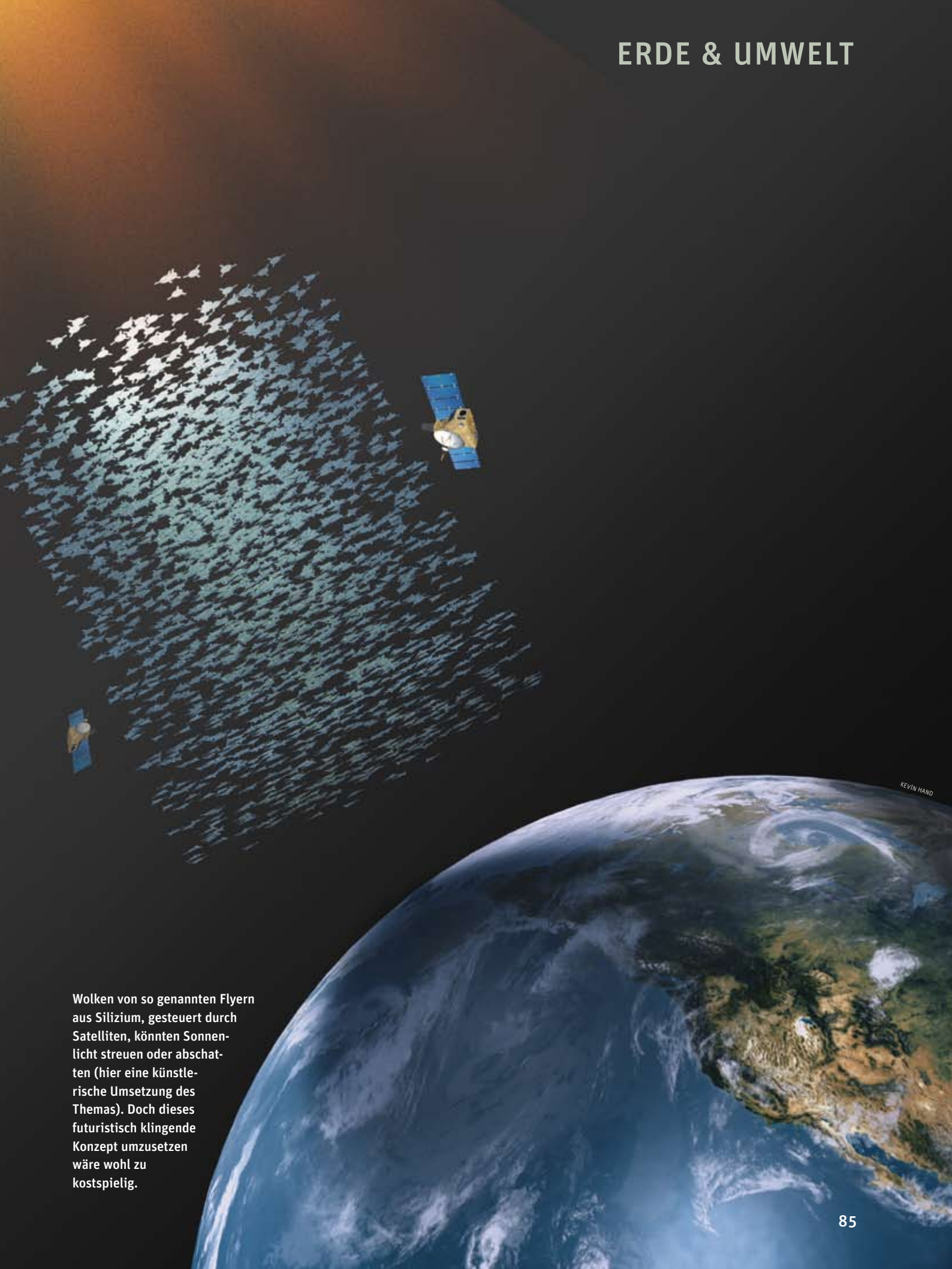
Wer darauf baute, der Menschheit bliebe noch bis 2050 Zeit, die Emissionen der Treibhausgase zu verringern und so der globalen Erwärmung entgegensteuern zu können, wurde Ende April eines Besseren belehrt: Zwei in »Nature« veröffentlichte Metastudien wiesen nach, dass die Reduktionsziele innerhalb der kommenden 20 Jahre erreicht sein müssen, soll der Temperaturanstieg nicht zwei Grad im globalen Mittel überschreiten. Damit erhalten jene Klimaforscher Rückenwind, die ernsthaft über Geoengineering nachdenken: Maßnahmen zur Verringerung der Sonneneinstrahlung.

Bereits 1965 – der als Mahner vor der Klimakatastrophe bekannt gewordene amerikanische Politiker und Friedensnobelpreisträger Al Gore wurde damals gerade ins College aufgenommen – warnte ein Ausschuss renommierter Umweltwissenschaftler den US-Präsidenten Lyndon B. Johnson, der Ausstoß von Kohlendioxid (CO₂) durch die Verbrennung fossiler Kraftstoffe könne »deutliche Änderungen des Klimas« verursachen, die »verheerend wären«. Statt auf eine Reduzierung der Emissionen zu drängen, schlug das Gremium vor, über 13 Millionen Quadratkilometer Ozeanfläche »sehr kleine Partikel zu verteilen«, die ein Prozent des einfallenden Sonnenlichts ins All reflek-

tieren sollten. »Eine verrückte Idee, die nicht einmal funktioniert hätte«, amüsiert sich der Physiker David W. Keith von der University of Calgary in Alberta.

In den folgenden Jahren wurden derlei Vorschläge überwiegend als törichte bis unmoralische Versuche gewertet, eine Auseinandersetzung mit dem Grundproblem der Treibhausgasemissionen zu vermeiden. Doch inzwischen wird das Geoengineering immerhin ernsthaft diskutiert. Denn die CO₂-Emissionen steigen trotz jahrelanger Verhandlungen und internationaler Verträge schneller als in den Worst-Case-Szenarien, die 2007 vom Intergovernmental Panel on Climate Change herausgegeben wurden. Die Abhängigkeit der Menschheit von der Verbrennung fossiler Brennstoffe hat eher zugenommen, und Phänomene wie das rasante Abschmelzen des arktischen Eises deuten einige Forscher als Hinweis, dass sich unser Klima bereits einer kritischen Schwelle nähert.

Vor- und Nachteile des Geoengineering diskutierten Forscher im November 2007 auf einem Workshop in Cambridge (Massachusetts), zu dem Keith und der Geophysiker Daniel P. Schrag von der Harvard University eingeladen hatten. Am Schluss waren sich alle darin einig, dass mehr Forschung nötig sei – einige, weil sie die Konzepte wirklich begeisterten oder zumindest als kleineres von zwei Übeln betrachteten, und andere, weil sie Gegenargumente finden wollen. Al-



KEVIN HAND

Wolken von so genannten Flyern aus Silizium, gesteuert durch Satelliten, könnten Sonnenlicht streuen oder abschatten (hier eine künstliche Umsetzung des Themas). Doch dieses futuristisch klingende Konzept umzusetzen wäre wohl zu kostspielig.

SONNENSCHUTZ NO. 1: SCHWEFELDIOXID IN DER STRATOSPHERE

Vulkanausbrüche haben in der Vergangenheit die Erde erheblich gekühlt, unter anderem weil dabei Schwefeldioxid (SO₂) in die obere Atmosphäre gelangte. Einige Forscher wollen deshalb SO₂ gezielt in die Stratosphäre bringen.



Transport per Ballon

Mit Ballonen könnte SO₂ ohne großen Energieaufwand in eine Höhe von zehn Kilometern gebracht werden.

Licht wird an Sulfattröpfchen reflektiert.



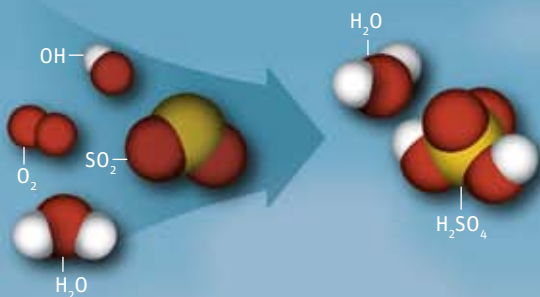
»SO₂-Schleuder« Flugzeug

Ausnahmsweise erwünscht: Ein mit stark schwefelhaltigem Treibstoff betanktes Flugzeug würde mit seinem Abgas Schwefeldioxid ausstoßen.

↑
STRATOSPHERE

Wie es funktioniert

In der Stratosphäre reagiert SO₂ mit anderen Molekülen – darunter Hydroxidionen (OH⁻), atomarer Sauerstoff (O₂) und Wasser – zu Schwefelsäure (H₂SO₄). Gemeinsam mit Wasser und Spuren anderer Stoffe bildet es Partikel von etwa einem Mikrometer Durchmesser, die einen Teil des einfallenden Sonnenlichts reflektieren.



Vulkan-
ausbrüche



zivile Kanonade

SO₂-gefüllte Granaten ließen sich von Schiffen aus abfeuern, um auf die sich ändernden Bedingungen in der oberen Atmosphäre kurzfristig zu reagieren.

»Wenn der Eisschild von Grönland morgen zu kollabieren begänne, und Sie wären der Präsident der Vereinigten Staaten, was würden Sie tun?«

Daniel P. Schrag,
Harvard University

len gemeinsam ist freilich der Wunsch, das Problem der globalen Erwärmung zu beheben: Treibhausgase wie Kohlendioxid verhindern, dass eingestrahktes Sonnenlicht von der Erdoberfläche wieder ins All reflektiert wird, und lassen so die mittlere Temperatur auf der Erde ansteigen.

Die aktuelle Klimapolitik zielt darauf ab, die Gasemissionen zu reduzieren, um so die Erwärmung auf ein tolerierbares Maß zu beschränken. Schön wäre es natürlich, CO₂ sogar aus der Atmosphäre zu entfernen, etwa durch Düngen der Ozeane mit Eisen (siehe Kasten S. 92). Doch bis eine Wirkung einträte, würden Jahrzehnte vergehen. Im Gegensatz dazu könnte eine Art Sonnenschutz die Erwärmung sofort stoppen, ohne das zu Grunde liegende Problem zu bekämpfen. Insofern sind entsprechende Vorschläge als Notfallmaßnahme zu sehen. »Wenn der Eisschild von Grönland morgen zu kollabieren begänne, und Sie wären der Präsident der Vereinigten Staaten, was würden Sie tun?«, fragt Schrag. »Sie hätten keine Wahl«.

Doch erforscht wurden bislang weder die Machbarkeit der diversen Ideen noch ihre potenziell erheblichen und unvorhersehbaren Nebenwirkungen. »Es wird viel mehr geredet als gearbeitet«, klagt Ken Caldeira, Klimaexperte von der Carnegie Institution for Science in Stanford (Kalifornien). »Der Großteil der Forschung läuft auf Hobbyniveau.« Einige Ideen haben nichts Besseres verdient – verstreute man wie 1965 vorgeschlagen reflektierende Partikel über dem Ozean, würden sie zum einen sein Ökosystem belasten, zum anderen dürften die Teilchen schnell an die Strände gespült werden und damit als Sonnenschutz unwirksam, als Umweltgift an den Küsten möglicherweise aber wirksam. Andere Ansätze lassen sich allerdings nicht so leicht verwerfen.

Freilich behauptet kaum jemand, dass eine Maßnahme zur Reduktion des in der Atmosphäre aufgenommenen Sonnenlichts ein Ersatz für die Verringerung der CO₂-Emissionen sei. Geoengineering könne aber Zeit für eine notwendige Revolution verschaffen: den weltweiten Übergang zu kohlenstoffneutralen Energiequellen. »Mit den auf dem Tisch liegenden Ansätzen zur Emissionsverringderung werden wir den Planeten nicht retten«, sagt Tom M.L. Wigley vom National Center for Atmospheric Research (NCAR). »In keinem Ansatz ist die Größenordnung der technischen Herausforderung ernsthaft berücksichtigt worden«.

Das von Paul J. Crutzen, der 1995 den Nobelpreis für Chemie auf Grund seiner Forschungen zur Stratosphärenchemie erhielt, wie auch von Wigley propagierte Verfahren

wäre wohl das billigste und erfolgversprechendste; es wurde schon 1974 von dem russischen Physiker Mikhail Budyko vorgeschlagen, der damals am Geophysikalischen Hauptobservatorium in Leningrad arbeitete. Jahr für Jahr sollen Millionen Tonnen Schwefeldioxid (SO₂) in die Stratosphäre eingebracht werden. Dort würde es mit Sauerstoff und Wasser zu Schwefelsäure (H₂SO₄), die gemeinsam mit Wasser an Staub, Salzen und anderen Partikeln kondensiert. Wolken der entstehenden Schwefelsäuretröpfchen würden Licht streuen, was die Sonnenuntergänge röter und den Himmel milchiger aussehen ließe. Vor allem aber: Die Erdoberfläche würde sich im Mittel abkühlen.

Dafür gibt es sogar Erfahrungswerte. Ein halbes Grad war es, als 1991 der Ausbruch des Pinatubo auf den Philippinen 20 Millionen Tonnen SO₂ in die Stratosphäre schickte; die Abkühlung hielt ein Jahr lang an. »Wir wissen also, dass es prinzipiell funktioniert«, sagt Caldeira, der bereits ein Jahrzehnt, bevor Crutzen über die Idee schrieb, begann, diese Vorgänge zu modellieren.

Den Teufel mit dem Beelzebub austreiben

Als Crutzen das Thema aufgriff, war die Welt bereits alarmiert. Seit Budykos Artikel war es ein halbes Grad wärmer geworden, und eine Menge Eis war geschmolzen. In den 1990er Jahren hatten Edward Teller und seine Kollegen am Lawrence Livermore National Laboratory die Verwendung von Metallteilchen empfohlen, die länger in der Höhe schweben und mehr Sonnenlicht reflektieren würden. Aber Crutzen blieb bei seinem Vorschlag.

Denn ohnehin, so sein Argument, würden durch das Verfeuern fossiler Brennstoffe pro Jahr 55 Millionen Tonnen SO₂ in die untere Atmosphäre eingebracht (zusätzlich zu acht Milliarden Tonnen CO₂). Der Weltgesundheitsorganisation zufolge sterben als Konsequenz dieser Luftverschmutzung aber jährlich 500 000 Menschen. Durch entsprechende Gesetze und Techniken wird die SO₂-Emission deshalb bereits gedrosselt, doch möglicherweise zu einem noch unbekanntem Preis: Niemand vermag zu sagen, wie stark das Schwefeldioxid die globale Temperatur im Mittel senkt. Crutzen will daher SO₂ in die Stratosphäre bringen, wo es die Sonne abschirmt, der Gesundheit aber weit weniger schadet.

Budyko plante, Flugzeuge in die entsprechenden Höhen zu schicken, um dort schwefelreichen Treibstoff zu verbrennen; Crutzen schlug vor, das SO₂ mit Ballonen auszubringen. Die Schätzungen darüber, wie viel von dem Gas benötigt wird, um beispielsweise ei-

DIE NACHTEILE

- unvorhersehbare Veränderungen regionaler Wind- und Niederschlagsmuster
- geringere Verdunstung und damit Rückgang der Niederschlagsmenge
- Zunahme des sauren Regens
- beschleunigte Zerstörung der Ozonschicht
- so billig, dass Staaten im Alleingang statt im Rahmen internationaler Vereinbarungen handeln könnten.
- Bei Unterbrechung des Schwefeldioxid-Transports in die Stratosphäre würde sich die Erde rasch erwärmen, sofern die Kohlendioxidemissionen in der Zwischenzeit nicht deutlich reduziert wurden.

SAMUEL UND PEDRO VELASCO, SW/INFRAGRAPHS

SONNENSCHUTZ NO. 2: NEBEL IN DER TROPOSPHÄRE

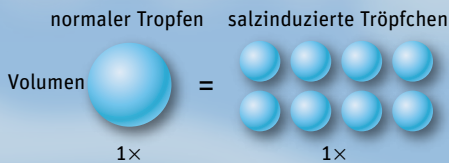
Hoch in die Luft versprühtes Meerwasser verdunstet, während es aufsteigt. In etwa 300 Meter Höhe bleiben vor allem schwebende Salzkristalle übrig. Sie könnten Wolken, die in dieser Höhe entstehen, aufhellen, die dann mehr Sonnenlicht ins All reflektieren.

Die Technik

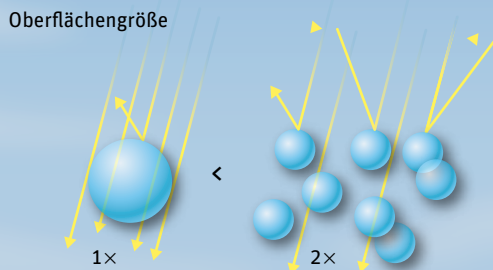
Auf den Ozeanen kreuzt eine Flotte unbemannter, von Satelliten gesteuerter Flettner-Schiffe. Das von dem deutschen Ingenieur Anton Flettner ersonnene Antriebsprinzip basiert auf dem Magnus-Effekt: Elektromotoren drehen vertikale Zylinder, dadurch entsteht ein Vortrieb senkrecht zum anströmenden Wind. Hier nun wird zudem Meerwasser durch winzige Düsen gepresst und der entstehende Nebel durch die Zylinder nach oben versprüht.

Wie es funktioniert

Steigt der Nebel in die kühle, feuchte Luft 300 Meter über dem Meer auf, erhöht er dort die Dichte von Partikeln, an denen Wasserdampf zu Wolken bildenden Tröpfchen kondensieren kann (fachlich: Nukleation). Je größer diese Dichte, desto kleiner die Tropfen in der Wolke. Im Idealbild: Das Volumen einer Kugel lässt sich in acht kleinere Kugeln mit halbem Durchmesser zerlegen, diese ergeben aber eine doppelt so große Oberfläche.



Je größer die Gesamtoberfläche aller Tropfen, desto mehr einfallendes Sonnenlicht kann die Wolke ins All reflektieren.



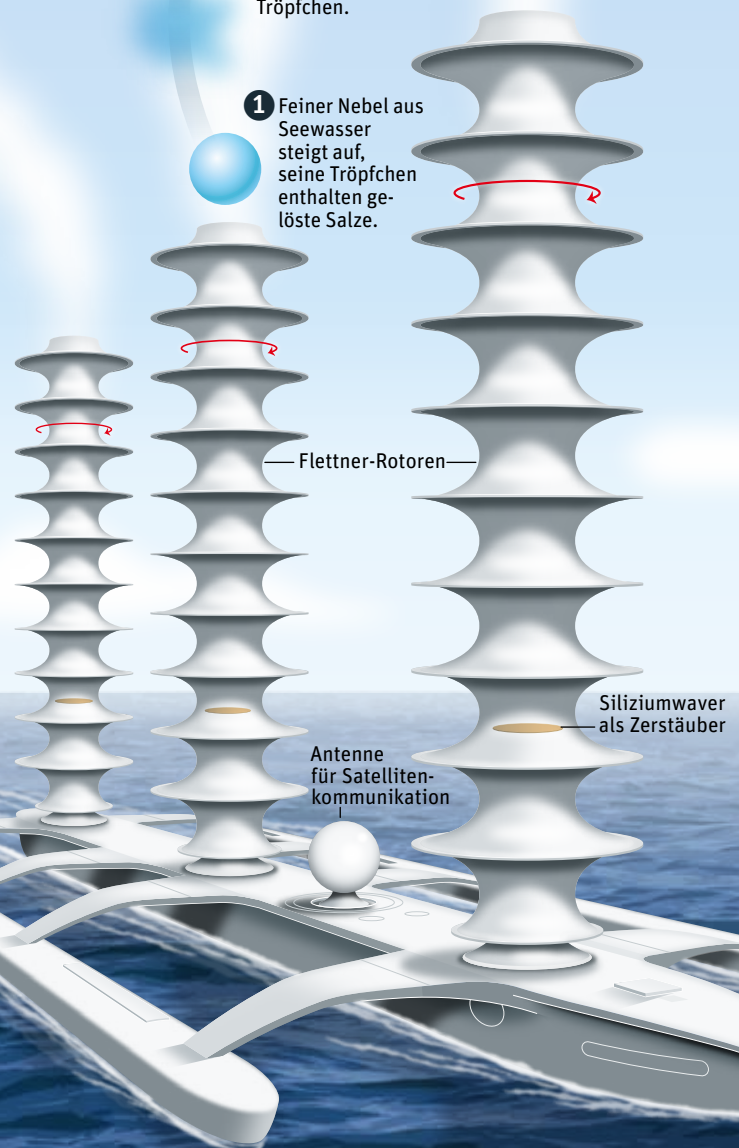
5 Bei der Wolkenbildung bleiben die Tröpfchen klein.

4 Wasserdampf kondensiert an bereits existierenden Staub- und frisch erzeugten Salzpartikeln.

3 Salzkristalle fallen aus.

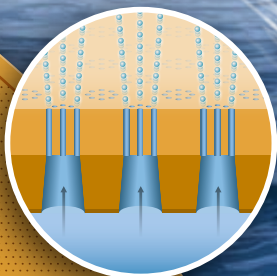
2 Wasser verdunstet aus den Tröpfchen.

1 Feiner Nebel aus Seewasser steigt auf, seine Tröpfchen enthalten gelöste Salze.



0,8 Mikrometer

Mit Kanälen von jeweils 0,8 Mikrometer Durchmesser versehene Siliziumwafer erzeugen in den rotierenden Zylindern den feinen Nebel.



Dieser Schutzschild dürfte die Tropen stärker kühlen als die Pole – genau das Gegenteil davon, was heute gebraucht wird

ner Verdopplung der Kohlendioxidkonzentration gegenüber dem vorindustriellen Niveau entgegenzuwirken, gehen auseinander. Wigley veranschlagte (generell ausgedrückt als Masse des Schwefels allein) fünf Millionen Tonnen pro Jahr; Crutzen und Philip J. Rasch vom NCAR haben sogar berechnet, dass 1,5 Millionen Tonnen genügen, vorausgesetzt, die Teilchen wären im Mittel kleiner als die für Vulkanausbrüche typischen, also mit Durchmessern von weniger als 0,2 Mikrometern. All diese Schätzungen liegen weit unter den Mengen, die wir Menschen bereits an SO_2 in die untere Atmosphäre eingebracht haben. Crutzen schätzt die jährlichen Kosten auf 25 bis 50 Milliarden US-Dollar.

Klimamodellierer David S. Battisti von der University of Washington sieht ein Problem in den regionalen Temperaturmustern. Das CO_2 wärmt den Planeten Tag und Nacht, sommers wie winters. Weil das Eis an den Polen schmilzt und so deren weiße und kalte Oberfläche durch eine dunklere und wärmere ersetzt wird, verstärkt sich dort der Treibhauseffekt. Ein stratosphärischer SO_2 -Sonenschutz hingegen würde eingestrahlte Energie nur in Regionen abschirmen, wo die Sonne scheint; während des Polarwinters hätte er keinen Effekt. Mit anderen Worten: Dieser Schutzschild dürfte die Tropen stärker kühlen als die Pole – genau das Gegenteil davon, was gebraucht wird, um das Klima auf den vorindustriellen Zustand zurückzuführen.

Überraschenderweise deuten die wenigen bisher durchgeführten Simulationen aber darauf hin, dass die Wirkung eines Sonnenschutzes mit Schwefelsäure nicht so simpel ist. Caldeira zufolge würden nämlich die Pole während des Sommers ausreichend gekühlt, um das Meereis zu erhalten. Das löst ebenfalls eine starke Rückkopplung aus, diesmal aber in der erwünschten Richtung. Doch genauso wie CO_2 würde SO_2 nicht allein die Temperatur unseres Planeten beeinflussen, sondern auch Wind- und Niederschlagssysteme – diese Details lassen sich noch nicht vorhersehen. Erreicht weniger Sonnenlicht die Erdoberfläche, dann verdunstet auch weniger Wasser. Vor allem in den Tropen könnten Regen und Süßwasser im Vergleich zu heute knapper werden.

Der Ausbruch des Pinatubo scheint genau das bewirkt zu haben: Laut einer Analyse von Kevin E. Trenberth und Aiguo Dai vom NCAR sanken die Niederschlagsmengen über Land und das Wasservolumen der Flüsse im Jahr nach dem Ausbruch dramatisch. Außerdem bleiben die Böden bei geringerer Verdunstung feuchter. Allerdings ergaben Caldeiras Simulationen, dass die Verringerung des Niederschlags bei einer reinen CO_2 -Emission größer

ausfiel als in der Kombination mit SO_2 . Wenn der Ausstoß des Treibhausgases nicht deutlich reduziert werden kann, dann sollte seines Erachtens nach Schwefeldioxid nicht fehlen.

Ein Nachteil ließe sich aber kaum vermeiden: Millionen Tonnen Schwefelsäure in der Stratosphäre würden sauren Regen ergeben. Global gesehen wäre der Effekt vermutlich klein – denn wie erwähnt bringen wir schon jetzt große Mengen SO_2 in die untere Atmosphäre ein. Doch wie Alan Robock von der Rutgers University erklärte, könnte ein Teil des sauren Regens in Regionen fallen, die bisher davon verschont geblieben sind.

Problemfall Ozonloch

Mehr Grund zur Sorge bereitet der Abbau stratosphärischen Ozons. Chloratome, Überreste jener Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW), die lange als Kühlmittel und Treibgase verwendet wurden, ätzen jeden Frühling ein Loch in die antarktische Ozonschicht, so dass ultraviolettes Sonnenlicht (UV) ungefiltert hindurchdringen kann. Die zerstörerischen chemischen Reaktionen laufen allerdings nur unterhalb einer bestimmten Temperaturschwelle ab und auch nur auf der Oberfläche stratosphärischer Partikel. Sowie die FCKW-Produktion gemäß dem Montreal-Protokoll von 1987 endgültig endet, sollte das Ozonloch allmählich kleiner werden und bis vermutlich 2070 verschwunden sein. Doch mehr Schwefelsäure in der Stratosphäre könnte dem entgegenwirken.

Dieser Effekt war zwar auch nach dem Ausbruch des Vulkans Pinatubo zu messen, doch nur in geringem Ausmaß. Simone Tilmes vom NCAR warnt aber davor, dies überzubewerten, denn die Winter nach der Eruption waren mild. In einem kälteren Winter wäre der Ozonverlust an den Polen gravierender ausgefallen, sagt Tilmes. Und was noch schlimmer ist: Die globale Erwärmung geht mit einer Abkühlung der Stratosphäre einher, weil die Wärme näher an der Oberfläche gefangen wird.

Begännen wir in den nächsten paar Jahren, SO_2 in die Stratosphäre einzubringen, würde sich die Erholung des antarktischen Ozonlochs Tilmes' Berechnungen zufolge um 30 bis 70 Jahre verzögern. In kalten Jahren entstünde sogar auch in den nördlichen hohen Breiten ein Ozonloch. Philip J. Rasch hält dem entgegen, dass es sich um ein Worst-Case-Szenario handelt. Einerseits würde die SO_2 -Menge angenommen, die eine Verdopplung der Kohlendioxidkonzentration in den kommenden Jahrzehnten kompensieren soll, andererseits aber auch die heutige Menge an Chlor in der Stratosphäre – obgleich diese stetig abnimmt.

Wir könnten zwar von den technischen Voraussetzungen her im nächsten Jahr mit die-

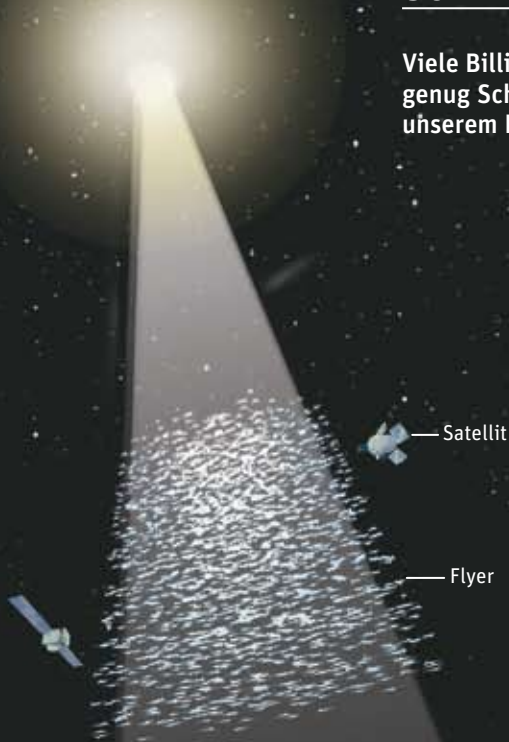
DIE NACHTEILE

- unvorhersehbare Veränderungen regionaler Temperaturen, möglicherweise ausgeprägte **Hitze- und Kältewellen**
- Wolken, die aus kleineren Tröpfchen bestehen, existieren länger – es fällt weniger Regen.
- Wie stark die Aufhellung wirkt, weiß man nicht genau.
- Die Wirksamkeit ist nicht erwiesen; es wurden noch **keine Feldstudien** durchgeführt.
- so billig, dass Staaten im Alleingang statt im Rahmen internationaler Vereinbarungen handeln könnten
- Bei Unterbrechung der Maßnahme würde sich die Erde rasch erwärmen, sofern die Kohlendioxidemissionen in der Zwischenzeit nicht deutlich reduziert wurden.

SAMUEL UND PEBRO VELASCO, SW INFOGRAPHICS

SONNENSCHUTZ NO. 3: REFLEKTIERENDE SATELLITEN

Viele Billionen scheibenartige, 60 Zentimeter breite »Flyer« könnten genug Schatten liefern, um die Erde zu kühlen – wenn man sie zwischen unserem Planeten und der Sonne installieren könnte.

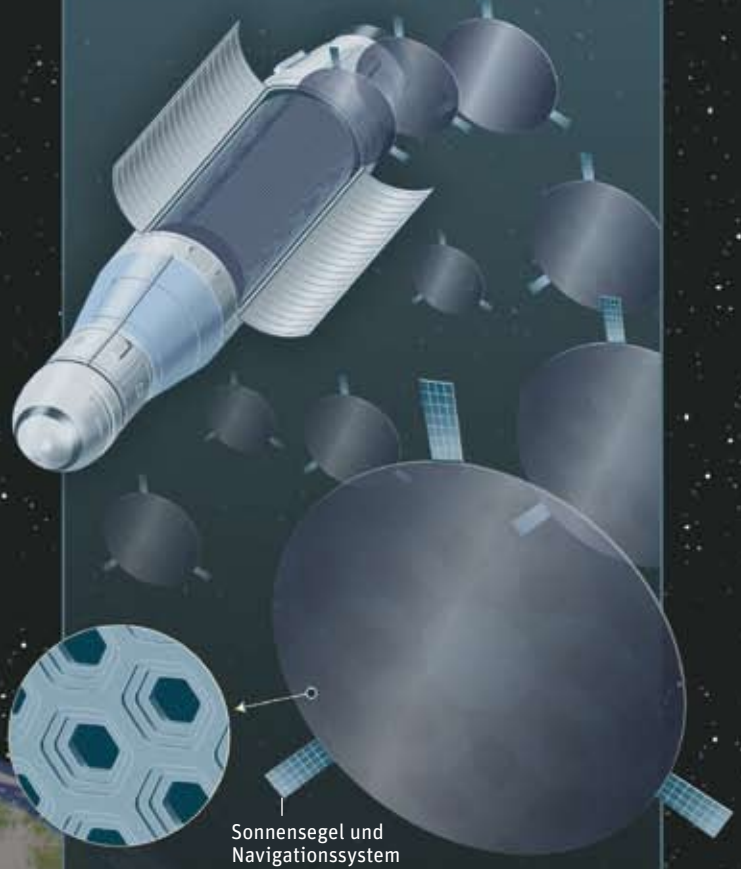


Die Technik

Jeweils eine Million Flyer, jeder mit einem Navigationssystem ausgestattet, würde in einem Zylinder verschlossen und von einer elektromagnetischen Kanone in eine Erdumlaufbahn geschossen, von dort mit Ionentriebwerken zum inneren Lagrangeunkt (L1) befördert. 1,6 Millionen Kilometer von der Erde heben sich dort die Anziehungskräfte der beiden Himmelskörper auf. Schließlich ergäbe sich eine 100 000 Kilometer lange und 13 000 Kilometer breite spiegelnde Wolke – sofern es gelänge, 30 Jahre lang einmal pro Minute einen solchen Zylinder ins All zu schießen.

Wie es funktioniert

Wären die Flyer einmal im All, würden sie sich voneinander trennen und mit Hilfe von Spiegeln, die als Sonnensegel fungieren, entsprechend den Steuerbefehlen von »Hirten«-Satelliten ausrichten.



Jeder Flyer hätte tausende winziger Löcher. Sonnenstrahlen, die dort hindurchfallen, würden mit anderen, die das hauchdünne Material durchdringen, destruktiv interferieren. Das verringert die solare Gesamtstrahlung, die auf die Erde fällt.



»Die Möglichkeit unerwarteter klimatischer Auswirkungen sollte nicht unterschätzt werden«

Paul J. Crutzen, Nobelpreisträger für Chemie

DIE NACHTEILE

- Geschätzte Kosten: fünf Billionen US-Dollar. Würde eine riesige Umverteilung von Geldern erfordern, die man ansonsten für alternative Energien verwenden könnte
- unvorhersehbare Veränderungen regionaler Wind- und Niederschlagsmuster
- **geringere Verdunstung**, ließe die Regenfälle weltweit zurückgehen
- Wirksamkeit nicht erwiesen, bislang kein Feldtest
- Bei Unterbrechung der Maßnahme würde sich die Erde rasch erwärmen, sofern die **Kohlendioxidemissionen** in der Zwischenzeit nicht deutlich reduziert wurden
- die Scheibenwolken könnten als Waffe benutzt den Lichteinfall auf der Erde **regional abschirmen** oder intensivieren

sem Geoengineering beginnen, doch wir hätten keine klare Vorstellung davon, was wir da eigentlich tun. Das wäre ein gefährliches Spiel. Auch die Verwendung von FCKWs in Kühlschränken und Spraydosen schien eine gute Idee, bis die Folgen erkannt wurden. Crutzen schrieb deshalb: »Die Möglichkeit unerwarteter klimatischer Auswirkungen sollte nicht unterschätzt werden. Das hat die plötzliche und nicht vorhergesagte Entwicklung des antarktischen Ozonlochs gezeigt.«

In der unteren Atmosphäre streut Schwefeldioxid nicht nur Sonnenlicht und löst Atemwegserkrankungen aus. Es führt auch zur Bildung von Wolken und hellt die bereits existierenden auf. Man spricht vom indirekten Aerosoleffekt. Klimaforscher glauben, dass er den Planeten mindestens so stark kühlt wie die direkte Streuung an den Aerosolpartikeln. Abgasfahnen aus den Schiffsschloten illustrieren das Phänomen eindrucksvoll: Sie bleiben tagelang bestehen und erstrecken sich über Hunderte von Kilometern. In Satellitenaufnahmen sieht man, wie diese Wolken Sonnenlicht ins All reflektieren. Der englische Physiker und Wolkenspezialist John Lathams möchte solche Wolken über dem Meer weißer machen. Sein Konzept beruht darauf, dass die Fähigkeit der Wolken zur Reflexion mit der Gesamtoberfläche ihrer Tropfen wächst. Und diese wiederum ist umso größer, je kleiner die Tröpfchen aus der Dampfphase kondensieren.

Heutzutage ist die Luft über Landflächen mit Partikeln angereichert, die im Zuge menschlicher Aktivität produziert wurden, und daher nimmt man an, dass die Wolken weißer, also reflexiver sind, als sie es sonst wären. Aber über den Ozeanen schweben vor allem natürliche Partikel in der Luft – Meerwassertröpfchen etwa, die von schäumenden Wellen freigesetzt werden. Bis sie eine Höhe von 350 Metern erreichen, ist ein Großteil des Wassers verdunstet, und die Salzpartikel bleiben übrig. In dieser Höhe aber beginnt Wasserdampf wieder an ihrer Oberfläche zu kondensieren. Aus den neuen Tröpfchen bilden sich Stratokumuluswolken, die mehr als ein Viertel der Weltmeere bedecken. Lathams Idee besteht darin, sie aufzuhellen, indem man so viel Salz in die Luft sprüht, dass sich die Zahl der Wassertröpfchen in den Wolken vervierfacht.

Stephen Salter, emeritierter Professor für Maschinenbau an der University of Edinburgh, hat eine dazu vielleicht geeignete Methode vorgeschlagen. »Es handelt sich im Grunde um eine Gießkanne«, sagt Latham – die Tülle wäre aber ein Stück Silizium, in das man Milliarden von Löchern ätzen würde, mit einem Durchmesser von weniger als einem Mikrometer, und diese Gießkanne würde man

auf einem unbemannten, von Satelliten geleiteten Schiff installieren. Genauer: Das Schiff wäre ein Flettner-Schiff, mit hohen, rotierenden Zylindern, die wie Schornsteine aussehen, aber quasi als Segel dienen – sie rufen einen Sog hervor, weil sich ihre eine Seite mit dem Wind bewegt, während sich die andere ihm entgegengedreht (Magnus-Effekt).

Eine punktgemusterte Erde

Laut Salters Konzept müssten die rotierenden Zylinder pro Sekunde 30 Liter Meerwasser in 0,8-Mikrometer-Tröpfchen versprühen. Salter und Latham schätzen, dass dann eine Flotte von 1500 Schiffen die globale Erwärmung ausgleichen könnte, die durch eine Verdoppelung der Kohlendioxidmenge in der Atmosphäre verursacht würde. Jedes Schiff kostet voraussichtlich zwei Millionen US-Dollar; insgesamt beliefen sich die Kosten auf drei Milliarden US-Dollar. Die Hälfte der Aufgabe könnte bereits mit Schiffen erledigt werden, die nur vier Prozent der weltweiten Ozeanfläche befahren, besagen Modellrechnungen vom Met Office Hadley Centre for Climate Prediction and Research im englischen Exeter.

Doch noch hat niemand simuliert, wie gleichmäßig der Planet auf diese Weise gekühlt würde. »Es könnte auf eine punktgemusterte Welt hinauslaufen, in der es ziemlich kalte und ziemlich heiße Orte gäbe«, befürchtet Battisti. Eine andere Sorge gilt einer möglichen den Sprühschiffen folgenden Dürre: Wolken aus vielen kleinen Tröpfchen produzieren weniger Regen. Und schließlich ist nicht bekannt, um wie viel heller die neuen Wolken genau wären. Die existierenden Klimamodelle überschätzen den Effekt. Ihnen zufolge sollten bereits jetzt Aerosole in der Atmosphäre die globale Erwärmung ausgleichen, was offenkundig nicht passiert. Philip J. Rasch hat darum mit Modellsimulationen für Lathams Idee begonnen.

Doch im Vergleich zu anderen Methoden des Geoengineering klingt es harmlos, mit windgetriebenen Schiffen Meerwasser in die Luft zu versprühen. Ginge irgendetwas schief, könnte man innerhalb von Tagen oder höchstens Wochen aufhören – während Schwefelsäure jahrelang in der Stratosphäre bliebe. »Es lohnt sich definitiv, sich das einmal anzuschauen«, meint Wigley. Doch nur eine Feldstudie könnte einige der Fragen beantworten – und bisher kam die einzige Unterstützung von Discovery Channel. Weil sie gute Illustrationen für eine Dokumentarfilmserie über Geoengineering brauchten, finanzierten die Fernsehproduzenten den Bau eines kleinen Flettner-Schiffs.

Discovery Channel bezahlte auch die Fertigung einer Keramikscheibe aus Siliziumnitrid

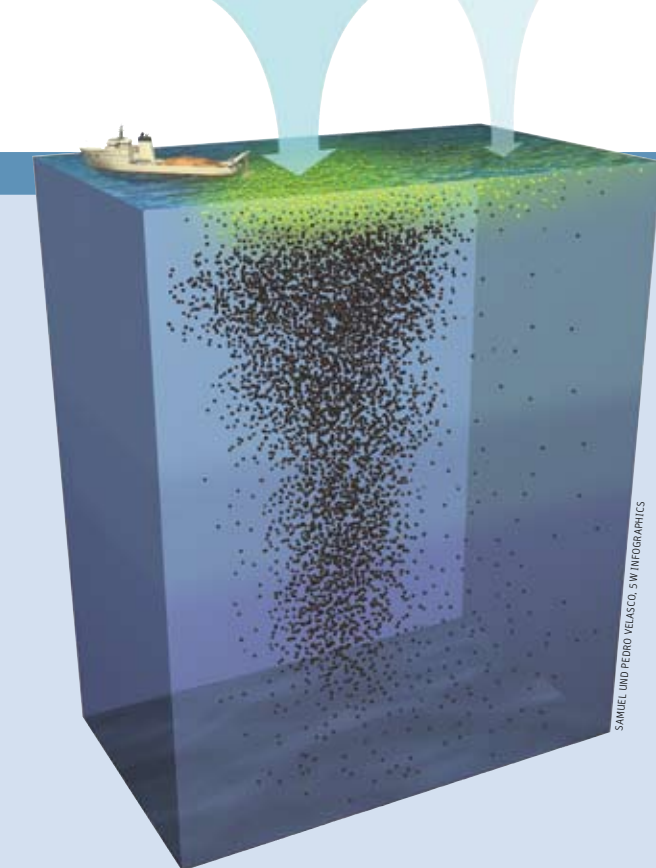
SAMUEL LINDO PEDRO VILASCO, SWI/INFRAPHOTOS

KOHLENDIOXID FILTERN UND SPEICHERN

Eine Methode, das Kohlendioxid aus der Atmosphäre zu holen, besteht darin, das Wachstum von Plankton zu verstärken – zum Beispiel indem man den Mikronährstoff Eisen über eisenarmen Meeresgebieten ausstreut. Die nachfolgende Planktonblüte würde auf jeden Fall Kohlendioxid aus der Luft ziehen. Doch selbst nach Dutzenden von Feldstudien zur Eisendüngung ist noch nicht klar, wie viel aufgenommener Kohlenstoff dann auch in die Tiefe absinkt und welche Nebenwirkungen ein so gravierender Eingriff in die marinen Ökosysteme hätte.

Eine zweite Methode wurde kürzlich von dem Studenten Kurt Zenz House und seinen Kollegen an der Harvard University vorgeschlagen. Spaltet man das im Meerwasser gelöste Kochsalz (NaCl) elektrolytisch auf, lässt dann das entstehende Natrium mit Wasser zu Natriumhydroxid reagieren und macht damit das Meerwasser alkalischer und bindet CO₂ in Form von Natriumkarbonat, ohne dass der Ozean versauert. Schlussendlich, so House, würde der aufgenommene Kohlenstoff auf dem Meeresboden landen. Die notwendigen Anlagen zu bauen wäre allerdings extrem teuer – House veranschlagt 100 Anlagen, um ein Zehntel des CO₂ zu absorbieren, das die Menschheit pro Jahr in die Atmosphäre einbringt.

Die vielleicht vielversprechendste Alternative sind Filter für CO₂. Pioniere dieser Idee sind Klaus S. Lackner von der Columbia University und David W. Keith von der University of Calgary in Alberta. Lackner und sein Partner Allen B. Wright von Global Research Technologies (GRT) in Tucson haben einen neuartigen Kunststoff entwickelt, der Kohlendioxid aus der Atmosphäre aufnimmt. Wird er dann mit Wasser überspült, entsteht reines CO₂, das im Untergrund gespeichert werden



kann – oder sich eines Tages vielleicht sogar in einen Kohlenwasserstoffkraftstoff verwandeln lässt. Der Stolperstein sind auch hier die Kosten. Doch könnte man klein anfangen: GRT hofft seine ersten Anlagen in ungefähr zwei Jahren an kommerzielle Treibhäuser zu verkaufen, die für ihre Pflanzen die Luft mit CO₂ anreichern.

»Es wäre äußerst dumm, bloß auf Geoengineering zu setzen, ohne die Emissionen zu verringern«

Tom M. L. Wigley, National Center for Atmospheric Research (NCAR)

mit einem Durchmesser von 2,5 Zentimetern. Sie hat zahlreiche winzige Löcher, ist transparent und mit einer Stärke von nur 0,25 Mikrometer 40-mal dünner als Frischhaltefolie, dabei aber viel steifer.

Siliziumnitrid wird für den Bau von Teleskopspiegeln verwendet, und J. Roger P. Angel, der Direktor des Steward Observatory Mirror Laboratory an der University of Arizona, ist auf diesem Gebiet bekannt als innovativer Entwickler. Als seine Frau ihn vor ein paar Jahren fragte, ob er nicht auch etwas gegen den Klimawandel tun könne, erinnerte sich Angel an einen Vorschlag zum Geoengineering, der ein wenig nach Sciencefiction klingt: ein Sonnenschirm im inneren Lagrangepunkt (L1). An diesem 1,5 Millionen Kilometer von der Erde entfernten Ort zerrn die Gravitation der Sonne und die unseres Planeten mit gleicher Kraft an einem Objekt. Und vom L1 aus ließe sich ein gleichmäßiger Schatten auf die Erde werfen, ohne die Atmosphäre zu verschmutzen.

Der Sonnenschutz im All bestünde aus Billionen von etwa 60 Zentimeter breiten, vielfach durchlöcherten Siliziumnitridscheiben, die mit einem Computer und einem Navigationssystem bestückt wären und nicht mehr als ein

Gramm wögen. Stapel von einer Million solcher »Flyer« müssten im Minutentakt gestartet werden, mehr als 30 Jahre lang. Der Abschuss in die Erdumlaufbahn erfolgte nicht mit Raketen, sondern mittels einer fast zwei Kilometer langen und weitgehend unter der Erde verlaufenden Spule, deren elektromagnetisches Feld die Scheiben beschleunigen soll. Angels Sonnenschutz wöge um die 20 Millionen Tonnen, knapp 70000-mal so viel, wie derzeit die Internationale Raumstation (ISS) an Masse hat.

Zum Zielpunkt gelangten die Stapel dank hocheffizienter Ionenantriebe. Anschließend würden die Flyer wie bei einem Kartenspiel verteilt – in 100000 Kilometer langen Wolken, die an der Sonne ausgerichtet wären. »Hirten«-Satelliten sollen sie als GPS-Navigationssystem begleiten. Jeder Flyer halte seine Position mittels winziger Spiegel, die als Sonnensegel wirken würden. Seine Funktion als Schattenwerfer beruhte auf destruktiver Interferenz: Die Photonen, die durch das Siliziumnitrid dringen, wären etwas langsamer als jene, die durch die Löcher flögen, bei der Wiedervereinigung sollten sich beide auslöschen.

Es ist schwer zu sagen, ob Angel seine Idee ernst meint. »Es ist keine schnelle, billige Lösung«, erklärt er heiter. Wohl wahr – mit

einem geschätzten Preis von fünf Billionen US-Dollar steht sie laut Wigley »einfach überhaupt nicht zur Debatte«. Sie würde »eine so herkulische Anstrengung erfordern«, sagt Caldeira, »dass es vielleicht einfacher wäre, Wind- und Sonnenkraftwerke zu bauen«. Selbst Angel scheint dem zuzustimmen; neuerdings denkt er darüber nach, wie sich die Fotovoltaik effizienter machen ließe. Jede Art von Sonnenschutz, merkt er an, hat den Nachteil, dass damit Energie vergeudet wird.

Eine Frage der menschlichen Natur

Einig sind sich die Geoingenieure auch darin, dass ihre Methoden das CO₂-Problem nicht beheben. Nicht nur würde das Gas bei ungebremster Emission weiter in den Meeren gelöst – mit vermutlich entsetzlichen ökologischen Folgen. Es stellt sich auch die Frage, was geschähe, wenn ohne CO₂-Reduktion die Geoengineering-Technik eines Tages ausfallen würde, was geschähe, wenn ein Krieg oder eine ungleich schwerere Finanzkrise, als wir sie derzeit erleben, den Erhalt etwa der nötigen Schwefeldioxidkonzentration unmöglich machte?

Das dann angesammelte Kohlendioxid würde die Erde innerhalb kurzer Zeit erwärmen. Caldeira hat zusammen mit H. Damon Matthews von der Concordia University in Montreal dieses Szenario simuliert. Danach stiege die mittlere Temperatur global um zwei bis vier Grad Celsius pro Jahrzehnt, 10- bis 20-mal so schnell wie heute. Raimond T. Pierrehumbert, Klimamodellierer an der University of Chicago, argumentiert, die Geschichte der Menschheit mache wenig Hoffnung, dass eine solche Katastrophe vermeidbar sei.

Heute weiß niemand zu sagen, ob Geoengineering je sinnvoll sein wird. Für manche Forscher, etwa für Wigley, ist ein Sonnenschutz eine mögliche Strategie, um Zeit für den Wechsel zur kohlenstoffneutralen Energieversorgung zu gewinnen. Andere Wissenschaftler wie Pierrehumbert fürchten, dass es den Druck von den Politikern nimmt, einen solchen Wechsel herbeizuführen. »Wenn die Leute anfangen, das als Rückzugsposition zu betrachten, könnte das Maßnahmen zur ernsthaften Verringerung der Emissionen unterlaufen, die gerade erst beschlossen werden.«

Im Endeffekt geht es in der Debatte auch um Fragen zur menschlichen Natur und der Macht der Wissenschaft, sie zu bändigen. »Es wäre äußerst dumm, bloß auf Geoengineering zu setzen, ohne die Emissionen zu verringern«, erklärt Wigley. »Eines Tages würden wir ernüchtert feststellen, dass es im Ozean keine Fische mehr gibt. Aber so dumm sind wir nicht.« Pierrehumbert widerspricht: »Wir sind ziemlich gut darin, dummes Zeug anzustellen.« ◀



Robert Kunzig ist freier Wissenschaftsjournalist und hat sich auf Meereswissenschaften und das Weltklima spezialisiert. Er lebt in Birmingham (US-Bundesstaat Alabama) und in Dijon (Frankreich).

Angel, R.: Feasibility of Cooling the Earth with a Cloud of Small Spacecraft near the Inner Lagrange Point (L1). In: PNAS 103(46), S. 17184 – 17189, 14. November 2006.

Geoscale Engineering to Avert Dangerous Climate Change. Themenheft von: Philosophical Transactions of the Royal Society A 366(1882), 13. November 2008.

Jones, N.: Sucking it up. In: Nature, 458, S. 1094 – 1097, 30. April 2009.

Meinshausen, M. et al.: Greenhouse-Gas Emission Targets for Limiting Global Warming to 2 °C. In: Nature 458, S. 1158 – 1162, 30. April 2009.

Morton, O.: Great White Hope. In: Nature 458, S. 1097 – 1100, 30. April 2009.

Robock, A.: 20 Reasons Why Geoengineering May Be a Bad Idea. In: Bulletin of the Atomic Scientists 64(2), S. 14 – 18, 59, Mai/Juni 2008.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/995469.

BESSER & SCHÖNER!

Der Science-Shop bekam einen neuen »Look«! Wir haben ihn inhaltlich und optisch überarbeitet. Nun präsentieren wir ihn stolz mit tollen Eröffnungsangeboten für Sie.

Schauen Sie mal rein – es lohnt sich!

www.science-shop.de

Alles auf einer Karte

Transistoren, die Kernelemente logischer Schaltungen, erobern als Speicherbausteine die Elektronik.

Von Bernhard Gerl und Klaus-Dieter Linsmeier

Vorbei die Zeiten der Filmrollen, Magnetbänder oder Notizbücher. Urlaubsfotos lassen sich heutzutage ebenso einfach wie Opernarien oder Telefonnummern auf wenige Millimeter große Speicherkarten bannen. Was Digitalkameras, Handys und anderer Alltags elektronik ein Gedächtnis verleiht, beruht auf der Findigkeit von Wissenschaftlern und – einem quantenmechanischen Phänomen, dem Tunneleffekt.

Transistoren sind das Herzstück jeglicher Elektronik. Ohne selbst viel Energie zu verbrauchen, sperren diese Bauteile den Durchfluss größerer Ströme oder lassen sie passieren. Das ist ideal für logische Schaltungen, die binäre Größen verarbeiten: Strom an oder aus entspricht dann den Zahlen Eins oder Null. Speziell in der Digitaltechnik schaltet und waltet die als Feldeffekttransistor bezeichnete Variante. Schon geringe Spannungen an einer Gate genannten Elektrode genügen ihr, um den Stromfluss zwischen den als Source und Drain bezeichneten Anschlüssen zu kontrollieren.

Doch sobald die Spannung am Gate abgeschaltet wird, erlischt normalerweise die »Erinnerung« des Bauelements an seinen Zustand. Eine erste Ausnahme waren EPROMs (Erasable Programmable Read-Only-Memory), Halbleiterspeicher, die auch heute noch Einstellungen und Grundprogramme enthalten, um beispielsweise einen Computer beim Einschalten hochzufahren. Der Trick bestand darin, dem Feldeffekttransistor eine vierte Elektrode zwischen Gate und dem Stromkanal des Halbleiters zu geben, das so genannte

Floating Gate. Es verfügt über keinen eigenen Anschluss an das Stromnetz und ist von den restlichen Komponenten durch eine elektrisch isolierende Oxidschicht getrennt.

Durch die Spannung am Steuergate wird je nach Polarität der darunterliegende Stromkanal im Halbleiter arm oder reich an Ladungsträgern, der Stromfluss also gesperrt oder frei gegeben (ob der erste oder der zweite Zustand des Bauteils als gespeicherte Eins oder Null interpretiert wird, ist eine Frage der Konvention). Denselben Effekt hat auch ein aufgeladenes Floating Gate. Beim EPROM beschleunigt eine hohe Spannung zwischen Source und Drain sowie eine hohe Steuerspannung am Steuergate die Ladungsträger, so dass sie den Isolator durchdringen. Um das Floating Gate wieder zu entladen, muss das EPROM allerdings mit Ultraviolettlicht bestrahlt und so komplett gelöscht werden.

Dank des »Fowler-Nordheim-Tunneleffekts« lässt sich dies beim EEPROM elektronisch bewerkstelligen, daher das zweite »E« im Akronym. Nach klassischem Verständnis sollte die etwa 20 Nanometer dicke Oxidschicht Ladungsträger eigentlich vom Floating Gate fernhalten. Da Elektronen aber auch einen Wellencharakter besitzen, ist die Wahrscheinlichkeit für einen Übergang nach den Gesetzen der Quantenmechanik niemals null. Durch den geringen Abstand und die angelegte Steuerspannung wird sie so stark erhöht, dass eine hinreichende Menge Ladungsträger die Elektrode erreicht; weil die sich nun ausbildende Spannung nicht exakt von außen festgelegt ist, erhielt es die Bezeichnung Floating Gate (nach englisch *float* für schwimmen, treiben; andere Erklärungen sehen in der Posi-

WUSSTEN SIE SCHON?

► **Der erste Feldeffekttransistor** wurde 1934 von dem deutschen Physiker Oskar Heil konstruiert, doch eine wirtschaftliche Produktion dieses Typs war erst Jahrzehnte später möglich. Deshalb gilt als Geburtsstunde des Transistors schlechthin das Jahr 1947, in dem die Physiker William B. Shockley, John Bardeen und Walter H. Brattain ihr Demonstrationsmodell in den Bell-Laboratorien vorstellten (Physik-Nobelpreis 1956). Es handelte sich um einen Bipolartransistor, dessen Stromfluss über einen Steuerstrom kontrolliert wird.

► **Fujio Masuoka**, heute an der Tohoku University in Sendai (Japan), gilt als Erfinder des Flash-Memorys. Er entwickelte seit 1971 nichtflüchtige elektronische Speicher bei Toshiba. Sein Kollege Shoji Ariizumi prägte angeblich den Namen, weil ihn das Löschen in Blöcken an das Aufleuchten eines Kamerablitzes erinnerte. Eine alternative Erklärung führt die Bezeichnung auf die EPROMs zurück: Das Löschen eines solchen Speichers mit UV-Licht wird als »Flashen« bezeichnet.

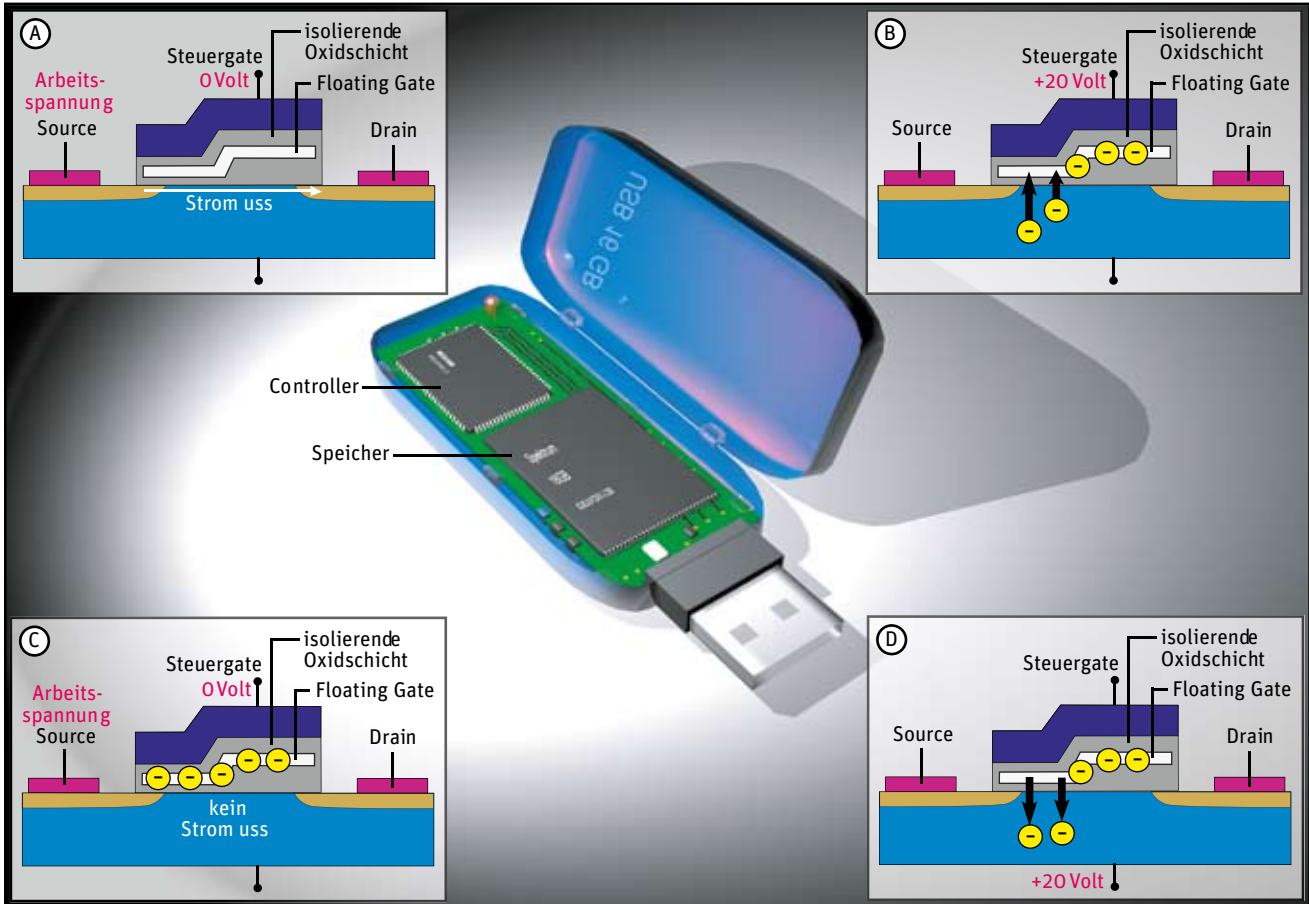
► **Die hohe Schreibspannung** zwischen Steuergate und Stromkanal verändert Energieniveaus der isolierenden Oxidschicht, so dass die tunnelnden Ladungsträger einen Teil des Wegs in einem

Leitungsband zurücklegen. Erreichen sie das Floating Gate, fallen sie auf ein niedrigeres Niveau zurück und geben die Energiedifferenz in Form von Gitterschwingungen ab. Dabei können Bindungen aufbrechen und den Transistor mit der Zeit unbrauchbar machen. Deshalb werden bei jedem Speichern andere Zellen beschrieben. Die Speicherkarten protokollieren außerdem Fehlerstellen und sperren defekte Zellen oder Bereiche.

► **Die nächste Generation** kündigt sich bereits an. Bei SONOS-Zellen wird das metallene Floating Gate durch eine Schicht Siliziumnitrid ersetzt (das Akronym steht für Silizium-Oxid-Nitrid-Oxid-Silizium und deutet den Schichtaufbau an). Auch in diese Schicht gelangen Ladungsträger durch den Tunneleffekt. Weil das Nitrid ein Isolator ist, können sie sich dann aber nicht mehr frei bewegen und werden ortsfest gespeichert. Das ermöglicht zum einen, defekte Zellen auslesen zu können – gespeicherte Ladung kann nicht einfach abfließen. Zum anderen können sich gleichnamige Ladungen auf benachbarten Floating Gates nicht gegenseitig abstoßen und somit die eingeschriebene Information verfälschen. Mithin erleichtert das eine weitere Miniaturisierung der Bauelemente.

Ob USB-Stick oder Speicherkarte im Handy, jedem Bit an Information entspricht beim so genannten Flash Memory der Zustand eines Feldeffekttransistors. Dessen Herzstück ist die als Floating Gate bezeichnete Elektrode. Liegt am Steuergate keine Spannung an, kann Strom zwischen den beiden Elektroden Source und Drain fließen (A). Der Transistor speichert damit beispielsweise den binären Wert Null. Wird nun an das Steuergate eine hohe Spannung

angelegt, tunneln Elektronen aus dem Halbleiter durch die isolierende Oxidschicht auf das Floating Gate (B). Wird die äußere Spannung abgeschaltet, können sie auf Grund der Isolierschicht nicht zurückfließen und erzeugen ein elektrisches Feld, das einen Stromfluss verhindert. Der Transistor speichert dann die Binärzahl Eins (C). Beim Löschvorgang hingegen ermöglicht eine entgegengesetzte Spannung das Zurücktunneln in den Halbleiter (D).



tion des Gates den Grund für den Namen). Kehrt man die Polung um, können die Ladungsträger das Floating Gate tunnelnd wieder verlassen – die Speicherzelle wurde gelöscht. Ein Knick in dieser Elektrode bringt sie noch ein paar Nanometer näher an den Stromkanal heran und erleichtert die Rückkehr. Das Prinzip lässt sich übrigens auch mit Defektelektronen realisieren, den positiven Pendanten der Elektronen.

Bald zeigte sich aber ein Problem: Beim Schreiben wurden oft auch benachbarte Speicherzellen beeinflusst. Kurzerhand spendierten die Entwickler jeder Zelle einen weiteren Transistor, der die gezielte Auswahl überwachte. Das ging allerdings zu Lasten der Größe und damit der Integrierbarkeit in Siliziumchips.

In dem als Flash Memory bezeichneten Speicher ersetzt eine externe Steuerlogik die Auswahltransistoren. Dementsprechend lassen sich solche EEPROMs kleiner und damit auch billiger bauen. Der Nachteil: Die in einem Raster angeordneten Zellen lassen sich zwar einzeln auslesen und auch neu beschreiben, jedoch nur blockweise löschen. Andererseits arbeiten Flash-Speicher dadurch schneller, und ihre Elektronik ist preiswerter, was sie zum idealen Speichermedium für mobile Anwendungen der Digitaltechnik macht. Derzeit gibt es zwei Architekturtypen der Verschaltung.

Beim NAND-Flash sind die Speicherzellen in größeren Gruppen in Serie geschaltet. Sie teilen sich jeweils eine Datenleitung, Lesen und Schreiben erfolgt gruppenweise. Bei der NOR-Architektur sind die Datenleitungen parallel geschaltet, so dass einzelne Zellen direkt angesprochen werden können. Dies ist weitaus schneller, aber auch deutlich teurer. Memory-Karten für die Unterhaltungselektronik nutzen deshalb die NAND-Architektur.

Flash-Speicher verdrängen allmählich andere Speicher in Computern. Ob allerdings eine »Solid-State-Disk«, die nur aus Flash-Speicher-Zellen besteht, die klassische Festplatte mit Magnetplatte in nächster Zeit ersetzen wird, ist umstritten. Flash-Speicher benötigen weniger Strom, haben keine empfindliche Mechanik, die verschleifen oder beim Fall auf den Boden Schaden nehmen kann. Noch wären sie aber zu teuer: Ein Gigabyte magnetische Festplatte kostet derzeit 20 Cent, da können selbst Discounter-Angebote noch nicht mithalten.

BERNHARD GERL ist Technikjournalist in Mainz, **KLAUS-DIETER LINSMEIER** Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«. Die Autoren danken Tobias Erlbacher vom Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie in Erlangen für seine Unterstützung.



» *Entscheidend ist auch, wie die Kosten erstattet werden* «

Die personalisierte, das heißt die auf den jeweiligen Patienten abgestimmte medikamentöse Behandlung steht im Fokus der Forschung von Dr. Andreas Strauss, Leiter des Bereichs diagnostische Testverfahren bei Roche. Das geeignete Werkzeug dazu liefern ihm so genannte Biomarker.

Andreas Strauss, geboren 1966, leitet in dem Pharmakonzern Roche den Bereich der diagnostischen Testentwicklung für die Forschung. Ein Schwerpunkt des Unternehmens ist die Entwicklung von Methoden und Wirkstoffen für die personalisierte Medizin. Molekulare Marker, so genannte Biomarker, helfen bei diesen Entwicklungen, zum Beispiel um die Wirkung von Medikamenten vorherzusagen. Patienten können dann präziser behandelt werden, Nebenwirkungen, Unverträglichkeiten oder Resistenzen lassen sich besser vermeiden.

Strauss studierte Biologie an den Universitäten Konstanz und Tübingen. Ein Sprachstipendium ermöglichte ihm einen einjährigen Aufenthalt in Japan. Nach seiner Promotion im Jahr 2000 arbeitete er zunächst als Berater für Gesundheitsfragen für einen Versicherungskonzern und wechselte 2003 zum Biotechnologie-Zentrum von Roche nach Penzberg in Oberbayern. Zuerst war er für die Entwicklung und Implementierung von Strategien zur Erforschung von molekularen Biomarkern in der Entwicklung von Krebsmedikamenten verantwortlich. Ende 2008 wechselte er in seine jetzige Position.

Spektrum der Wissenschaft: Herr Dr. Strauss, können Sie noch zum Arzt gehen, ohne ihn in eine Diskussion über die so genannte personalisierte Medizin zu verwickeln?

Dr. Andreas Strauss: Ich gebe zu, dass mich das Thema kaum loslässt. Schließlich möchte jeder von uns das Medikament und die Therapie erhalten, die genau zu seinem Körper passen. Ich bin überzeugt davon, dass personalisierte Medizin *das* Zukunftsthema im Gesundheitswesen ist.

Spektrum: Biologiestudenten verbringen nicht selten ihre Nächte an der Laborbank. Wann haben Sie das letzte Mal im Labor gearbeitet?

Strauss: Nach meiner Promotion in Mikrobiologie entwickelte ich als wissenschaftlicher Assistent noch eineinhalb Jahre molekulare Testverfahren. Danach habe ich mich ganz bewusst von der akademischen Laufbahn verabschiedet.

Spektrum: Hat Sie wissenschaftlicher Ruhm nie gereizt?

Strauss: Doch, natürlich. Zu Anfang meines Studiums begeisterte mich die Grundlagenforschung, doch mit der Zeit wurden mir angewandte Themen immer wichtiger, bis ich in meiner Diplom- und dann in der Doktorarbeit ganz in diese

Richtung einschwenkte. Die Aufgabe war, große Wirksubstanzenbanken rasch nach geeigneten Molekülen zu durchsuchen, die sich für neue Antibiotika eignen. Letztlich war mir schon während des Studiums klar geworden, dass das, was ich tue, nicht nur in einer Veröffentlichung münden, sondern fassbare Ergebnisse bringen soll. Wenn möglich, wollte ich sogar neue Entwicklungen im Gesundheitsbereich in Gang bringen.

Spektrum: Sie wechselten aber nicht als Forscher in die freie Wirtschaft, sondern als Berater. Was hat Sie zu diesem erneuten Richtungswechsel veranlasst?

Strauss: Ich sehe das als eine konsequente Weiterentwicklung in Richtung Forschungsmanagement. Während meiner Beraterstätigkeit lernte ich die ökonomischen Aspekte des internationalen Gesundheitswesens genau kennen. Denn egal wie bahnbrechend eine Erfindung oder ein neues Medikament ist – entscheidend ist auch die Frage, wie die Kosten erstattet werden.

Spektrum: Die Stationen Ihrer Karriere waren also exakt geplant?

Strauss: Vielleicht nicht von Anfang an, aber nach dem Grundstudium wusste ich recht genau, wohin die Reise gehen sollte. Deshalb eignete ich mir



Rund 4500 Mitarbeiter forschen und produzieren im Biotechnologiezentrum von Roche in Penzberg im bayerischen Alpenvorland. Bis 1966 wurde in der Stadt Kohle abgebaut; 1972 ließ sich dort der Pharmakonzern Boehringer Mannheim nieder, der seit 1998 zum Schweizer Unternehmen Roche gehört. Im Fokus der Entwicklungen stehen neuartige Verfahren zur Diagnose und Behandlung von Krankheiten. Eine tragende Rolle spielt dabei die Forschung zu Produkten, die spezifisch auf die Bedürfnisse bestimmter Patientengruppen zugeschnitten sind.

den wissenschaftlichen Hintergrund an, machte Erfahrungen in der Entwicklung von Testreihen und erwarb Kenntnisse zu den wirtschaftlichen Aspekten. Als ich eines Tages ein Stellenangebot von Roche für eine Position im Biomarkerprogramm erhielt, war mir klar, dass das der richtige Ort ist, um all diese Qualifikationen einzusetzen.

Spektrum: Wie passt Ihr einjähriger Japanaufenthalt in diesen Karriereplan?

Strauss: Das Land und seine Kultur haben mich bereits als Teenager fasziniert. Und als ich nach meinem Diplom mit einem Sprachstipendium die Möglichkeit bekam, dort ein Jahr zu verbringen, griff ich sofort zu. Zudem konnte ich an der Universität von Kioto bei einem renommierten Spezialisten meine Arbeiten an bakteriellen Testsystemen weiterführen. Was mir neben den japanischen Sprachkenntnissen heute noch sehr viel nutzt, ist auch die Erfahrung, über kulturelle Grenzen hinweg zusammenzuarbeiten. Das hilft mir beispielsweise, wenn ich zwischen den Perspektiven pharmazeutischer und diagnostischer Forschung und Entwicklung vermittele.

Spektrum: Sie befassen sich heute mit Biomarkern. Was darf man darunter verstehen?

Strauss: Der Begriff war bis vor wenigen Jahren noch völlig ungebräuchlich, dabei handelt es sich eigentlich um ein ganz einfaches Phänomen: Fieber ist beispielsweise ein Biomarker für eine Grippe, der Blutdruck kann Bluthochdruck anzeigen. Doch der Begriff Biomarker erstreckt sich auch auf die molekularen Geschehnisse in Zellen, zum Beispiel auf die Aktivierung eines Eiweißes, die Menge einer bestimmten Boten-RNA oder auf eine Genmutation.

Spektrum: Und welches Interesse haben Sie und Roche daran?

Strauss: Seit es möglich ist, die Ursachen von Erkrankungen auf dieser Ebene zu untersuchen, wissen wir, dass jeder Mensch auf Grund seiner genetischen Disposition auf Medikamente individuell anspricht. Deswegen wirken Arzneien bei dem einen hervorragend, bei dem anderen rufen sie möglicherweise Nebenwirkungen hervor. Mit diagnostischen Testverfahren kann man zum Beispiel einen Biomarker finden, mit diesem den Subtyp einer Brustkrebserkrankung bestimmen und dann die richtige Therapie ansetzen. Roche setzt Biomarker zudem schon bei der Auswahl von Wirksubstanzen ein, die für Neuentwicklungen von Medikamenten in Frage kommen.

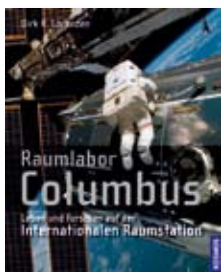
Spektrum: Sie leiten die Entwicklung von diagnostischen Testverfahren für die Forschung. Ist das ein schnelleres Geschäft als die Entwicklung eines neuen Medikaments?

Strauss: Auf jeden Fall. Bis zur Zulassung eines neuen Medikaments können 9 bis 15 Jahre vergehen. In diesem Zeitraum sind bereits drei neue technologische Lösungen zum Nachweis ein und desselben Moleküls auf dem Markt. Als Entwickler von diagnostischen Testverfahren müssen wir unserer Zeit immer voraus sein.

Spektrum: Das klingt so, als warteten die Kollegen von der klinischen Medizin nur auf Ihre neuesten Produkte?

Strauss: Ein Problem ist: Stellen Sie zehn Forschern im akademischen Bereich dieselbe Frage zu einem bestimmten Oberflächenmolekül von Tumoren, erhalten Sie auch zehn verschiedene Antworten, je nachdem, welche molekularen Werkzeuge sie bei ihrer Arbeit benutzen. Das macht die Interpretation der Daten sehr schwierig. Indem wir Standards anbieten, die allgemein anerkannt sind, verbessern wir die Vergleichbarkeit von Forschungsergebnissen.

Das Interview führte die Münchner Wissenschaftsjournalistin **Katrin Nikolaus**.



RAUMFAHRT

Per Weltraumlaster zum Laborcontainer

Etwas zu enthusiastisch preist Dirk Lorenzen die Errungenschaften und die Zukunftsaussichten der europäischen Raumfahrt.

»7. Februar 2008, 14.45 Uhr Ortszeit am Kennedy Space Center: Die US-Raumfähre Atlantis steht fertig zum Abflug auf der Startrampe 39A. Lähmende Spannung senkt sich über das gesamte Gelände. Dann beginnt der entscheidende Countdown: »T minus ten, nine, eight. Go for main engines start! Seven, six. Main engines ignition. Four, three, two, one, zero! And lift-off for space shuttle Atlantis as Columbus sets sail on a voyage of science to the space station.« Mit der Beschreibung des Starts des europäischen Raumlabor Columbus an Bord einer amerikanischen Raumfähre beginnt der Hamburger Wissenschaftsjournalist Dirk Lorenzen sein neuestes Buch. Seine bildhafte Beschreibung des Ereignisses zieht den Leser sogleich in den Bann, lässt ihn an der Faszination Raumfahrt teilhaben. Das Werk ist eher eine 200-seitige Reportage, die man gerne verschlingen mag, denn ein traditionelles Sachbuch.

Auf dem Einband sieht man einen Astronauten beim Außeneinsatz an Columbus. Es folgen eine Hand voll fantastischer, doppel-seitiger Fotos vom Raumlabor und von Europas unbemanntem Schwertransporter ATV (*Automated Transfer Vehicle*). Dessen erstes Exemplar namens »Jules Verne« erfüllte im Frühjahr 2008 seinen Transportauftrag und verglühte ein halbes Jahr später planmäßig in der Atmosphäre. Abgesehen von einigen mehr textlastigen Seiten im Innenteil könnte das Buch glatt als Bildband durchgehen.

In seiner Einführung wird Jean-Jacques Dordain, Ex-Astronautenanwärter, Professor für Strömungsmechanik und amtierender Generaldirektor der Europäischen Weltraumorganisation ESA, nicht müde, die europäischen Beiträge zur Raumfahrt in den höchsten Tönen zu loben – wenig verwendlich, das gehört zu seinen Dienstpflichten. Für den Rest des Buchs übernimmt dies der Autor.

»Die bemannte Raumfahrt steht vor einem großen Umbruch«, ist auf dem Buchumschlag zu lesen. »Europa wurde mit Columbus und dem ATV ein vollwertiges Mitglied im elitären Club der Weltraumnationen. Nutzt der alte Kontinent die Chance, dauerhaft zu einer großen Weltraummacht zu werden?« Nun, die ESA hat in den vergangenen Jahren zahlreiche Erfolge verbuchen können, aber das mit der Weltraumnation scheidet schon daran, dass Europa eben keine Nation ist, sondern ein Multikulti-Debattierklub, der seine Aufträge nicht nach der technischen Leistungsfähigkeit, sondern im Verhältnis der Beitragszahlungen der einzelnen Länder vergibt.

Da ist kein Platz für Visionen wie die vom bemannten Mondflug, mit der US-Präsident John F. Kennedy 1961 ungeheuer viel Geld und Energie auf dieses Ziel lenkte, oder für den Versuch von George W. Bush, es ihm mit seiner »Vision for Space Exploration« von 2004 nachzutun, mit Rückkehr

zum Mond bis 2020 und einem bemannten Flug zum Mars. Es ist sogar zweifelhaft, ob die Begeisterung der Europäer überhaupt für irgendwelche bemannte Raumfahrt reicht.

Nach wie vor sind die Astronauten der Mitgliedsstaaten nur »Beifahrer« in den Vehikeln anderer Nationen. Die ESA hat 2001 ihr Programm Aurora zur Erforschung des Sonnensystems vorgestellt, doch scheinen dem keine nennenswerten Taten zu folgen. Wie Lorenzen beschreibt, gibt es zwar Ideen, das ATV für den Transport von Astronauten und nicht nur von Fracht aufzurüsten, aber man muss befürchten, dass dieses Vorhaben ebenso in der Versenkung verschwindet wie damals die Pläne für den europäischen Raumgleiter Hermes.

Gleichwohl billigt der Autor Europa Rang 3 unter den Astronautenriegen zu; aber nachdem auf Weisung von Barack Obama die NASA vom Ziel Mond abrückt, wird aller Voraussicht nach der nächste Mensch auf dem Erdtrabanten ein Chinese sein. Indien hat ebenfalls Ambitionen und mit seiner Sonde Chandrayaan-1 bereits den Mond erreicht.

Dessen ungeachtet ergreift Lorenzen klar Partei für die Internationale Raumstation ISS und ein bemanntes europäisches Raumprogramm. Auf die Diskussion um den wissenschaftlichen Nutzen lässt er sich gar nicht ein, wohl wissend, dass er nur verlieren könnte: »Forschung ist keine Rechtfertigung für die ISS.« Stattdessen zitiert er den D1-Astronauten Ernst Messerschmid: »Die Forschung ist keineswegs das einzige Ziel. Wir verbinden mit der Raumstation Wissenschaft, Forschung, technische Entwicklung, Schaffung von Innovationen, aber auch wirtschaftliche Dinge und Dinge im Bildungsbereich« – welche »Dinge« auch immer man sich dabei denken mag. Immerhin prophezeit er: »Binnen weniger Jahre wird Columbus mehr Forschung in der Schwerelosigkeit ermöglichen, als bei allen bisherigen Raumfahrtmissionen zusammen durchgeführt worden ist.«

Ein Problem dabei lässt Lorenzen nicht unangesprochen: All dies steht und fällt mit dem Einsatz der Spaceshuttles. Bereits nächstes Jahr soll jedoch letztmals eine Raumfähre an der ISS anlegen, kurz nachdem die Besatzung so weit aufgestockt wurde, dass Astronauten überhaupt Zeit für die Forschung erübrigen können und nicht, wie Thomas Reiter 2006, fast nur mit Instandhaltungsarbeiten an der Station beschäftigt sind. Doch das ATV und sein russisches Vorgängermodell Progress verglühen bei der



Das Shuttle, das Bauteile für die ISS in die Umlaufbahn bringt, startet vom Kennedy Space Center in Florida.



Der deutsche Astronaut Hans Schlegel verbrachte bei seinem Außeneinsatz am 13. Februar 2008 mehr als sechs Stunden mit Montagarbeiten.

Rückkehr zur Erde, und die Sojus-Kapseln sind zu klein, um neben den Insassen auch Experimente und Proben wieder zurückzubringen.

Ab 2010 wird der gesamte »Personenverkehr« an den Russen hängen bleiben, bis frühestens 2015 die neuen Orion-Kapseln der NASA einsatzbereit sind oder tatsächlich Europa seine ATVs zu Passagierschiffen aufmotzt. Lorenzen würde Letzteres begrüßen und wirft in die Waagschale, dass die

Ariane 5 als Trägerrakete prinzipiell tauglich wäre. Da sie ursprünglich für den Raumgleiter Hermes ausgelegt war, könne sie, so eine Expertenaussage, mit geringen Modifikationen sogar dazu verwendet werden, bis zu einer Tonne Nutzlast zum Mond zu transportieren.

Durchgehend kommen viele Fachleute zu Wort, was den Text sehr belebt und aufwertet. Die Aussage im Klappentext »Dirk Lorenzen analysiert ebenso engagiert wie

kritisch die aktuelle Lage in der Umlaufbahn« ist zwar richtig. Dass er die Errungenschaften der europäischen Ingenieure über den grünen Klee lobt und Kritik an der Raumfahrt mit Polemik oder einer allzu flapsigen Sprache beantwortet, entfernt ihn jedoch weiter von einer neutralen journalistischen Position, als der sachlichen Auseinandersetzung mit dem Thema guttut. Wenn er obendrein an Stelle der zahlreichen Wiederholungen und vor allem in den oft »nur schön gedichteten« Bildbeschreibungen mehr harte Fakten gebracht hätte, wäre das insgesamt sehr gelungene Buch sogar zum Referenzwerk für Columbus und Jules Verne überhaupt geworden.

Oliver Dreissigacker

Der Rezensent arbeitet als freier Wissenschaftsjournalist in Mannheim.

Dirk H. Lorenzen

Raumlabor Columbus

Leben und forschen auf der Internationalen Raumstation

Kosmos, Stuttgart 2008. 220 Seiten, € 34,90

PHILOSOPHIE

Der Sinn des Lebens ist das Leben selbst

Bernulf Kanitscheider führt alle Vorstellungen von einer externen Quelle des Lebenssinns ad absurdum und offeriert uns den Hedonismus als erstrebenswerte, selbstbestimmte Alternative.



Hat mein Leben einen Sinn? Oder: Wofür lohnt es sich zu leben? Oder auch: Kann ich mein bisheriges Leben als gelungen ansehen? Die Frage ist so groß, dass man sie im Alltag in aller Regel beiseiteschiebt. Nur bei großen Entscheidungen spielt sie eine Rolle, oder wenn man im Alter eine kritische Bilanz seines bisherigen Lebens zieht.

Die Frage zu stellen ist nicht ungefährlich. Was soll man tun, wenn die Antwort »Nein« lautet? Der Philosoph und Autor Albert Camus (1913–1960) schrieb: »Es gibt nur ein wirklich ernstes philosophisches Problem: den Selbstmord. Die Entscheidung,

ob das Leben sich lohne oder nicht, beantwortet die Grundfrage der Philosophie. Alles andere ... kommt später.«

Die abendländische Tradition ist stark von der christlichen Antwort auf die Sinnfrage geprägt: Gott selbst ist es, der deinem Leben einen Sinn gibt. Diese Antwort wirkt in vielerlei Verkleidungen bis heute nach. Die Vorstellung, Gott wirke durch direkten Eingriff und gegenwärtig in das Weltgeschehen ein, hat zwar ein ähnliches Schicksal erlitten wie die Geschichten vom Weihnachtsmann. Auch von der von Georg Wilhelm Friedrich Hegel (1770–1831) be-

schworenen Ersatzfigur »Weltgeist« ist nur noch selten die Rede. Gleichwohl hält sich hartnäckig die Idee, die ganze Welt steuere auf ein höheres Ziel zu – und das Leben des Einzelnen gewinne seinen Sinn dadurch, dass er sich an dieser Bewegung hin zum Höheren beteilige.

Der Wissenschaftstheoretiker Bernulf Kanitscheider, der bis 2007 den Lehrstuhl für Philosophie der Naturwissenschaften in Gießen innehatte, zerpfückt systematisch und mit großer Sorgfalt alle diese Vorstellungen. Die biologische Evolution hat zwar im Lauf der Zeit immer höher entwickelte Lebensformen hervorgebracht; dennoch ist es abwegig, daraus zu schließen, sie steuere auf ein höheres Ziel zu. Die physikalische Entwicklung der Welt wird ohnehin in dem bekannten Wärmetod enden; obendrein ist die Vorstellung, man könne in seinem Leben über einen räumlich und zeitlich winzigen Teil des Universums hinaus überhaupt etwas bewirken, hoffnungslos realitätsfern. Schon in einer lumpigen Million Jahre wird vom Wirken unserer Zeit-

genossen – und wahrscheinlich der Menschen überhaupt – nicht mehr die geringste Spur zu finden sein.

Unverhältnismäßig viel Raum widmet Kanitscheider der Auseinandersetzung mit der christlichen Religion, wohl weil er dem erstarkenden christlichen Fundamentalismus etwas entgegensetzen möchte. So entlarvt er die Sinnsuche des Hans Küng als leeres Wortgeklänge, erklärt den Versuch seines Fachkollegen Jürgen Habermas, der Religion ein von der kritischen Vernunft unbehelligtes Reservat einzuräumen, zur »Kastration der Vernunft« und findet scharfe Worte gegen den Versuch des Wiener Kardinals Christoph Schönborn, die Evolution mittels »Intelligent Design« zu erklären. Nein, es gibt keinen Anlass, etwas zu glauben, das man mit seinem Alltagsverstand ohne Weiteres verwerfen würde, nur weil es mit dem Etikett »Religion« und dem Anspruch auf göttliche Offenbarung daherkommt.

Am Ende ist der Befund ernüchternd einfach. Die Welt da draußen ist schlicht sinnlos. Die Fundamentalphysiker suchen vielleicht nach einer »Theory of Everything«. Aber selbst wenn sie eine solche alles erklärende Weltformel finden würden, dann würden sie darin nicht den Sinn der Welt sehen. Berufspessimisten wie Arthur Schopenhauer (1788–1860) und sein Verehrer Leo Tolstoi (1828–1910) haben ihrer Erkenntnis von der Sinnlosigkeit der Welt literarisch eindrucksvoll Ausdruck verliehen.

Aber es gibt keinen Anlass, aus diesem Grund in Pessimismus zu verfallen, sagt Kanitscheider. Hat der Mensch sich erst von der Vorstellung verabschiedet, dass der Sinn seines Lebens »von außen«, von einer Instanz außerhalb seiner selbst, zu kommen hat, lebt er fortan ganz ungeniert. Man muss die abendländische Tradition nur ein Stück weiter zurückverfolgen, bis zu den Griechen der Antike, und findet Lebensphilosophien, die nicht nur ohne externe Sinnggebung auskommen, sondern auch von der sauertöpfischen Pflichtethik Immanuel Kants und der Drohung mit Strafen im Jenseits völlig frei sind.

Aristippos, der Gründer der kyrenaischen Schule des Hedonismus, »war ein Künstler der Lebenspraxis und bezeichnete den Lustgewinn als oberstes Lebensziel«. Wohlgerneht, nicht die hemmungslose Suche nach dem Vergnügen. So empfehle es sich, beim Umgang mit Freudenmädchen darauf zu achten, dass man nicht von der Leidenschaft besessen wird, »denn zu gebieten über die Lust und ihr nicht zu unterliegen,

das ist wahrhaft preiswürdig, nicht sich ihr zu versagen«, so zitiert Kanitscheider zustimmend seinen antiken Philosophenkollegen. In der Tat, der Vollrausch ist kein erstrebenswerter Lebenszustand und, wenn es nach Aristippos geht, die heftige Verliebtheit auch nicht – obgleich sich der weise Hedonist ein paar Ausrutscher in die Maßlosigkeit genehmigt, wenn deren Anzahl ein zuträgliches Maß nicht übersteigt.

Gönne dir deinen Spaß, ohne dir daraus das christlich geprägte schlechte Gewissen zu machen, sagt Kanitscheider, setze deine Vernunft ein, damit nicht aus Versehen Maßlosigkeit und Unverstand dir den Spaß verderben oder anderen Schaden zufügen, wehre dich mit dem Mittel des Humors gegen die Prinzipienfestigkeit und den moralischen Rigorismus, die nur allzu leicht ins Tragische abgleiten – und das war's. Von der protestantischen Arbeitsethik und ähnlichen Lebenseinstellungen bleibt nur der Hinweis, dass der rechte Spaß sich im passiven Konsum angenehmer Dinge auf die Dauer nicht einstellen will. Bewegung sei schon erforderlich, nicht nur in sexuellen Dingen, wo dies unmittelbar einleuchtet; auch bei anderen Genüssen komme ein lustvolles (zum Beispiel Erfolgs-)Erlebnis erst nach erheblicher Anstrengung. Kanitscheider nennt an dieser Stelle seine persönlichen Lieblingsbeschäftigungen Bergsteigen und klassische Kammermusik, als Beispiele ohne den üblichen Philosophenanspruch auf Allgemeingültigkeit.

Das kann ich alles mit der größten Begeisterung nachvollziehen. Trotzdem bleibt ein schales Gefühl zurück, und zwar offensichtlich nicht nur bei mir, denn Kanitscheider selbst geht darauf ein, wie schwer es uns fällt, uns von diesem übermächtigen Teil der abendländischen Tradition zu verabschieden. Wenn ich am Ende meines Lebens konstatieren kann, dass ich meinen Spaß gehabt habe, vielleicht sogar reichlich: Soll das dann wirklich alles gewesen sein? Will ich nicht eine Spur in der Weltgeschichte hinterlassen, auf die ich stolz sein kann, auch wenn sie sich schon nach wenigen hundert Jahren verliert? Ist nicht Albert Schweitzer ein Mensch, dessen Leben in jedermanns Augen, einschließlich seiner eigenen, in ganz besonderem Maße einen Sinn hatte?

Das bezweifelt auch Kanitscheider nicht. Nur lässt sich Albert Schweitzers Lebenshaltung »nicht zwingend fundieren ... Man kann sehr gut seine Lebenserfüllung im Sozialbereich finden, aber kaum eine Argumentation aufbauen, wonach der Lebens-

sinn notwendigerweise in der Unterstützung Hilfsbedürftiger bestehen muss.«

Ach so. Stellt man einem Philosophen eine Frage, bekommt man eine allgemeingültige Antwort. Die ist eben wegen ihrer Allgemeingültigkeit im Allgemeinen unvollständig. Was soll ich tun? »Lebe tugendhaft«, sagt der Philosoph, denn das ist die einzige Vorschrift, die er ohne Ansehen der Person einigermaßen zwingend begründen kann. Worin besteht der Sinn des Lebens? »Im gepflegten Genuss«, sagt der Philosoph, denn das ist das Einzige, was er ohne Ansehen der Person als erstrebenswert begründen kann. Beide Antworten sind nicht erschöpfend und können es gar nicht sein. Sie liefern nur einen »Rahmen«, in dem der Einzelne seine individuellen Vorstellungen entfalten kann.

Es kann sein, dass dieser Rahmen für viele Menschen, die mit der zugehörigen Freiheit nicht zu Rande kommen, zu weit ist. Ein Mensch, den ich als väterlichen Freund zu schätzen gelernt hatte, hat sich im Alter von 50 Jahren das Leben genommen, weil er im Weiterleben keinen Sinn mehr sah; so jedenfalls musste man seinen Abschiedsbrief verstehen. »Jemand, der ohne zwingenden Grund, im Vollbesitz seiner geistigen Kräfte, ohne Not und Krankheit das Leben verlässt, hat nicht verstanden, dass der Sinn des Lebens das Leben selbst ist«, sagt Kanitscheider. Das dürfte auf meinen Freund zutreffen – was seinen Tod in meinen Augen nicht weniger tragisch macht. Erst wenige Jahre zuvor hatte er einer sehr traditionell christlichen Grundhaltung bewusst den Rücken gekehrt.

Man liest immer wieder von Ärzten mit langjähriger Berufserfahrung, die sorgfältig und wohl überlegt begründen können, warum sie in gewissen Fällen das Verabreichen eines Placebos und damit einen Akt vorsätzlicher Täuschung im Interesse des Patienten für geboten halten. Da gewinnt ganz unerwartet die von Kanitscheider so gnadenlos ad absurdum geführte traditionelle Vorstellung vom externen Sinn des Lebens eine neue – problematische – Rechtfertigung.

Christoph Pöppe

Der Rezensent ist Redakteur bei »Spektrum der Wissenschaft«.

Bernulf Kanitscheider

Entzauberte Welt

Über den Sinn des Lebens in uns selbst
Eine Streitschrift

Hirzel, Stuttgart 2008. 218 Seiten, € 24,-

Volumen aus dem Nichts

Im abstrakten Raum der Mathematik ist das möglich, aber nicht einfach. Das Banach-Tarski-Paradox erfordert für seinen Beweis eine umfangreiche Vorbereitung.

Es ist möglich, eine Kugel im dreidimensionalen Raum in endlich viele Stücke zu zerlegen und diese dann so zusammzusetzen, dass zwei Kugeln entstehen, die genau so groß sind wie die erste. Dieser erstaunliche Satz der Mengenlehre wurde 1924 von den polnischen Mathematikern Stefan Banach (1892–1945) und Alfred Tarski (1901–1983) formuliert und bewiesen.

Allerdings haben die Teilstücke der Zerlegung keine anschaulich verständliche Form. Vielmehr sind diese Punktmengen nicht messbar, das heißt so bizarr, dass man ihnen kein Volumen zuschreiben kann. Offensichtlich hat der dreidimensionale mathematische Raum Eigenschaften, die es in der physischen Realität nicht gibt. Um die Existenz solcher Punktmengen zu beweisen, benötigt man das Auswahlaxiom, jene merkwürdige Aussage, die nicht dieselbe

Selbstverständlichkeit genießt wie die klassischen Axiome der Mengenlehre nach Zermelo und Fraenkel. Denn mit diesen ist das Auswahlaxiom ebenso gut vereinbar wie sein Gegenteil (Spektrum der Wissenschaft 3/2009, S. 54).

Leonard Wapner, Professor für Mathematik am El Camino College in Torrance (Kalifornien) und seit 30 Jahren in der mathematischen Didaktik aktiv, führt in seinem Buch all diese Grundlagen, Beweise und Erkenntnisse ein und verfasst nebenbei sogar eine Einführung in die Mengenlehre. Dabei geht er, den Leser stets an die Hand nehmend, sehr systematisch vor. In der nicht zu ausschweifenden Einleitung erklärt er die Struktur seiner Darstellung und nimmt später ausgiebig darauf Bezug: mindestens zu Beginn und Ende eines jeden Kapitels, manchmal zu häufig. Das hilft die



Motivation und schließlich auch die Beweisidee nachzuvollziehen.

Während in den ersten Kapiteln die Geschichte und die an der Entdeckung beteiligten Mathematiker im Vordergrund stehen, bringt Wapner später mathematische Grundlagen, weitere Paradoxien sowie schließlich die schwache und die starke Formulierung des Satzes und deren Beweis. Jedem Kapitel ist ein Spruch vorangestellt, von der Warnung des Kirchenvaters Augustinus (»Es besteht nämlich die Gefahr, dass die Mathematiker mit dem Teufel im Bund den Geist trüben ...«) bis zu dem Satz »Mathe ist schwer«, der einer sprechenden Barbie-Puppe einprogrammiert war und deren Hersteller große Entrüstung eintrug. Diese inhomogene Zusammenstellung zieht sich leider wie ein roter Faden durch das Buch.

Einige Kapitel sind entbehrlich. Statt einer ellenlangen Aufzählung von Skurrilitäten, die mit dem Banach-Tarski-Paradox nichts zu tun haben, hätte Wapner ruhig die gelungenen, aber etwas zu kompakten theoretischen Kapitel, die für den Beweis des Theorems die nötigen Sätze und Definitionen einführen, ausweiten können, um so den unvertrauten Leser besser abzuholen.

PRAKTISCHES AUS DEM LESERSHOP

SAMMELKASSETTE

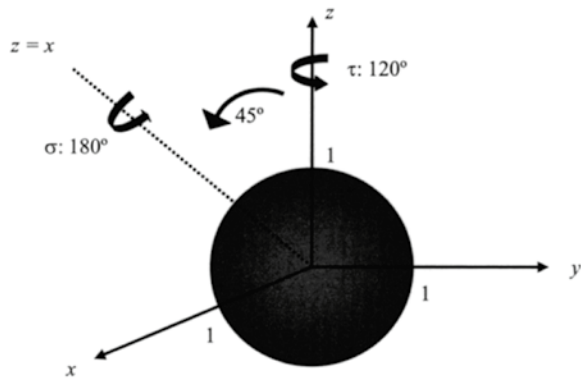


Die Sammelkassette von **Spektrum der Wissenschaft** bietet Platz für 12 bis 15 Hefte und kostet € 9,50 (zzgl. Versand).

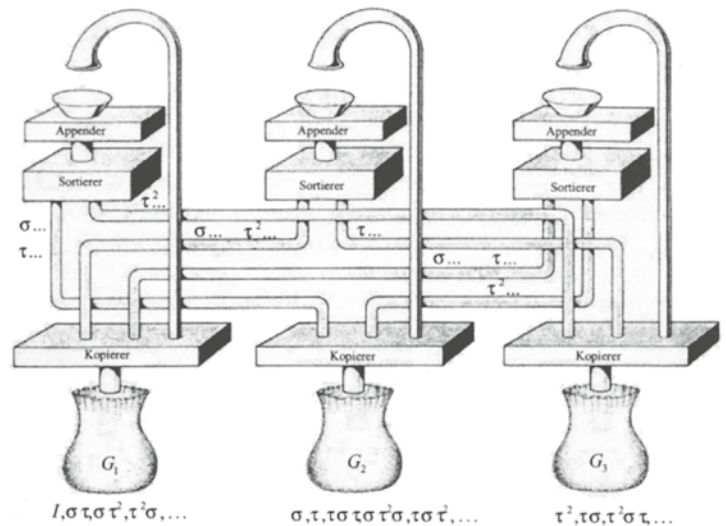
SPEKTRUM-JAHRGANGS-CD-ROM 2009



Sie bietet Ihnen alle Artikel (inklusive Bilder) des vergangenen Jahres im PDF-Format. Diese sind im Volltext recherchierbar und lassen sich ausdrucken. Eine Registerdatenbank erleichtert Ihnen die Suche ab der Erstausgabe 1978. Die CD-ROM läuft auf Windows-, Mac- und Unix-Systemen (der Acrobat Reader wird mitgeliefert). Des Weiteren finden Sie das spektrumdirekt-Archiv mit ca. 10 000 Artikeln. spektrumdirekt und das Suchregister laufen nur unter Windows. Die Jahrgangs-CD-ROM kostet im Einzelkauf € 25,- (zzgl. Porto) oder zur Fortsetzung € 18,50 (inkl. Porto Inland);



Zwei elementare Drehungen namens σ und τ , in immer wieder neuen Reihenfolgen kombiniert, machen aus einem bestimmten Punkt der Kugeloberfläche immer wieder andere (links). Diese Punkte werden nach einem raffinierten Verfahren in Säcke einsortiert (rechts) – Vorstufe für die Zerlegung der ganzen Kugel.



Sprachlich ist das Buch sehr ungesund geschrieben. Liegt es daran, dass es dem Stil der Bücher »für Dummies« folgt, oder ist die Übersetzung schlecht? Beides, fürchte ich. Einige typisch englische Redewendungen wurden direkt und ohne Nachdenken ins Deutsche übersetzt. Und beinahe alle fünf Seiten werden wir daran erinnert, dass das Banach-Tarski-Paradox Kugeln verdoppelt. Da fühlt man sich nicht gerade ernst genommen.

Auch die Zielgruppe ist mir nicht ganz klar geworden. Der Autor stellt ausschweifend die Motivation, die Geschichte und die mathematische Entwicklung zum Banach-Tarski-Paradox hin vor. Das liest sich durchaus erfrischend. Sobald es aber an die echte

Mathematik geht, nimmt Wapner so sehr Fahrt auf, dass es selbst dem Fachkundigen schwerfällt, ihm zu folgen. Während er in manchen Passagen den Leser seitenweise mit Elementarem langweilt, überfordert er ihn an den Stellen, die wichtige mathematische Grundlagen bieten. Wer da ohne Vorkenntnisse hineingerät, wird vermutlich verloren gehen, ohne genau zu wissen, an welcher Stelle er den inhaltlichen Fluss verlassen hat.

All dieser Kritik zum Trotz hat das Buch einem interessierten Leser durchaus viel zu bieten. Das Paradox ist ein spannendes mathematisches Ergebnis, und durch das Buch erkennt man seine Bedeutung und auch den Aufwand, der hinter der so einfach zu be-

schreibenden Verdoppelung von Kugeln steckt. Die mengentheoretischen Ausführungen jedenfalls gehen in ihrer Tiefe bedeutend über das bei populärwissenschaftlichen Sachbüchern Übliche hinaus.

Lars Jeschio

Der Rezensent studiert Mathematik und Philosophie an der Freien Universität Berlin.

Leonard M. Wapner

Aus 1 mach 2

Wie Mathematiker Kugeln verdoppeln

Aus dem Englischen von Harald Höfner und Brigitte Post.

Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2008. 264 Seiten, € 24,95



BIOLOGIE

Nicht die Gene machen den Unterschied

Vielmehr sind die »genetischen Schalter«, die Gene zu gewissen Zeitpunkten aktivieren und wieder abschalten, für die Vielfalt der Lebensformen verantwortlich.

Sean Carroll, Professor für Molekularbiologie und Genetik an der University of Wisconsin in Madison, hat mit seinem jüngsten Buch wieder einen großartigen Beitrag zu einem sehr aktuellen Thema geleistet. Er erläutert, wie zwei der bedeutendsten Bereiche der Biologie, die Entwicklungsbiologie und die Evolutionslehre, in den letzten Jahren zusammengefunden und zu wahrhaft erstaunlichen Erkenntnissen geführt haben.

Jede dieser beiden Disziplinen ist für sich schon überaus faszinierend. Die Entwicklungsbiologie versucht zu erklären, wie aus einer einzigen Zelle, der befruchteten Eizelle, ein ausgewachsener Organismus mit seinen Hunderten von Zelltypen und vielfältigen Funktionen entsteht. Die Evolutionsbiologie hingegen beschäftigt sich damit, wie im Verlauf von Jahrmilliarden die enorme Vielfalt an Organismen auf der Erde entstanden ist.

Nun liefert der erste Bereich revolutionäre Erkenntnisse für den letzteren. 150 Jahre nach der Veröffentlichung von Charles Darwins epochalem Werk »The Origin of Species by Means of Natural Selection« gelingt es, die Entstehung der Artenvielfalt auf der Ebene einzelner Moleküle zu erklären. Carroll selbst ist ein ausgewiesener Experte dieser neuen Disziplin mit dem Kurznamen »Evo Devo« (Devo wie *developmental biology*, Entwicklungsbiologie).

Lange Zeit gingen Biologen davon aus, dass Tiere sich vor allem auf Grund der Art und Anzahl ihrer Gene unterscheiden. Es

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

kam deshalb als eine große Überraschung, wie ähnlich die genetische Kontrolle der Embryonalentwicklung mitunter auch bei solchen Tieren ist, die sehr verschieden aussehen. Ein wichtiges Beispiel betrifft die Entwicklung der Augen und das Gen *Pax-6*. Forscher erkannten in den 1990er Jahren, dass Fliegen keine Augen mehr ausbilden können, wenn dieses Gen defekt ist. Anschließende Untersuchungen an anderen Tieren zeigten, dass *Pax-6* in mehr oder weniger abgewandelter Form bei fast allen Arten, einschließlich des Menschen, vorkommt und auch bei ihnen wichtig für die Entstehung der Augen ist.

Wie ähnlich sich die *Pax-6*-Gene verschiedener Arten sind, zeigte sich aber erst, als Forscher den augenlosen Fliegen das *Pax-6*-Gen der Maus einpflanzten und diese daraufhin wieder völlig normale Augen bildeten. Wie Carroll anschaulich erläutert, ist mittlerweile an vielen Beispielen belegt, dass in grundverschiedenen Arten – Fliegen, Fischen, Mäusen oder Menschen – im Wesentlichen die gleichen Gene Vorgänge in der Entwicklung steuern.

Die zweite große Überraschung kam aus der Genomforschung. Die Sequenzierung ganzer Genome hat gezeigt, dass komplexe Lebewesen wie der Mensch nicht wesentlich mehr Gene haben als deutlich einfacher aufgebaute Organismen wie Fliegen oder Fadenwürmer. Damit hatten sich zwei wichtige Annahmen, mit denen man gehofft hatte, die Vielfalt der Arten erklären zu können, als falsch herausgestellt.

Diese Erkenntnis warf unmittelbar eine entscheidende Frage auf: Wenn die gleichen (oder sehr ähnliche) Gene bei Fliegen und Menschen die Embryonalentwicklung steuern, wieso sehen diese Tiere dann so unterschiedlich aus? Statt auf die Gene selbst richtet sich der Blick der Biologen nun auf die etwa 97 Prozent unseres Genoms, die nicht für Proteine kodieren.

Nach und nach erkennen wir, dass diese »dunkle Materie« unseres Erbguts, wie Carroll sie nennt, der Schlüssel zum Verständnis der Artenvielfalt ist. Nicht in erster Linie die Gene selbst, sondern genetische »Schalter« sind die Stellen, an denen die Evolution ansetzt.

Diese Sequenzen im Genom entscheiden darüber, wann und wo in der Entwicklung bestimmte Gene aktiv sind. Durch Mutationen in den Schaltern ändern sich die Aktivitätsmuster von Genen während der Entwicklung. Das wiederum führt dazu, dass der entstehende Embryo eine neue Form erhält.

So konnte es über viele Generationen und die natürliche Selektion dazu kommen, dass aus den Stummelbeinchen einfacher, wurmförmlicher Meeresbewohner die komplexen Fortsätze der Insekten entstanden, die sie zu einer der erfolgreichsten Tiergruppen gemacht haben: gelenkige Beine, Antennen, Flügel und Mundwerkzeuge zum Beißen, Saugen oder Stechen. Carroll erläutert auch, wie die Wirbeltiere zu ihren vielfältigen Extremitäten kamen, von den noch relativ einfachen Flossen der Fische bis hin zu den Flügeln der Flugsaurier, Vögel und Fledermäuse oder der geschickten Hand des Menschen.

In sehr anschaulichen Kapiteln, in denen er wieder die Ergebnisse seiner eigenen Forschung beschreibt, beschäftigt sich Carroll anschließend damit, wie Muster im Tierreich zu Stande kommen, beispielsweise die vielfältigen Flügelzeichnungen der Schmetterlinge oder die Streifen der Zebras, und welche Bedeutung sie für das Überleben der Art haben. Schließlich geht Carroll kurz auf die Evolution des Menschen ein und erläutert, was uns von den anderen Menschenaffen unterscheidet, obwohl unsere DNA zu 98,8 Prozent mit der des Schimpansen übereinstimmt.

Für Laien ist dies sicher kein Buch, in dem man nach einem harten Arbeitstag noch eine halbe Stunde zur Unterhaltung schmökert. Stattdessen lädt der Autor seine Leser ein, das Thema systematisch anzugehen. Dafür braucht man Zeit. Wer sich aber darauf einlässt, wird mit tiefen Einblicken in einige der größten Geheimnisse des Lebens belohnt.

Alles in allem ein sehr lesenswertes Buch für alle, die sich für Entwicklungsbiologie und Evolutionslehre interessieren, und genau das richtige Buch, um im Darwin-Jahr mitreden zu können. Darwin selbst wäre sicher ein aufmerksamer Leser von Carroll gewesen.

Ralf Dahm

Der Rezensent ist promovierter Biochemiker, habilitierter Neurowissenschaftler und Direktor für Wissenschaftsmanagement am spanischen Krebsforschungszentrum Centro Nacional de Investigaciones Oncológicas (CNIO) in Madrid.

Sean B. Carroll

Evo Devo

Das neue Bild der Evolution

Aus dem Amerikanischen von Kurt Beginnen und Sigrid Kuntz.

Berlin University Press, Berlin 2008.
318 Seiten, € 44,90

Die Aktivität von (angefärbten) Entwicklungsgenen lässt erkennen, wo Strukturen entstehen werden: Fingergelenke, Sehnen in Hand und Fingern, später absterbendes Gewebe zwischen Fingern und Federn am Rücken des Huhns (von oben nach unten).





OKKULTISMUS

Flüchtlingskolonnen aus dem Land der Vernunft

Mit maßvollem Witz und überbordenden Kenntnissen überblickt James Webb ein Jahrhundert okkultur Politik und Kultur.

Ein Rezensent sollte Adjektive der Übertreibung wie »epochal« möglichst meiden. Aber manche Bücher verlangen geradezu nach Superlativen. Der schottische Historiker James Webb (1946–1980) brachte, noch ehe er sein 30. Jahr vollendet hatte, gleich zwei solcher Werke zu Stande: »The Flight from Reason« (1972), das in den USA als »The Occult Underground« erschien, sowie »The Occult Establishment« (1976), das nun endlich auch auf Deutsch vorliegt (die Übersetzung von »Flight from Reason« ist für September vorgesehen). Das Werk ist – es muss gesagt werden – epochal.

Im ersten Band beschrieb Webb die im 19. Jahrhundert einsetzende Flucht weg von der Vernunft. In einer von Zweifeln geprägten Epoche, die ungefähr von der Niederlage Napoleons bis zum Ausbruch des Ersten Weltkriegs reichte, wandten zahlreiche Menschen in Europa und Nordamerika sich von materialistischen und rationalen Konsens ab und mystischen sowie okkulten Versprechungen zu. Allen voran, so Webb, besannen sich Künstler und Literaten des »verworfenen Wissens«, jener – manchmal tatsächlich, manchmal scheinbar – geheimen Einsichten, die keinen Eingang in die akademische Welt gefunden hatten. Den Hang zu diesen esoterischen Ideen beschrieb Webb als »eine Ablehnung des Establishments, die aus der Unfähigkeit entspringt, die trostlosen Befunde der Wissenschaft über den Platz des Menschen im Universum hinzunehmen«. Die Flucht in Geheimlehren wurde so zu einem Versuch, der eigenen Bedeutungslosigkeit zu entkommen und dem Menschen seine »kosmische Relevanz« wiederzugeben.

Die Fliehenden wirkten im »okkulten Untergrund«: Sie waren von der Gesellschaft und insbesondere ihren relevanten Positionen ausgeschlossen, sonderten sich sogar selbst durch ihre zurückweisende, hochmütige und elitäre Haltung ab. Doch bereits sie, die subkulturellen Esoteriker, ahnten, dass »tatkraftige Menschen politische Parteien mobilisieren und Okkultisten kraft ihres Naturells aus Träumen ganze Nationen erschaffen können« – ein Schritt, den die Anhänger des »verworfenen Wissens« erst im 20. Jahrhundert wagten und dem Webb im nun vorliegenden Band folgt.

Dabei erlangten diverse Vernunftflüchtlinge plötzlich weltgeschichtliche Bedeutung. Die Gedankenbrücke zu den schrecklichsten Mystikern des 20. Jahrhunderts liegt nahe. Sein Ausgangspunkt, so Webb, sei es gewesen, »einige der Behauptungen über die Beziehungen des Nationalsozialismus zum Okkultismus zu beweisen oder zu widerlegen«.

Nun war schon manchen Zeitgenossen bekannt, dass diverse Nazigrößen gerne an esoterischen Luftschlossern bauten. Hitler berauschte sich bereits in jungen Jahren an den rassistisch-fantastischen Hirngespinnsten der »Ariosophen« im Wien der Jahrhundertwende, Heinrich Himmler sah sich gerne als Ordensmeister und Wiedergänger des Frankenkönigs Heinrichs des Voglers (876–936), und der geistig reichlich labile Rudolf Heß gab sich zahlreichen vermeintlich germanischen und arischen Fantasereien hin. Insoweit finden sich auch in Webbs Werk keine wirklichen Überraschungen. Sein Verdienst ist es jedoch, den Schleier des Geraunes über rassistisch-esoterische Geheimbünde wie die Thule-Gesellschaft, diverse Germanen-Orden und andere Hirngespinnste zu lüften.

Webb ordnet die Nazi-Spinnereien in einen gesamteuropäischen, ja sogar weltweiten Zusammenhang ein. Und da öffnet sich plötzlich ein Kosmos, in dem alle mit allen irgendwie verbunden sind: Helena Blavatsky (1831–1891), die theosophische Kunderin des neuen Atlantis, und der stets umstrittene und doch auch heute noch weitgehend respektierte Dämonenkundler Rudolf Steiner (1861–1925), besser bekannt als Begründer der Anthroposophie; christliche Sozialisten in Großbritannien und orthodoxe Mystiker aus den Weiten des Zarenreichs – alle finden sich in dem gewaltigen Flüchtlingsstrom aus dem Land der Vernunft.

James Webb, der Tradition der schottischen Aufklärung eines Adam Smith oder David Hume verpflichtet, entwirft diesen Kosmos logisch und kühl, ohne auch nur ein einziges Mal die Schimären der Okkultisten derb zu verhöhnen. Humor aber gönnt er sich. Selten wurden etwa die »Protokolle der Weisen von Zion« mit derart wenigen

Worten als Fälschung entlarvt. Webb reicht es, das unheilvolle antisemitische Pamphlet nachzuerzählen: »Und sie verstecken sich noch heute unter der Erde und tarnen ihre düsteren Ziele mit dem Bau von Untergrundbahnen, womit sie ein Netzwerk von Tunneln schaffen, aus denen heraus sie die Hauptstädte Europas in die Luft sprengen können.« Hat das tatsächlich mal jemand im Westen geglaubt? Glauben das heute wieder Tausende und Abertausende im Orient – in Istanbul etwa, wo seit Jahren die U-Bahn ausgebaut wird, um den finalen Verkehrskollaps in der 12-Millionen-Metropole abzuwenden? Können sie behaupten, es zu glauben, ohne dabei laut aufzulachen?

Webb geht in seiner großartigen Untersuchung jedoch weit über die Verschwörungstheorien, Machtfantasien und Wahnideen der völkisch-esoterischen Irrationalisten der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts hinaus. Den Hang zur »erleuchteten« Politik, zu einer Politik also, die sich an mystischen oder okkulten Prinzipien orientiert, macht er auch in den großen Gegenbewegungen der 1960er Jahre aus. Unter der Neuen Linken etwa, deren New Yorker Exponent Abbie Hoffman 1969 verkündete, das Töten eines Polizisten sei ein sakramentaler Akt; oder bei Timothy Leary und seiner LSD-Mystik oder dem Traum von der großen (und entsprechend unbestimmten) Befreiung des Menschen, der selbst die Science-fiction-Literatur bestimmt.

Als Webbs Werke erschienen, waren sie der akademischen Forschung zu verschrobren und den New-Age-Esoterikern zu vernünftig, zu analytisch. Im Jahr 1980 nahm sich der Historiker verarmt und verzweifelt das Leben. Umso erfreulicher ist es, dass nun die deutsche Version zumindest eines Bandes vorliegt.

Leider wirkt die Übersetzung allzu oft befremdlich und holprig. Und wenn aus dem zumindest in Wien weltberühmten Antisemiten und Bürgermeister Karl Lueger (1844–1910) plötzlich ein »Carl Lüger« wird, tut es mir beinahe leid, eingangs ein Adjektiv der Übertreibung eingesetzt zu haben – aber nur beinahe.

Hakan Baykal

Der Rezensent ist freier Journalist in Berlin.

James Webb

Das Zeitalter des Irrationalen

Politik, Kultur und Okkultismus
im 20. Jahrhundert

Aus dem Amerikanischen von Michael Siefener.
Marix, Wiesbaden 2008. 608 Seiten, € 19,90



Rätsel Dunkle Energie

Sie beschleunigt die Ausdehnung des Alls. Doch noch suchen die Kosmologen verzweifelt nach einer Ursache dieser mysteriösen Kraft

KENN BROWN, MONDLITHIC STUDIOS

WEITERE THEMEN IM AUGUST

Die tödliche Macht der Viren

Schweinegrippe und kein Ende? Von den Erkenntnissen der Virologie hängt das Überleben Hunderttausender Menschen ab – jährlich

Philosophieren in Zeiten der Krise

Der Philosoph Carl Friedrich Gethmann sagt, was zu tun ist, wenn guter Rat wirklich teuer wird

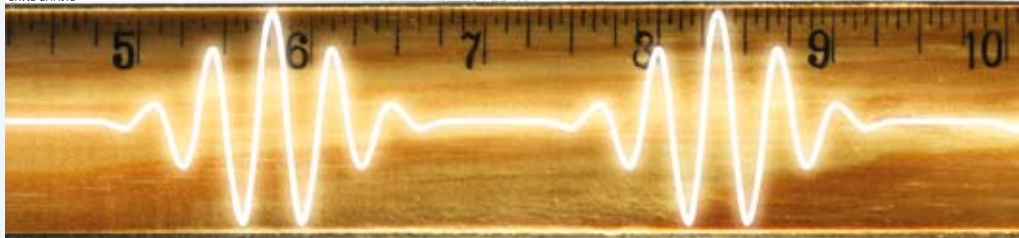
Möchten Sie stets über die Themen und Autoren eines neuen Hefts auf dem Laufenden sein?

Wir informieren Sie gern per E-Mail – damit Sie nichts verpassen!

Kostenfreie Registrierung unter:

www.spektrum.com/newsletter

DAVID EMMITE



Lineale aus Licht

Erst vor wenigen Jahren wurden sie erfunden: optische Frequenzkämme. Sie revolutionieren die Technik von Atomuhren und bringen auch Chemie und Grundlagenforschung voran



WILHELM BARTHOLOTT, UNIVERSITÄT BONN

Selbstreinigende Materialien

Den Lotuseffekt kennt heute fast jeder: Schmutz perlt einfach ab! Daraus haben sich inzwischen Technologien entwickelt, mit denen sich sogar Mikrotröpfchen auf Chips steuern lassen